

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

для студентов специальностей
1-39 01 01, 1-39 02 01, 1-40 01 01, 1-40 02 01

В двух частях

Часть 1

Составление и общая редакция
С.Н. Абраменко

Новополоцк
«ПГУ»
2008

УДК 621.389(075.8)
ББК 32.85я73
Э45

Рекомендовано к изданию методической комиссией
радиотехнического факультета в качестве учебно-методического комплекса
(протокол № 8 от 20.10.2007)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

А. В. ВАСИЮКОВ, канд. техн. наук, ведущий инженер отд. сертификации
РУП «Полоцкий ЦСМС»;
Р. П. БОГУШ, канд. техн. наук, доц., зав. каф. технической кибернетики

Электронные приборы и устройства : учеб.-метод. комплекс / сост.
Э45 и общ. ред. С. Н. Абраменко. В 2 ч. Ч. 1. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – 360 с.

ISBN 978-985-418-655-9 (Ч. 1).

ISBN 978-985-418-654-2.

Разработан в соответствии с учебными планами, типовыми программами курса. Содержит программу курса, цели дисциплины и пути их достижения, методические указания по изучению дисциплины, опорный конспект лекций, теоретические материалы к практическим работам, решения типовых задач и примеров, рекомендуемую литературу, материалы для самоконтроля.

Предназначен для студентов, магистрантов, аспирантов радиотехнических специальностей, преподавателей вузов и средних учебных заведений, инженерно-технических работников.

УДК 621.389(075.8)
ББК 32.85я73

ISBN 978-985-418-655-9 (Ч. 1)

©Абраменко С. Н., составление, 2008
©Оформление. УО «Полоцкий государственный университет», 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
Содержание дисциплины.....	8
РАЗДЕЛ 1. ВВЕДЕНИЕ. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭП, СТРОЕНИЕ ТЕЛ	12
Тема 1. Введение. Основные определения и направления	13
1.1. Основные определения и направления.....	14
1.2. Движение электронов в электрических и магнитных полях	20
1.2.1. Движение электронов в ускоряющем электрическом поле	20
1.2.2. Движение электрона в тормозящем электрическом поле	21
1.2.3. Движение электрона в поперечном электрическом поле.....	21
1.2.4. Движение электрона в магнитных полях.....	22
1.2.5. Физические основы полупроводниковых материалов. Зонная энергетическая диаграмма	23
1.3. Электропроводность полупроводников.....	26
1.3.1. Собственная проводимость полупроводников.....	26
1.3.2. Примесная проводимость полупроводников.....	27
1.3.3. Дрейфовый и диффузионный токи в полупроводниках	29
РАЗДЕЛ 2. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ. P-N-ПЕРЕХОД. ПРОЧИЕ ВИДЫ ПЕРЕХОДОВ	31
Тема 2. Специальные полупроводниковые приборы.....	32
2.1. Варисторы.....	33
2.2. Терморезисторы.....	37
2.3. Магниторезисторы	48
2.4. Приборы на аморфных полупроводниках	52
2.5. Тензоэлектрические полупроводниковые приборы.....	53
2.6. Термоэлектрические полупроводниковые приборы	55
Тема 3. Электронно-дырочный (p-n) переход.....	58
3.1. Образование электронно-дырочного перехода	58
3.2. Прямое и обратное включение p-n перехода.....	59
3.3. Свойства и характеристики p-n перехода	60
3.4. Пробой p-n-перехода	64
3.5. Переход Шоттки.....	67
3.5.1. Образование перехода Шоттки	67
3.5.2. Прямое и обратное включение диодов Шоттки	67
3.6. Некоторые эффекты в полупроводниках.....	68
3.6.1. Тоннельный эффект.....	68
3.6.2. Эффект Гана.....	69
3.6.3. Эффект Холла	70
РАЗДЕЛ 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ	72
Тема 4. Полупроводниковые приборы. Устройство, классификация и основные параметры полупроводниковых диодов.....	73
4.1. Классификация и условные обозначения полупроводниковых диодов.....	73
4.2. Конструкция полупроводниковых диодов	76
4.3. Вольт-амперная характеристика и основные параметры полупроводниковых диодов	78
4.4. Выпрямительные диоды.....	80
4.5. Стабилитроны.....	82
4.6. Варикапы	86
4.7. Импульсные, высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) диоды	88
4.7.1. Импульсные диоды.....	88
4.7.2. Диоды ВЧ.....	90
4.7.3. СВЧ диоды.....	92

РАЗДЕЛ 4. ТРАНЗИСТОРЫ	101
Тема 5. Биполярные транзисторы. Устройство, классификация и принцип действия биполярных транзисторов	105
5.1. Классификация и маркировка транзисторов	105
5.2. Устройство биполярных транзисторов.....	107
5.3. Принцип действия биполярных транзисторов	109
5.4. Схемы включения биполярных транзисторов.....	112
5.4.1. Схема включения с общей базой	112
5.4.2. Схема включения с общим эмиттером	113
5.4.3. Схема включения с общим коллектором.....	114
5.4.4. Усиительные свойства биполярного транзистора.....	116
Тема 6. Статические характеристики схем включения биполярных транзисторов. Частотные, температурные и электрические параметры.....	119
6.1. Статические характеристики транзистора по схеме ОБ	119
6.1.1. Входная характеристика.....	120
6.1.2. Выходная характеристика	120
6.2. Статические характеристики транзистора по схеме ОЭ	121
6.3. Температурные свойства транзисторов.....	122
6.4. Частотные свойства транзисторов	123
6.5. Параметры биполярных транзисторов	125
Тема 7. Полевые транзисторы	126
7.1. Устройство и принцип действия полевых транзисторов с управляющим р-п переходом.....	127
7.2. Характеристики и параметры полевых транзисторов.....	129
7.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором	130
7.4. Полевые транзисторы для ПМС РПЗУ	134
7.5. Схемы включения полевых транзисторов.....	135
7.6. Параметры полевых транзисторов.....	136
РАЗДЕЛ 5. БЕСКОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА КОММУТАЦИИ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА	138
Тема 8. Приборы бесконтактной коммутации: тиристоры, IGBT- транзисторы.....	140
8.1. Устройство и принцип действия динисторов.....	141
8.2. Основные параметры тиристоров.....	142
8.3. Тринисторы.....	144
8.4. Симисторы.....	146
8.5. Однопереходные транзисторы(двухбазовые)	147
8.6. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).....	150
Тема 9. Оптоэлектронные приборы.....	156
9.1. Общая характеристика оптоэлектронных приборов.....	157
9.2. Излучатели.....	158
9.2.1. Излучающий диод (светодиод)	158
9.2.2. Лазеры.....	162
9.3. Приемники оптического излучения.....	164
9.3.1. Общая характеристика	164
9.3.2. Фоторезисторы	165
9.3.3. Фотодиоды.....	166
9.3.4. Фототранзисторы.....	170
9.3.5. Фототиристоры.....	172
9.4. Понятие о приборах с зарядовой связью Многоэлементные приемники изображения	173

9.4.1. Аналоговые ПЗС.....	175
9.4.2. ПЗС-преобразователи изображения.....	175
9.5. Оптроны и оптоэлектронные ИМС.....	177
9.6. Индикаторы	182
9.6.1. Буквенно-цифровые индикаторы.....	183
9.6.2. Матричные индикаторы	184
9.6.3. Вакуумные электролюминесцентные индикаторы	185
9.6.4. Жидкокристаллические индикаторы	185
РАЗДЕЛ 6. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ	188
Тема 10. Электронные усилители. Классификация и основные технические показатели усилителей.....	191
10.1. Классификация усилителей.....	191
10.2. Основные технические показатели усилителей	194
10.3. Характеристики усилителей.....	196
10.4. Межкаскадные связи в усилителях.....	200
10.4.1. Виды межкаскадных связей	200
10.4.2. Эквивалентная схема усилительного каскада с резисторно-емкостными связями.....	201
10.4.3. Анализ эквивалентной схемы на низких, средних и высоких частотах	202
Тема 11. Обратная связь в усилителях	205
11.1. Виды обратной связи.....	205
11.2. Влияние ООС на основные показатели усилителя.....	207
11.3. Устойчивость работы многокаскадных усилителей	209
11.4. Регулировки в усилителях.....	210
Тема 12. Усилители постоянного тока с непосредственными связями. Дифференциальные и операционные усилители	212
12.1. Усилители постоянного тока с непосредственными связями.....	213
12.2. Дифференциальный каскад УПТ	214
12.3. Операционные усилители (ОУ). Классификация и основные параметры операционных усилителей.....	215
12.4. Схемы включения и использования ОУ	219
РАЗДЕЛ 7. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ	226
Тема 13. Основы микроэлектроники.....	228
13.1. Классификация и УГО интегральных микросхем.....	229
13.2. Аналоговые интегральные микросхемы.....	232
13.3. Классификация микросхем по функциональному признаку, система обозначений. Функциональная классификация микросхем	234
13.4. Элементы и компоненты ГИС.....	247
13.5. Элементы и компоненты полупроводниковых ИМС.....	249
13.6. Корпуса ИМС, техническая документация на ИМС.....	259
Тема 14. Простейшие логические функции и логические элементы	264
14.1. Логические функции и их реализация.....	265
14.2. Схемотехника простейших логических элементов.....	267
14.3. Характеристики и параметры цифровых ИМС	269
14.4. Классификация логических устройств	275
Тема 15. Базовые логические элементы цифровых интегральных микросхем.....	276
15.1. Диодно-транзисторная логика	277
15.2. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ)	278
15.2.1. Транзисторно-транзисторная логика с простым инвертором.....	279

15.2.2. ТТЛ со сложным инвертором.....	279
15.3. Логические элементы ТТЛ со специальными выводами.....	281
15.3.1. ТТЛ с открытым коллектором	281
15.3.2. ТТЛ с Z-состоянием.....	282
15.3.3. ТТЛШ.....	283
15.4. Логические элементы на полевых транзисторах МОП-структуры	284
15.4.1. Ключи на МОП-транзисторах	285
15.4.2. Комплементарная МОП – пара (КМОП)	286
15.4.3. Реализация функции И-НЕ в КМОП-логике	286
15.4.4. Реализация функции ИЛИ-НЕ в КМОП-логике.....	287
15.5. Эмиттерно-связная логика	288
15.5.1. Реализация функций ИЛИ и ИЛИ-НЕ в эмиттерно-связной логике (ЭСЛ)	288
15.5.2. Источник опорного напряжения	289
15.5.3. Базовый элемент ЭСЛ серии К500.....	290
15.6. Интегральная инжекционная логика (И ² Л)	291
15.7. Правила схемного включения элементов	294
РАЗДЕЛ 8. ГЕНЕРАТОРЫ	296
Тема 16. Автогенераторы электрических колебаний	297
16.1. Генераторы гармонических колебаний. Общие сведения	297
16.2. Самовозбуждение генератора	298
16.3. LC-генераторы	301
16.4. Режимы самовозбуждения автогенераторов	303
16.5. Трехточечные автогенераторы гармонических колебаний.....	306
16.6. RC-генераторы.....	307
16.7. Стабилизация частоты в автогенераторах	310
16.8. Прочие типы генераторов. Магнетроны.....	312
16.9. Оптические квантовые генераторы (лазеры).....	315
РАЗДЕЛ 9. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ	319
Тема 17. Электровакуумные и лучевые приборы	322
17.1. Введение в эмиссионную электронику.....	322
17.2. Основы эмиссионной электроники.....	323
17.3. Электровакуумный диод, устройство и принцип действия.....	326
17.4. Основные параметры электровакуумного диода	328
17.5. Триод.....	331
17.5.1. Устройство и принцип действия триода.....	331
17.5.2. ВАХ и основные параметры триода	333
17.6. Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим управлением	335
17.7. ЭЛТ с электромагнитным управлением	338
17.8. Кинескопы	340
17.9. Цветные кинескопы.....	340
РАЗДЕЛ 10. ШУМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ	343
Тема 18. Шумы электронных приборов	344
18.1. Общие сведения.....	344
18.2. Источники шумов в электронных приборах	346
18.3. Коэффициент шума Шумы биполярных транзисторов	352
18.4. Шумы полевых транзисторов	355
18.5. Выбор малошумящих транзисторов	358

ВВЕДЕНИЕ

1. Цель и задачи дисциплины

1.1. Цель преподавания дисциплины

Основной целью преподавания дисциплины является изучение студентами основных типов и разновидностей современных электронных приборов, физических основ функционирования, систем маркировки, условных графических обозначений ЭП, основ их разработки и практического применения.

1.2. Задачи изучения дисциплины

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- Изучить физические процессы, используемые при работе электронных приборов (ЭП), конструктивные особенности ЭП и зависимость электрических параметров от конструкции и дестабилизирующих факторов.
- Получить знания по особенностям технологии изготовления ЭП, современным методам улучшения качественных характеристик на этапе разработки и изготовления ЭП.
- На основании практических расчетов научиться производить анализ основных характеристик схем, в которых используются электронные приборы, и осуществлять выбор необходимых типов ЭП из их современной номенклатуры.

Знать:

- физические основы явлений, обуславливающих принцип действия, устройство, параметры, характеристики и режимы работы электронных приборов;
- простейшие схемотехнические решения аналоговых, импульсных и цифровых устройств различного функционального назначения;
- современное состояние и перспективы развития электронных приборов и радиоэлектронных устройств на их основе.

Уметь:

- осуществлять рациональный выбор соответствующих электронных приборов и режимов их работы при разработке электронных устройств;
- выполнять расчет простейших электронных устройств;
- работать с электронными приборами и аппаратурой, используемой для исследования характеристик и измерения параметров приборов и устройств на их основе;
- работать с технической литературой, справочниками, стандартами, технической документацией по электронным приборам.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Рабочая программа

Виды занятий, формы контроля знаний	Д 1-39 01 01	Д 1-39 02 01	З 1-39 02 01	Д 1-40 01 01	З 1-40 01 01	Д 1-40 02 01	З 1-40 02 01
	П	П	С	П	С	П	П
Курс	2	2	3	2	4	2	3
Семестр	3	3	5	4	7	3	5
Лекции, ч	36	36	4	32	4	36	10
Экзамен (семестр)	3	3	–	4	7	3	5
Зачет (семестр)		–	5				
Практические (семинарские), ч	18	18	2	16		18	2
Лабораторные занятия, ч	18	18	6	16	4	18	8
Расчетно- графические работы (семестр)		–	–				
Контрольные ра- боты (семестр)		–	–		7		5
Курсовая работа (семестр /часы)		–	–				
Курсовой проект (семестр /часы)		–	–				
Управляемая самостоятельная работа (часы)		–	–				
Аудиторных (ч)	72	72	12	64	8	72	20
Всего(ч)	110	90	90	100	100	105	105

Наименование тем лекционных занятий

Наименования разделов и тем лекций и их содержание	Число часов				
	Дневное			Заочное	
	Полн. 1-39 01 01 1-39 02 01 1-40 02 01	Полн. 1-40 01 01	Сокр. 1-39 02 01	Сокр. 1-40 01 01	Полн. 1-40 02 01
Семестр	3 семестр	4 семестр	5 семестр	7 семестр	5 семестр
1	2	3	4	5	6
РАЗДЕЛ 1. ВВЕДЕ- НИЕ. КЛАССИФИ- КАЦИЯ ЭП, СТРОЕ- НИЕ ТЕЛ			0,25	0,25	1
Тема 1. Введение. Ос- новные определения и направления.	2	2			

1	2	3	4	5	6
РАЗДЕЛ 2 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ. P-N-ПЕРЕХОД.			0,25	0,25	1
Тема 2. Специальные полупроводниковые приборы. Тема 3. Электронно-дырочный (p-n) переход	4	4			
РАЗДЕЛ 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ			0,5	0,5	1
Тема 4. Полупроводниковые приборы. Устройство, классификация и основные параметры полупроводниковых диодов	2	2			
РАЗДЕЛ 4. ТРАНЗИСТОРЫ			0,5	0,5	2
Тема 5. Биполярные транзисторы. Устройство, классификация и принцип действия биполярных транзисторов	2	2			
Тема 6. Статические характеристики схем включения биполярных транзисторов. Частотные, температурные и электрические параметры.	2	2			
Тема 7. Полевые транзисторы	2	2			
РАЗДЕЛ 5. БЕСКОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА КОММУТАЦИИ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА			0,5	0,5	1
Тема 8. Приборы бесконтактной коммутации: тиристоры, IGBT-транзисторы	2	2			
Тема 9. Оптоэлектронные приборы	2	2			

1	2	3	4	5	6
РАЗДЕЛ 6. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ					1
Тема 10. Электронные усилители. Классификация и основные технические показатели усилителей	2	2	0,5	0,5	
Тема 11. Обратная связь в усилителях	2	2			
Тема 12. Усилители постоянного тока с непосредственными связями. Дифференциальные и операционные усилители	2	2			
РАЗДЕЛ 7. Интегральные схемы			0,5	0,5	1
Тема 13. Основы микроэлектроники	2	2			
Тема 14. Простейшие логические функции и логические элементы	2	2			
Тема 15. Базовые логические элементы цифровых интегральных микросхем	2	2			
РАЗДЕЛ 8. ГЕНЕРАТОРЫ					0,5
Тема 16. Автогенераторы электрических колебаний	2				
РАЗДЕЛ 9. Электровакуумные приборы			0,5	0,5	1
Тема 17. Электровакуумные и лучевые приборы	2	2			
РАЗДЕЛ 10. ШУМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ			0,5	0,5	0,5
ТЕМА 18. Шумы электронных приборов	2				
Итого	36	32	4	4	10

Практические занятия

№	Наименование практической работы	Время на выполнение
1	Практическое занятие 1. Диоды, параметры, ВАХ, рабочий режим	2
2	Практическое занятие 2. Использование диодов в выпрямителях. Проверка и замена диодов	2
3	Практическое занятие 3. Стабилитроны. Параметры, использование, замена. Элементы защиты от перенапряжений	2
4	Практическое занятие 4. Эквивалентные схемы и модели транзисторов	2
5	Практическое занятие 5. Системы дифференциальных малосигнальных параметров транзисторов	2
6	Практическое занятие 6. Динамический и ключевой режим работы транзисторов. Цепи питания и смещения рабочей точки. Цифровые транзисторы	2
7	Практическое занятие 7. Режимы работы усилительных элементов. Разновидности каскадов усиления. Оконечные каскады. Проверка и замена транзисторов	2
8	Практическое занятие 8. Исследование характеристик дифференциальных каскадов и операционных усилителей	2
9	Практическое занятие 9. АЦП и ЦАП. Мультивибраторы	2
ИТОГО, ч		18

Лабораторные занятия, их содержание и объем в часах

№	Наименование лабораторной работы	Время на выполнение
1	Изучение программы Electronics Workbench	2
2	Исследование параметров полупроводниковых диодов и стабилитронов	4
3	Исследование схем включения и характеристик биполярных транзисторов	4
4	Исследование характеристик полевых транзисторов	4
5	Исследование ключевых схем на транзисторах	4
ИТОГО, ч		18

Оценка знаний

Оценка знаний студентов производится по рейтингово-накопительной системе. Учитывается:

- отсутствие пропусков занятий всех видов (в том числе по уважительным причинам);
- активное участие и работа на лекциях и практических занятиях по материалам предыдущих тем и контрольным вопросам в конце текущей лекции;
- своевременное выполнение программы и защита лабораторного практикума (например, в начале каждой из следующих лабораторных работ студент предъявляет отчет (правила оформления приведены в методических указаниях к лабораторным работам по курсу) и успешно решает тестовые задания по теоретической части предыдущей работы).

РАЗДЕЛ 1. ВВЕДЕНИЕ. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭП, СТРОЕНИЕ ТЕЛ

Содержание раздела

Введение

Определение термина «электронные приборы». Классификация электронных приборов по характеру рабочей среды (вакуум, разреженный газ, твердое тело), принципу действия и диапазону рабочих частот. Основные свойства и особенности электронных приборов. Понятия о режимах и параметрах электронных приборов.

Физические основы полупроводниковой электроники

Свойства полупроводников. Основные материалы полупроводниковой электроники (кремний, германий, арсенид галлия), их основные электрофизические параметры. Процессы образования свободных носителей заряда.

Концентрация свободных носителей в собственных и примесных полупроводниках, ее зависимость от температуры. Время жизни и диффузионная длина носителей. Дрейфовое движение, подвижность носителей заряда и ее зависимость от температуры и концентрации примесей. Плотность дрейфового тока, удельная проводимость полупроводников и ее зависимость от температуры и концентрации примесей. Движение носителей в сильных электрических полях, зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля. Диффузионное движение носителей, коэффициент диффузии, плотность диффузионного тока. Появление электрического поля в полупроводнике при неравномерном распределении примесей. Физические процессы у поверхности полупроводника. Контактные явления в полупроводниках.

Методические указания

[1, с. 5 – 46; 2, с. 46 – 79; 3, с. 24 – 40]

Изучив понятия режимов и параметров электронных приборов, научиться пользоваться справочной литературой.

При изучении данного материала необходимо получить четкие представления о процессе электропроводности в чистых (собственных) и примесных полупроводниках, особенностях кристаллической структуры полупроводника, энергетических уровнях электронов в атоме.

Необходимо разобраться в явлениях электропроводности собственных и примесных полупроводников, знать выражения для дрейфовых и диффузионных составляющих тока в полупроводнике, иметь представления о явлении рекомбинации носителей заряда и их времени жизни, уметь вывести уравнение непрерывности для одномерного случая и дать объяснение его физической сущности.

Рекомендуемая литература

1. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учеб. для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров ; под ред. О. П. Глудкина. – М. : Радио и связь, 1999.
2. Гусев, В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 1991.
3. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.

Вопросы для самопроверки

1. Какой полупроводник называется: а) собственным; б) примесным?
2. Примеси какой валентности обеспечивают получение полупроводника: а) n-типа; б) p-типа?
3. Где располагается уровень Ферми у примесных полупроводников: а) n-типа; б) p-типа?
4. Что такое диффузия носителей в полупроводнике?
5. Что такое дрейф носителей в полупроводнике?
6. Чем определяется электропроводность полупроводника: а) n-типа; б) p-типа?
7. Чем определяется величина дрейфового тока в полупроводнике?
8. Что такое рекомбинация носителей заряда в полупроводнике и от чего она зависит?

Тема. 1. Введение. Основные определения и направления

Термины: электроника, информационный сигнал, электронные приборы, классификация электронных приборов, режим и параметр работы электронного прибора, статические и динамические характеристики, условное графическое обозначение, схема, позиционное обо-

значение, движение электронов в электрических и магнитных полях, полупроводник, зона, энергетическая диаграмма, валентность, ионизация, электронно-дырочная пара, генерация, рекомбинация, концентрация, время жизни, диффузионная длина, собственная и примесная проводимость, донорная и акцепторная примеси, легирование, дрейфовый и диффузионный токи в полупроводниках.

1.1. Основные определения и направления

1.2. Движение электронов в электрических и магнитных полях

1.3. Электропроводность полупроводников

1.1. Основные определения и направления

Электроника – это наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями, о методах, охватывающих исследование и разработку электронных приборов, и о принципах их использования. *Информационный сигнал* формируется за счет изменения параметров какого-либо физического процесса. Для передачи и обработки больших объемов информации наиболее часто сигналы формируются с помощью электрического тока (или напряжения) и электромагнитного излучения. Процесс обработки информации в том или ином виде осуществляется с помощью электронных приборов.

Электронные приборы – это устройства, работа которых основана на использовании электрических, тепловых, оптических и акустических явлений в твердом теле, жидкости, вакууме, газе или плазме. Электронные приборы применяют как элементы радиоэлектронной аппаратуры, не подлежащие сборке, разборке и ремонту.

Основные наиболее общие функции, выполняемые приборами, состоят в преобразовании либо информационных сигналов, либо энергии. В качестве примеров преобразования энергии можно привести преобразование солнечной энергии в электрическую, тепловой в электрическую, переменного тока в постоянный и наоборот.

Само название «электронные приборы» связано с тем, что все процессы преобразования сигналов и энергии происходят либо только за счет движения электронов, либо при их непосредственном участии. Основными

задачами электронного прибора как преобразователя информационных сигналов являются: усиление, генерирование, передача, накопление и хранение сигналов, выделение их на фоне шумов.

Наиболее часто электронные приборы **классифицируются по виду сигналов и способу обработки информации, их назначению, физическим свойствам, основным электрическим параметрам, конструктивно-технологическим признакам, роду рабочей среды и т.д.**

В зависимости от вида сигналов и способа обработки информации все существующие электронные приборы разделяют на *электропреобразовательные (полупроводниковые и электровакуумные), ионные (газоразрядные), электросветовые, фотоэлектрические, термоэлектрические, акустоэлектрические и механоэлектрические.*

Электропреобразовательные приборы представляют самую большую группу электронных приборов. В электропреобразовательных приборах происходит преобразование параметров электрических сигналов, полученных от источников электрической энергии. К ним относятся: различные типы полупроводниковых диодов, биполярные и полевые транзисторы, тиристоры, электровакуумные лампы – диоды, триоды, тетроды, пентоды и т.д.

В **газоразрядных (ионных) приборах** используются эффекты и явления при протекании тока в газонаполненных средах. Основным носителем электрического заряда являются положительно заряженные ионы газа. Основные разновидности – стабилитроны, газотроны, тиратроны, плазменные панели и т.д.

В **электросветовых** – электрические сигналы преобразуются в оптические (световые). Примеры: светодиоды, люминесцентные конденсаторы, лазеры, электронно-лучевые трубки.

В **фотоэлектрических** – оптические сигналы преобразуются в электрические, к ним относят фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры, солнечные батареи и др.

К **термоэлектрическим** приборам относятся специальные типы полупроводниковых диодов, транзисторов и термисторы. В них температурные воздействия преобразуются в электрические величины.

В акустоэлектронных приборах акустические сигналы преобразуются в электрические и наоборот: акустоэлектрические усилители, генераторы, фильтры, линии задержки на поверхностных акустических волнах и др.

По виду рабочей среды различают следующие классы приборов: полупроводниковые, электровакуумные, газоразрядные, хемотронные (рабочая среда – жидкость).

В зависимости от назначения и выполняемых функций электронные приборы делят на выпрямительные, усилительные, генераторные, переключательные, преобразовательные, индикаторные и т.д.; по диапазону рабочих частот подразделяются на низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные; по мощности – на маломощные, средней мощности и мощные.

Основные понятия о режимах и параметрах электронных приборов. Понятие режима электронного прибора включает в себя совокупность условий, определяющих его работу. Если режим работы прибора соответствует требованиям нормативно-технической документации для эксплуатации прибора данного типа, то такой режим называют *типовым*. Любой режим определяется совокупностью величин, которые называют параметрами. *Параметром режима* электронного прибора называют любую величину, характеризующую режим прибора, например, различают *электрический режим*, который определяет значения напряжений на электродах и токи в их цепях, *механический режим* – это совокупность механических воздействий на работающий прибор (удары, тряска и т.п.) и *климатический режим*, который определяет интервал рабочих температур, относительную влажность окружающей среды, уровень радиации и т.д. Механические и климатические воздействия на электронные приборы определяют допустимые уровни влияния окружающей среды. Вышеперечисленные параметры приводятся в справочниках или данных от производителя, называемых даташитами (data sheet). Там же можно найти и варианты внешнего вида корпуса (корпусов) прибора, нумерацию и расположение выводов (цоколевка), геометрические размеры и массу. Пример впускаемого транзистора КТ377 в различных корпусах (вариант исполнения) приведен на рис. 1.1.

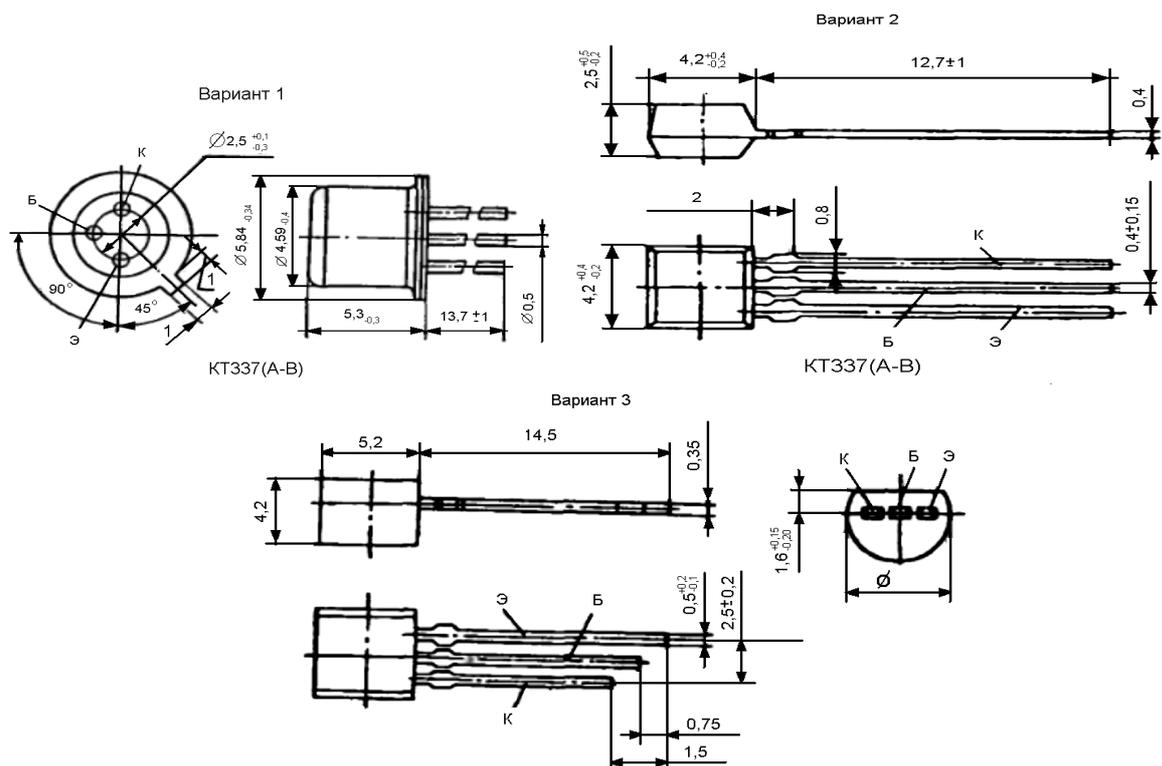


Рис. 1.1. Варианты исполнения корпуса транзистора КТ337

Упомянутые параметры электрического режима относятся к *функциональным*, к которым в зависимости от вида энергии сигнала относятся также *электромагнитные, световые, тепловые* и другие параметры.

Численные значения функциональных параметров, установленные нормативно-технической документацией, называются *номинальными значениями*. Оптимальные условия работы прибора при эксплуатации, испытаниях или измерениях его параметров определяются номинальным режимом. Кроме номинальных для электронных приборов рассматривают *предельные параметры*, которые характеризуют предельно допустимые режимы работы прибора, например, *максимально допустимые значения напряжений на электродах* прибора, *максимально допустимую мощность*, рассеиваемую электродом или прибором в целом, и т.д.

1. Соблюдение номинальных режимов работы обеспечит заданную надежность прибора в течение срока эксплуатации (обычно характеризуют интенсивностью отказов в единицу времени). В случае использования приборов на предельно-допустимых режимах работы (табл. 1.1) их ресурс сокращается, поэтому эксплуатация в этих условиях допускается лишь временно (например: обратное максимальное напряжение диода КД202И $U_{обр\ max} = 210\ В$, а импульсное $U_{обр\ max\ и} = 300\ В$) (Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы : справочник. – 2-е изд, перераб. и доп / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, В. Л. Прохоренко. – Минск : Беларусь, 1987. – 285 с. – с. 14).

Таблица 1.1

Электрические параметры и предельные значения допустимых режимов работы

Обозначение	Режим измерения	КТ337А	КТ337Б	КТ337В
h_{21E}	$U_{KB} = -0,3 \text{ В}; I_{\Delta} = 10 \text{ мА};$ $\Theta_{окр.} = 25 \text{ }^{\circ}\text{С}$	≥ 30	≥ 50	≥ 70
	$\Theta_{окр.} = 85 \text{ }^{\circ}\text{С}$	24...60	40...100	56...140
	$\Theta_{окр.} = -40 \text{ }^{\circ}\text{С}$	≥ 9	≥ 15	≥ 21
$h_{21\Delta}$	$U_{KB} = -5 \text{ В}; I_{\Delta} = 10 \text{ мА};$ $f = 100 \text{ МГц}$	≥ 5	≥ 6	≥ 6
$I_{КБ0}, \text{ мкА}$	$U_{KB} = -6 \text{ В}$	≤ 1	≤ 1	≤ 1
$I_{КЭR}, \text{ мкА}$	$R_{ЭБ} \leq 10 \text{ кОм}; U_{KB} = -6 \text{ В}$	≤ 5	≤ 5	≤ 5
$I_{ЭБ0}, \text{ мкА}$	$U_{ЭБ} = -4 \text{ В}$	≤ 5	≤ 5	≤ 5
$U_{КЭ.нас.}, \text{ В}$	$I_{к} = 10 \text{ мА}; I_{Б} = 1 \text{ мА};$	-0,2	-0,2	-0,2
$U_{БЭ.нас.}, \text{ В}$	$I_{к} = 10 \text{ мА}; I_{Б} = 1 \text{ мА};$	-1	-1	-1
$C_{К}, \text{ пФ}$	$U_{KB} = -5 \text{ В}; f = 10 \text{ МГц};$	≤ 5	≤ 5	≤ 5
$C_{Э}, \text{ пФ}$	$U_{ЭБ} = 0; f = 10 \text{ МГц};$	≤ 5	≤ 5	≤ 5
$t_{раст.}, \text{ нс}$	$I_{к} = 10 \text{ мА}; I_{Б} = 1 \text{ мА};$	25	28	28
$U_{КЭR}, \text{ макс. В}$	$R_{ЭБ} \leq 10 \text{ кОм};$	-6	-6	-6
$U_{ЭБ}, \text{ макс. В}$	$\Theta_{окр.} = 85 \text{ }^{\circ}\text{С}$	-4	-4	-4
$U_{KB}, \text{ макс. В}$	$\Theta_{окр.} = 85 \text{ }^{\circ}\text{С}$	-6	-6	-6
$I_{к. макс.}, \text{ мА}$	$\Theta_{окр.} = 85 \text{ }^{\circ}\text{С}$	30	30	30
$P_{к. макс.}, \text{ мВт}$	$\Theta_{окр.} = 60 \text{ }^{\circ}\text{С}$	150 ¹	150 ¹	150 ¹
$\Theta_{пер. макс.}, \text{ }^{\circ}\text{С}$	-	150	150	150
$R_{пер. окр.}, \text{ }^{\circ}\text{С}/\text{мВт}$	-	0,6	0,6	0,6

¹ При температуре от 60 до 85 °С допустимая мощность (мВт) определяется по формуле $P_{к. макс} = (150 - \Theta_{окр})/0,6$.

К электродам электронных приборов подключают источники как постоянных, так и переменных напряжений. Если прибор работает при постоянных напряжениях на электродах, то такой режим работы называют *статическим*. В этом случае все параметры режима не изменяются во времени. Режим работы прибора, при котором хотя бы на одном из электродов напряжение изменяется во времени, называется *динамическим*.

Иногда параметры режима изменяются во времени настолько медленно за время движения носителей заряда в рабочем пространстве, что в каждый момент времени они несущественно отличаются от статических, т.е. для прибора остаются практически справедливыми параметры статического режима. В этом случае режим работы называют *квазистатическим*.

Кроме параметров режима различают параметры электронного прибора, которыми называют физические величины, характеризующие свойства прибора (например, коэффициент усиления, внутреннее сопротивление, междуэлектродные емкости и т.д.).

Зависимость какого-либо параметра режима или параметра прибора, который принят в качестве функции, от другого параметра, который при-

нут в качестве аргумента, при условии, что все остальные величины остаются неизменными, называют *характеристикой электронного прибора*. Совокупность характеристик при различных фиксированных значениях независимого третьего параметра называют *семейством характеристик*. Важнейшими характеристиками электронных приборов являются *статические характеристики* (рис. 1.2), отображающие зависимость тока в цепи какого-либо электрода от напряжения на любом электроде в статическом режиме. Часто названия статических характеристик связывают с названием электродов, например, анодные, стоковые и т.д. Помимо этого, существуют также и обобщенные названия семейств статических характеристик без указания названий электродов, например, входные, выходные и т. д.

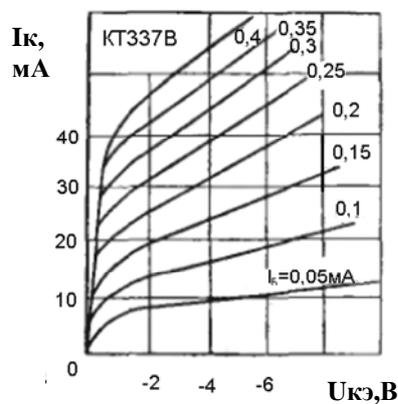


Рис. 1.2. Статические вольт-амперные характеристики транзистора

В большинстве случаев при изучении принципов работы и основ функционирования приходится иметь дело со схемами – документами, в которых в виде условных графических обозначений показаны составные части устройств и связей между ними. В электрических схемах электронные приборы заменены условными графическими обозначениями (УГО), рядом с которыми обязательно присутствует позиционное обозначение в виде двух латинских букв и нескольких арабских цифр. Нумерация осуществляется в пределах части схемы (узла) по каждой из групп отдельно (диоды, транзисторы, микросхемы и т.д.) и производится в направлении сверху вниз слева направо (рис. 1.3).

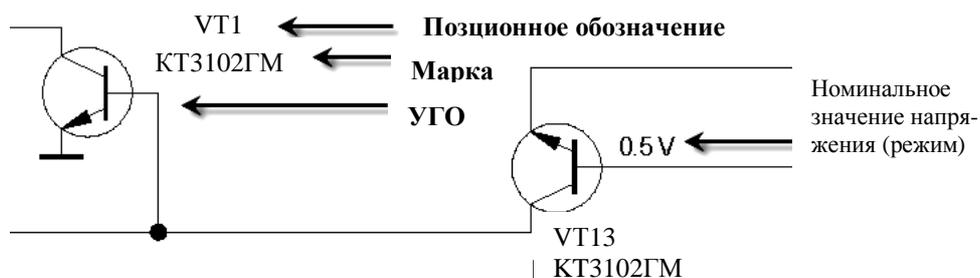


Рис. 1.3. Фрагмент электрической принципиальной схемы

1.2. Движение электронов в электрических и магнитных полях

1.2.1. Движение электронов в ускоряющем электрическом поле

Рассмотрим однородное электрическое поле с напряженностью $E = U/d$.

На рис. 1.4 приведена схема движения электрона в однородном электрическом поле.

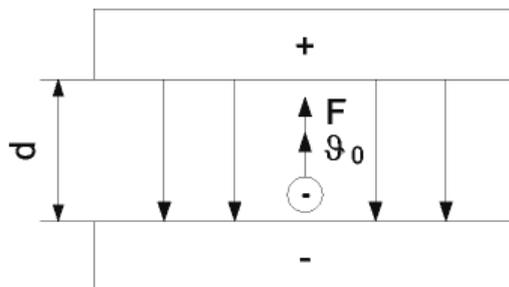


Рис. 1.4. Движение электрона в однородном электрическом поле

На единичный положительный заряд, помещенный в электрическое поле, действует сила, равная по величине напряженности этого поля. $F = E$ – для единичного положительного заряда.

$$\left. \begin{array}{l} e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \end{array} \right\} \text{Const}$$

$$F = -eE \text{ – для электрона.}$$

Знак « $-$ » показывает, что сила, действующая на электрон, направлена против линии напряженности электрического поля. Под действием данной силы электрон будет двигаться равноускоренно и приобретет максимальную скорость в конце пути. Поле, линии напряженности которого направлены навстречу вектору начальной скорости электрона v_0 , называется ускоряющим электрическим полем. Определим максимальную скорость электрона. Работа по перемещению электрона из одной точки поля в другую равна произведению заряда электрона на разность потенциалов между этими точками:

$$A = eU.$$

Данная работа затрачивается на сообщение электрону кинетической энергии

$$W_K = \frac{m \cdot (v - v_0)^2}{2},$$

где v – конечная скорость электрона.

Будем считать, что $v_0 = 0$.

$$A = W_k,$$

$$e \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2},$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e}{m} \cdot U},$$

так как e и m – константы, то $v \approx 600 \cdot \sqrt{U}$.

Из последней формулы видно, что скорость электрона в электрическом поле определяется только величиной напряжения между двумя точками поля, и поэтому скорость электрона иногда характеризуют этим напряжением.

1.2.2. Движение электрона в тормозящем электрическом поле

На рис. 1.5 приведена схема движения электрона в тормозящем электрическом поле.

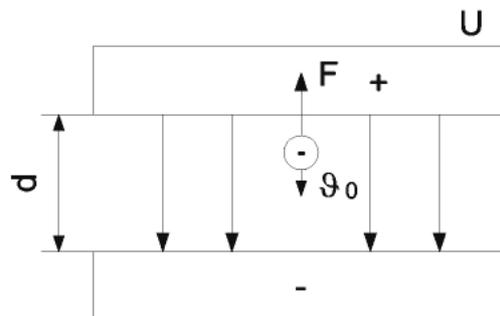


Рис. 1.5. Движение электрона в тормозящем электрическом поле

Под действием силы P электрон будет двигаться равнозамедленно, в какой-то точке поля он остановится и начнет двигаться в обратном направлении. Электрическое поле, линии напряженности которого совпадают по направлению с вектором начальной скорости электрона, называется тормозящим электрическим полем.

1.2.3. Движение электрона в поперечном электрическом поле

Поперечным электрическим полем называется поле, линии напряженности которого перпендикулярны вектору начальной скорости электрона.

На рис. 1.6 приведена схема движения электрона в поперечном электрическом поле.

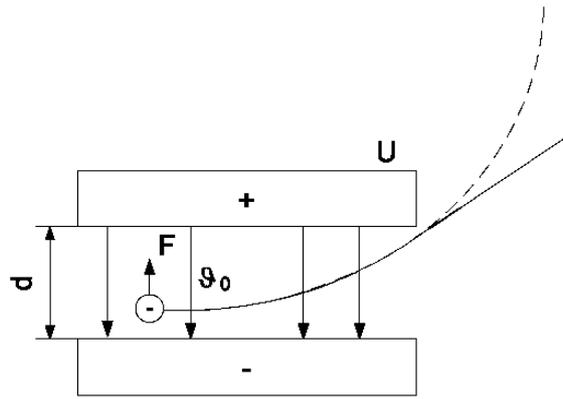


Рис. 1.6. Движение электрона в поперечном электрическом поле

За счет действия силы P возникает вертикальная составляющая скорости электрона, которая будет все время увеличиваться. Начальная скорость v_0 остается постоянной, в результате чего траектория движения электрона будет представлять собой параболу. При вылете электрона за пределы действия поля он будет двигаться по прямой.

1.2.4. Движение электрона в магнитных полях

$F = B \cdot e \cdot v_0 \cdot \sin(\alpha)$ – сила Лоренца.

При $\alpha = 90^\circ$ получим $\sin(\alpha) = 1$.

При $\alpha = 90^\circ$ траектория будет представлять собой дугу окружности.

На рис. 1.7 даны пояснения к движению электрона в поперечном магнитном поле.

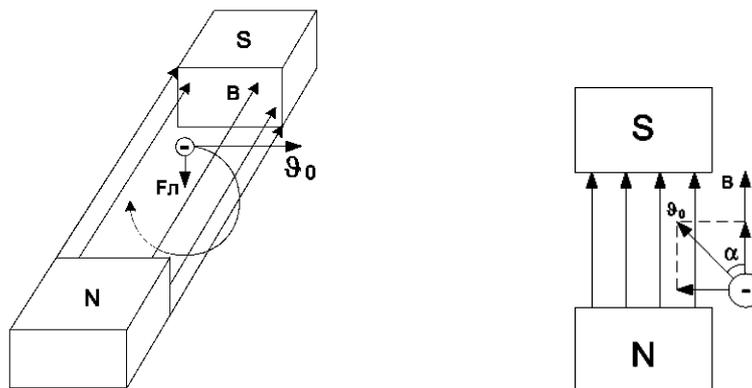


Рис. 1.7. Пояснения к движению электрона в поперечном магнитном поле

Когда $\alpha \neq 90^\circ$, вектор скорости электрона можно разложить на две составляющие – поперечную и продольную относительно направления

магнитных силовых линий. Под действием поперечной составляющей электрон будет двигаться по окружности, а под действием продольной составляющей – поступательно. В результате траектория будет представлять собой спираль.

1.2.5. Физические основы полупроводниковых материалов. Зонная энергетическая диаграмма

К полупроводникам относятся твердые тела, которые по своим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

У полупроводников удельное сопротивление при комнатной температуре изменяется в широких пределах, от 10^{-4} до 10^{10} Ом·см. У металлов удельное сопротивление меньше 10^{-4} Ом·см. К диэлектрикам относятся твердые тела, у которых удельное сопротивление больше 10^{10} Ом·см.

Отличительной особенностью полупроводников является сильная зависимость удельного сопротивления от внешних факторов: температуры, концентрации примесей, действия света и ионизирующих излучений.

Количество веществ, обладающих полупроводниковыми свойствами, превышает количество металлов и диэлектриков. Для создания современных полупроводниковых приборов в качестве исходного материала применяются элементарные полупроводники: германий Ge, кремний Si, селен Se, теллур Te; соединения $A^{III}B^V$ (A^{III} – элементы третьей группы таблицы Менделеева, B^V – элементы пятой группы): арсенид галлия GaAs, арсенид индия InAs, фосфид галлия GaP, карбид кремния SiC.

Каждый электрон, входящий в состав атома, обладает определенной энергией или занимает определенный энергетический уровень. Структуры атомов различных элементов имеют оболочки, полностью заполненные электронами (внутренние) и не заполненные (внешние).

Электроны внешней оболочки атома называются *валентными*. Взаимное притяжение атомов осуществляется за счет общей пары валентных электронов (ковалентной связи), вращающихся по одной орбите вокруг этих атомов. Валентные электроны как наиболее удаленные от ядра имеют с ним наиболее слабую связь и поэтому под воздействием электрического поля, теплоты, света и других причин могут отделяться от атома или молекулы и становиться свободными.

Процесс отрыва и удаления одного или нескольких электронов от атома или молекулы называется *ионизацией*.

Электроны в атоме обладают только вполне определенными значениями энергии, составляющими совокупность дискретных уровней энер-

гии атома. В твердом теле при образовании кристаллической решетки благодаря взаимодействию атомов энергетические уровни расщепляются и образуют энергетические зоны, состоящие из отдельных, близко расположенных по энергии уровней, число которых соответствует числу однородных атомов в данном теле. Совокупность уровней, на каждом из которых могут находиться электроны, называют *разрешенной* зоной.

В энергетическом спектре твердого тела можно выделить три зоны: заполненную (разрешенную), запрещенную и проводимости.

Разрешенная зона характеризуется тем, что все энергетические уровни валентных электронов при температуре 0 К заполнены ими. Верхнюю заполненную зону называют валентной. Зона *проводимости* характеризуется наличием электронов, обладающих энергией, которая позволяет им освободиться от связи с атомами и передвигаться внутри твердого тела под действием внешнего воздействия (например, электрического поля).

Запрещенная зона характеризуется тем, что в ее пределах нет энергетических уровней, на которых могли бы находиться электроны даже в идеальном кристалле.

Ширина запрещенной зоны для большинства полупроводников составляет 0,1...3 эВ, а у полупроводников, предназначенных для создания высокотемпературных приборов – 6 эВ. Для германия эта величина равна 0,72 эВ, для кремния – 1,12, для арсенида галлия – 1,4, для карбида кремния – 2,3...3,1, для фосфида галлия – 2,2 эВ.

Если ширина запрещенной зоны $\Delta W_3 > 6$ эВ, то при обычных условиях электроны практически не попадают в зону проводимости, в связи с чем такое вещество не проводит электрического тока и называется диэлектриком. У металлов и их сплавов запрещенная зона отсутствует, так как у них зона проводимости и валентная зона перекрываются. Такие вещества обладают хорошей проводимостью и называются проводниками. В полупроводниках при температуре, отличной от нуля, часть электронов обладает энергией, достаточной для перехода в зону проводимости. Электроны в зоне проводимости становятся свободными, их концентрация в собственном полупроводнике обозначается n_i .

Уход электрона из валентной зоны приводит к разрыву ковалентной связи и образованию в этой зоне незаполненного (свободного) энергетического уровня (положительного заряда), называемого *дыркой*. Концентрация дырок в собственном полупроводнике обозначается p_i . Валентные электроны соседних атомов под воздействием электрического поля могут переходить на свободные уровни, создавая дырки в другом месте. При

этом движение электронов можно рассматривать и как движение положительных зарядов – дырок.

У абсолютно чистого и однородного полупроводника (концентрация примесей настолько мала, что не оказывает существенного влияния на удельную проводимость полупроводника) при температуре, отличной от 0 К, образуются свободные электроны и дырки. Процесс образования пар электрон – дырка называется *генерацией*. После своего возникновения дырка под действием тепловой энергии совершает хаотическое движение в валентной зоне так же, как электрон в зоне проводимости. При этом возможен процесс захвата электронов зоны проводимости дырками валентной зоны. Разорванные ковалентные связи восстанавливаются, а носители заряда – электрон и дырка – исчезают. Процесс исчезновения пар электрон – дырка называется *рекомбинацией*. Он сопровождается выделением энергии, которая идет на нагрев кристаллической решетки и частично излучается во внешнюю среду.

Промежуток времени с момента генерации носителя до его исчезновения (рекомбинации) называется *временем жизни* носителя τ , а расстояние, пройденное носителем заряда за время жизни, – *диффузионной длиной* L . Более строго диффузионная длина определяется как расстояние, на котором концентрация носителей уменьшается в e раз ($e = 2,7$).

У проводников большое количество свободных электронов, у диэлектриков валентные электроны удерживаются ковалентными связями, у полупроводников структура как у диэлектриков, но ковалентные связи значительно слабее. Достаточно сравнительно небольшого количества энергии, получаемой из внешней среды (температура, освещенность, сильное электрическое поле), чтобы электроны полупроводника разорвали ковалентные связи и стали свободными.

- Диапазон энергий, в котором лежит энергия электрона, удерживаемого ковалентной связью, называется зоной валентности, или валентной зоной.

- Диапазон энергий, в котором лежит энергия электрона, разорвавшего ковалентную связь и ставшего свободным, называется зоной проводимости.

- Графическое изображение этих энергетических зон называется зонной энергетической диаграммой (рис. 1.8, 1.9).



Рис. 1.8. Зонная энергетическая диаграмма полупроводников

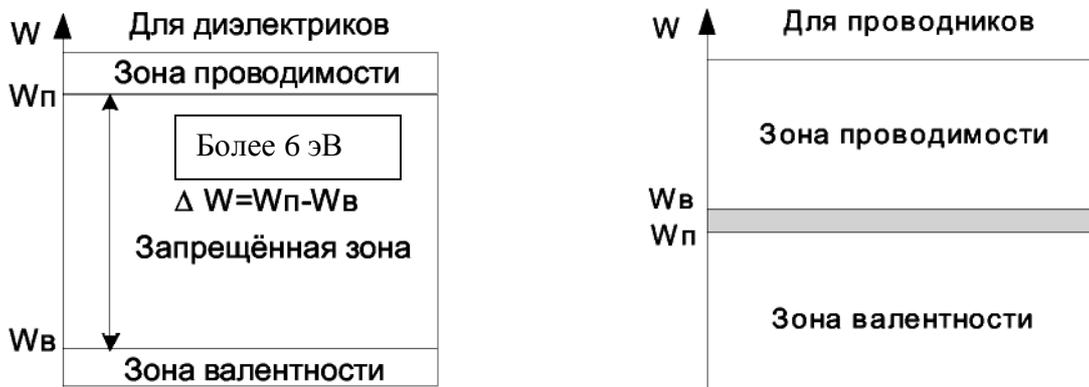


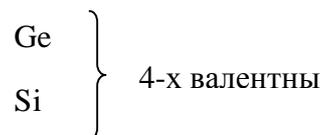
Рис. 1.9. Зонные энергетические диаграммы диэлектриков (слева) и проводников (справа)

Для того чтобы электрон смог разорвать ковалентную связь и стать свободным, он должен получить энергию, большую ширины запрещенной зоны.

1.3. Электропроводность полупроводников

1.3.1. Собственная проводимость полупроводников

Собственным полупроводником, или же полупроводником *i*-типа называется идеально химически чистый полупроводник с однородной кристаллической решеткой.



Кристаллическая структура кремния приведена на рис. 1.10.

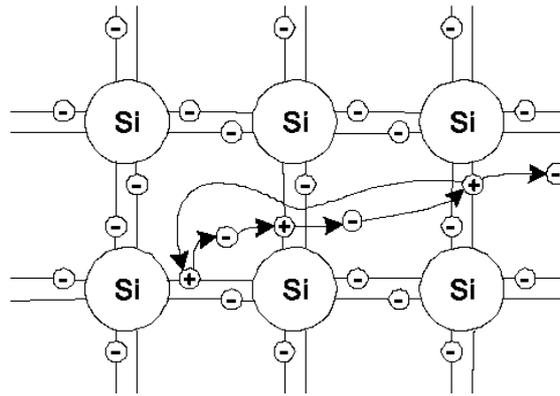


Рис. 1.10. Процесс образования и перемещения носителей в собственном полупроводнике

Если электрон получил энергию, большую ширины запрещенной зоны, он разрывает ковалентную связь и становится свободным. На его месте образуется вакансия, которая имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона, называемая дыркой. В полупроводнике i -типа концентрация электронов n_i равна концентрации дырок p_i . То есть $n_i = p_i$.

Как уже отмечалось ранее, процесс образования пары зарядов электрон – дырка называется генерацией заряда.

Свободный электрон может занимать место дырки, восстанавливая ковалентную связь и при этом излучая избыток энергии (рекомбинация). В процессе рекомбинации и генерации зарядов дырка как бы движется в обратную сторону от направления движения электронов, поэтому дырку принято считать подвижным положительным носителем заряда. Дырки и свободные электроны, образующиеся в результате генерации носителей заряда, называются собственными носителями заряда, а проводимость полупроводника за счет собственных носителей заряда называется собственной проводимостью проводника.

1.3.2. Примесная проводимость полупроводников

Так как у полупроводников i -типа проводимость существенно зависит от внешних условий, в полупроводниковых приборах применяются примесные полупроводники. Процесс введения примесей называют *легированием*, степень легирования определяет удельное сопротивление полупроводника, как правило, чем больше примесей, тем выше проводимость.

Если в полупроводник ввести пятивалентную примесь, то 4 валентных электрона восстанавливают ковалентные связи с атомами полупроводника, а пятый электрон остается свободным (рис. 1.11). За счет этого концентрация свободных электронов будет превышать концентрацию дырок.

- Примесь, за счет которой $n_i > p_i$, называется донорной примесью.
- Полупроводник, у которого $n_i > p_i$, называется полупроводником с электронным типом проводимости, или полупроводником n -типа.
- В полупроводнике n -типа электроны называются основными носителями заряда, а дырки – неосновными носителями заряда.

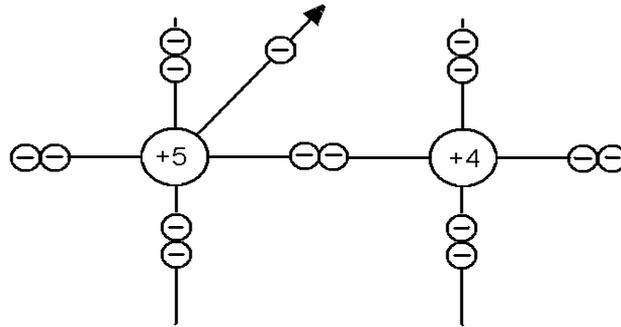


Рис. 1.11. Процесс образования полупроводника n -типа

При введении трехвалентной примеси три ее валентных электрона восстанавливают ковалентную связь с атомами полупроводника, а четвертая ковалентная связь оказывается невосстановленной (рис. 1.12), т.е. имеет место дырка. В результате этого концентрация дырок будет больше концентрации электронов.

- Примесь, при которой $p_i > n_i$, называется акцепторной примесью.
- Полупроводник, у которого $p_i > n_i$, называется полупроводником с дырочным типом проводимости, или полупроводником p -типа.
- В полупроводнике p -типа дырки называются основными носителями заряда, а электроны – неосновными носителями заряда.

Реальное количество примесей в полупроводнике составляет примерно 10^{15} 1/см^3 .

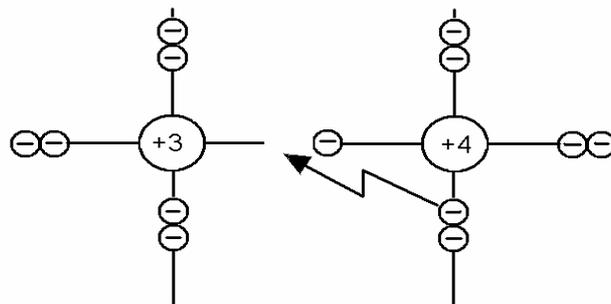


Рис. 1.12. Процесс образования полупроводника p -типа

1.3.3. Дрейфовый и диффузионный токи в полупроводниках

Дрейфовый ток в полупроводнике – это ток, возникающий за счет приложенного электрического поля. При этом электроны движутся навстречу линиям напряженности поля, а дырки – по направлению линий напряженности поля. Диффузионный ток – это ток, возникающий из-за неравномерной концентрации носителей заряда: $n_2 > n_1$, $n_2 - n_1 = \Delta n$ (рис. 1.13).

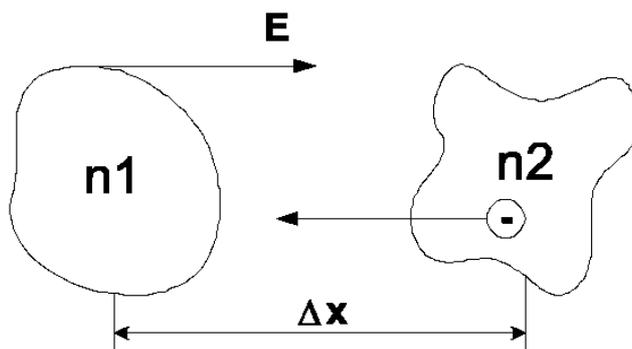


Рис. 1.13. Пояснение к образованию диффузионного тока

Отношение $\frac{\Delta n}{\Delta x}$ – это градиент неравномерности концентрации примесей. Величина диффузионного тока будет определяться градиентом неравномерности $\frac{\Delta n}{\Delta x}$ и будет составлять

$$I_{n.диф.} = e \cdot D_n \cdot \frac{\Delta n}{\Delta x},$$
$$I_{p.диф.} = -e \cdot D_p \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x},$$

где D_p и D_n – коэффициенты диффузии.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию электронных приборов.
2. Что такое типовой режим прибора и параметры режима? Какие виды параметров существуют?
3. На какой параметр прибора влияет превышение численного значения рекомендованного параметра?
4. Какие режимы называют статическими и динамическими?

5. Что такое характеристика (семейство характеристик) прибора? Как ее получить?
6. Что такое УГО и позиционное обозначение?
7. Расскажите о движении заряженных частиц в электрических полях. Приведите графические пояснения.
8. Как классифицируют материалы по степени электропроводности?
9. Что происходит с удельным сопротивлением большинства проводников, полупроводников и диэлектриков при увеличении их температуры?
10. Каким численным значением удельного сопротивления характеризуют проводники и полупроводники?
11. Что такое валентность, ионизация, генерация, рекомбинация, время жизни, диффузионная длина, легирование?
12. Что такое зонная энергетическая диаграмма, запрещенная зона? Как она отличается у различных материалов по проводимости?
13. Что такое донорная и акцепторная примеси? Как обозначают полупроводники с соответствующим типом проводимости?
14. Какие токи называют дрейфовыми и диффузионными?

Список использованных литературных источников

1. Электронные приборы : учеб. для вузов / В. Н. Дулин, Н. А. Аваев и др. ; под ред. Г. Г. Шишкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 496 с. : ил.
2. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы : справочник / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, В. Л. Прохоренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Беларусь, 1987. – 285 с.
3. Москатов, Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
4. Буланов, Ю. А. Основы электроники / Ю. А. Буланов, Г. И. Глаголев. – М. : «Высш. шк.», 1966. – 347 с. : ил.

РАЗДЕЛ 2. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ. P-N-ПЕРЕХОД. ПРОЧИЕ ВИДЫ ПЕРЕХОДОВ

Содержание раздела

Электрические параметры полупроводниковых материалов, их зависимость от внешних факторов (температура, давление, влажность, механические деформации, ионизирующее излучение, освещенность, напряженность электрических и магнитных полей) и применение их в практических целях. Основные эффекты и характеристики специальных приборов из полупроводников.

Физические процессы в электронно-дырочном переходе. Образование обедненного слоя, условие равновесия. Энергетическая диаграмма, распределение потенциала, напряженности электрического поля и объемного заряда в переходе. Высота потенциального барьера и ширина перехода. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) идеализированного электронно-дырочного перехода. Распределение неравновесных носителей. Тепловой ток, его зависимость от ширины запрещенной зоны, концентрации примесей и температуры. Математическая модель идеализированного p-n-перехода. Барьерная и диффузионная емкости перехода, их зависимость от приложенного напряжения. Пробой p-n-перехода.

Контакт металл – полупроводник. Выпрямляющий и невыпрямляющий (омический) контакты.

Методические указания

[1, с. 13 – 17, 24 – 40; 2, с. 124 – 126, 173 – 190; 3, с. 12 – 96]

Изучив разновидности и основные типы специальных полупроводниковых приборов, уметь объяснить принцип их работы и используемые эффекты. Научиться группировать важнейшие характеристики разных типов приборов и знать особенности применения их в практических целях при разработке устройств.

Необходимо уяснить, что электронно-дырочный переход является основой при создании различных полупроводниковых приборов. Уметь объяснить при помощи энергетических и потенциальных диаграмм явления, происходящие в p-n-переходе в равновесном состоянии и при подаче на него напряжения в прямом и обратном направлениях.

Знать контактную разность потенциалов в p-n-переходе, инжекцию и экстракцию носителей через переход, емкостные свойства и виды пробоев p-n-перехода, ВАХ p-n-перехода и параметры перехода: R_0 и $R_{диф}$.

Рекомендуемая литература

1. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск: Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
2. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие / К. С. Петров. – СПб. : Питер, 2003. – 512 с. : ил.
3. Электронные приборы : учеб. для вузов / В. Н. Дулин, Н. А. Аваев и др. ; под ред. Г. Г. Шишкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 496 с. : ил.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое время жизни неравновесных носителей заряда?
2. Что такое р-п-переход?
3. Чем объясняется изменение толщины р-п-перехода при включении внешнего источника?
4. Почему с ростом прямого напряжения ток через р-п-переход растет по экспоненциальному закону?
5. Чем отличается реальная ВАХ р-п-перехода от теоретической?
6. Какие виды пробоя р-п-перехода существуют?
7. Как зависит напряжение пробоя р-п-перехода от удельного сопротивления полупроводника?
8. Что такое зарядная емкость?
9. Что такое диффузионная емкость?
10. Нарисуйте эквивалентную схему р-п-перехода.

Тема 2. Специальные полупроводниковые приборы

Термины: *варистор, терморезистор, магниторезистор, тензоэффект, тензорезистор, аморфные полупроводники, термо-ЭДС, элемент Пельтье.*

Зависимость электрических параметров полупроводниковых материалов от внешних факторов (температура, давление, влажность, механические деформации, ионизирующее излучение, освещенность, напряженность электрических и магнитных полей) позволила создать группы специальных приборов для обнаружения и измерения разных величин. Наибольшее распространение при создании таких приборов получил эффект изменения удельного сопротивления при воздействии внешних факторов. Группа таких приборов названа специальными резисторами.

2.1. Варисторы

2.2. Терморезисторы

2.3. Магниторезисторы

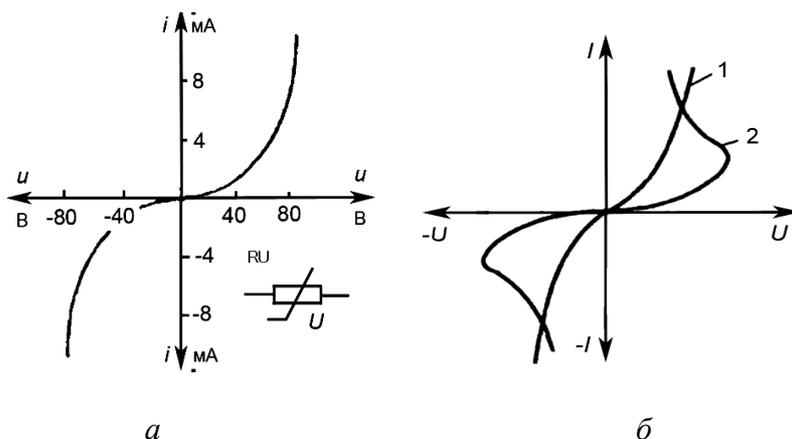
2.4. Приборы на аморфных полупроводниках

2.5. Тензоэлектрические полупроводниковые приборы

2.6. Термоэлектрические полупроводниковые приборы

2.1. Варисторы

Полупроводниковые резисторы, обладающие нелинейными свойствами при воздействии внешних напряжений, называются **варисторами**. Они еще называются нелинейными полупроводниковыми сопротивлениями (НПС). Основным материалом для варисторов служит порошок карбида кремния SiC с каким-либо связующим компонентом. Нелинейность сопротивления объясняется переменным контактом вследствие нагрева микроконтактов между зёрнами карбида кремния. Внешне варисторы оформляются в виде стержней или дисков. На рис. 2.1 приведена вольт-амперная характеристика варистора и его изображение на схемах.



в

Рис. 2.1. Вольт-амперная характеристика и условное графическое обозначение варистора:

а, б – характеристики варисторов: 1 – варистор; 2 – негистор;

в – внешний вид варисторов; г – характеристика, зарубежное УГО

и схема включения варистора в цепях защиты от перенапряжений (см. также с. 34)

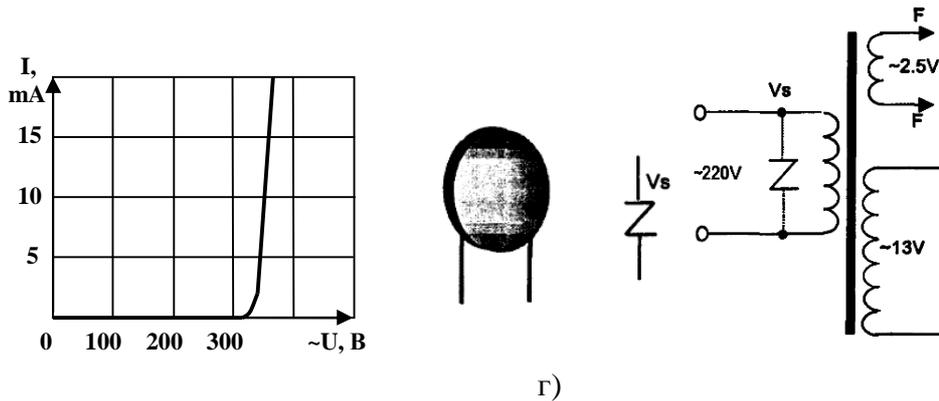


Рис. 2.1. Окончание

Варисторы можно использовать на постоянном и на переменном токе с частотой до нескольких килогерц. При более высоких частотах начинает сказываться собственная емкость варистора. Практическое применение варисторов довольно многообразно. Они используются для защиты от перенапряжений, в стабилизаторах и ограничителях напряжения, в различных схемах автоматики. На теле человека, типичная емкость которого 150 пФ, может накопиться заряд до 3 микрокулон. В соответствии с формулой $U = Q/C$ напряжение разряда может составить до 30 кВ, но обычно это 0,5 – 5,0 кВ. Большинство микроэлектронных изделий выходят из строя при воздействии импульса 2500 В. В то же время человек может даже не почувствовать статический разряд напряжением менее 3500 В. Энергию разряда можно рассчитать по формуле $W = 1/2 CU^2$. Стандарт Европейского экономического сообщества IEC1000-4-2 описывает требования устойчивости и методы испытаний для электронного оборудования, подвергнутого разряду статического электричества (ESD). Во время разряда статического электричества образуется ток до 45 А за время меньше чем 1нс (рис 2.2, а). Вторичным эффектом является образование высокого электрического и магнитного поля. Наиболее общий метод ESD защиты основывается на создании отводящего канала разрядного тока при превышении максимально допустимого напряжения и экранировании прибора от электромагнитных полей, создаваемых ESD. В качестве токоотводящих элементов ESD защиты могут использоваться импульсные стабилитроны, TVS (Transient Voltage Suppression) диоды и металлооксидные многослойные SMD варисторы (рис 2.2, б)

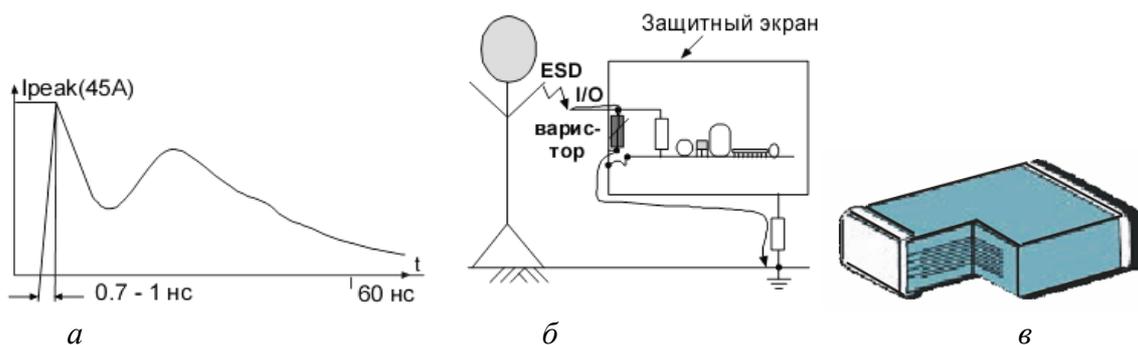


Рис 2.2. Процесс протекания тока (а), использование (б) и конструкция варистора в SMD корпусе (в)

Многослойные варисторы (MLV-multilayer varistors) (см. рис 2.2, в) успешно используются в широком спектре приложений в качестве компонентов подавления перенапряжений. Они стали наиболее популярными компонентами защиты от разряда статического электричества (ESD) в следующих областях:

- производство сотовых телефонов и аксессуаров к ним;
- автомобилестроение (подушки безопасности, бесконтактные ключи, авторадисистемы, системы ABS);
- порты настольных компьютеров и ноутбуков;
- видеомэагнитофоны, телевизионные установки, спутниковые приемники, настольные компьютерные системы;
- промышленное и торговое терминальное оборудование.

Например, в области производства сотовых телефонов многослойные варисторы можно считать уже стандартом в защите от ESD. Варисторы могут надежно защищать от разряда статического электричества следующие изделия:

- клавиатуры;
- разъемы для подключения факса и модема;
- соединители портативных батарейных источников питания (рис. 2.3);
- зарядные устройства;
- входы чувствительных интегральных схем и входы / выходы микропроцессоров.

Быстрое время срабатывания, высокая надежность, отличные пиковые электрические характеристики в широком диапазоне рабочей температуры при малых размерах (от 0603 до 2220) ставят многослойные варисторы на первое место при выборе элементов защиты от ESD. Кроме того,

имеются типы варисторов, специально разработанных для защиты линий телесвязи и автомобильных приложений. Дополнительно разработаны варисторы с определенными уровнями емкостей, которые могут использоваться как для ESD защиты, так и для обеспечения стандартов электромагнитной совместимости (ЭМС). Требуемое для ESD защиты время срабатывания (меньше 1 нс) достигается, с одной стороны, за счет используемой для изготовления варисторов керамики. С другой стороны, индуктивность выводов дисковых варисторов увеличивает это значение до нескольких наносекунд. Благодаря многослойной структуре варисторов SIOV-CN и их SMD исполнению достигается время срабатывания, меньше чем 500 пс. В то же время необходимо минимизировать индуктивности проводников при расположении варистора на печатной плате.

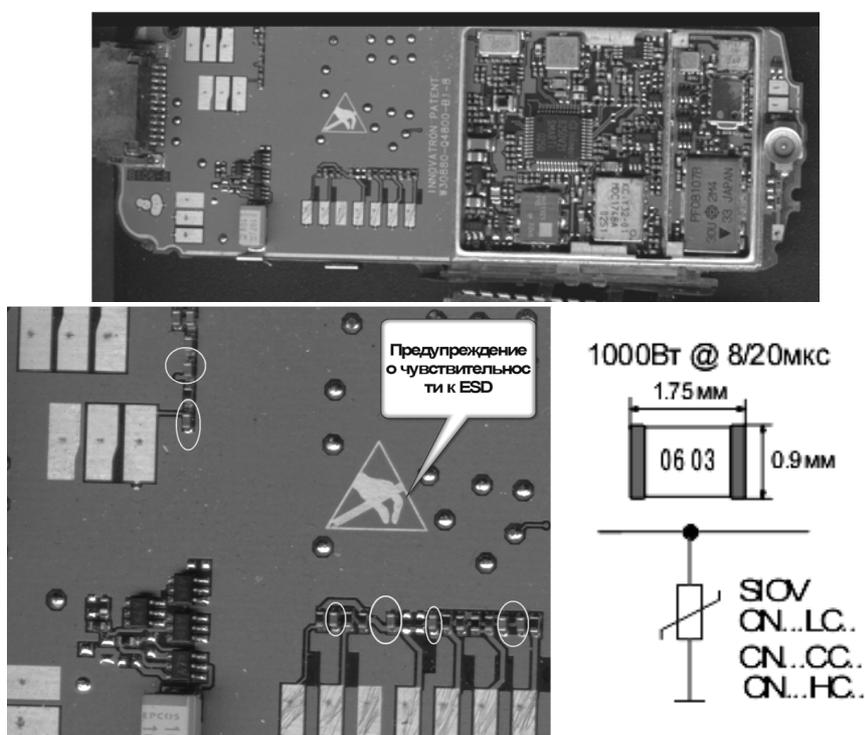


Рис. 2.3. Схема использования и применение варисторов в мобильном телефоне

Важнейшие параметры варисторов:

- классификационное напряжение (напряжение фиксации), В;
- пиковый ток, А;
- коэффициент нелинейности β – отношение сопротивления постоянному току к сопротивлению переменному току (обычно 3 – 6);
- максимальное допустимое напряжение (от десятков вольт до нескольких киловольт);

- номинальная мощность рассеяния (1 – 3 Вт);
- пиковая мощность (тысячи ватт);
- температурный коэффициент сопротивления (в среднем $-5 \cdot 10^{-3} K^{-1}$);
- предельная максимальная рабочая температура (60 – 70 °С).

2.2. Терморезисторы

Терморезисторы представляют собой полупроводниковые резисторы, у которых сопротивление сильно зависит от температуры. Их еще называют термосопротивлениями или термисторами. Чаще всего изготавливаются из окислов металлов.

На рис. 2.4 приведены УГО терморезисторов (термисторов) и внешний вид.

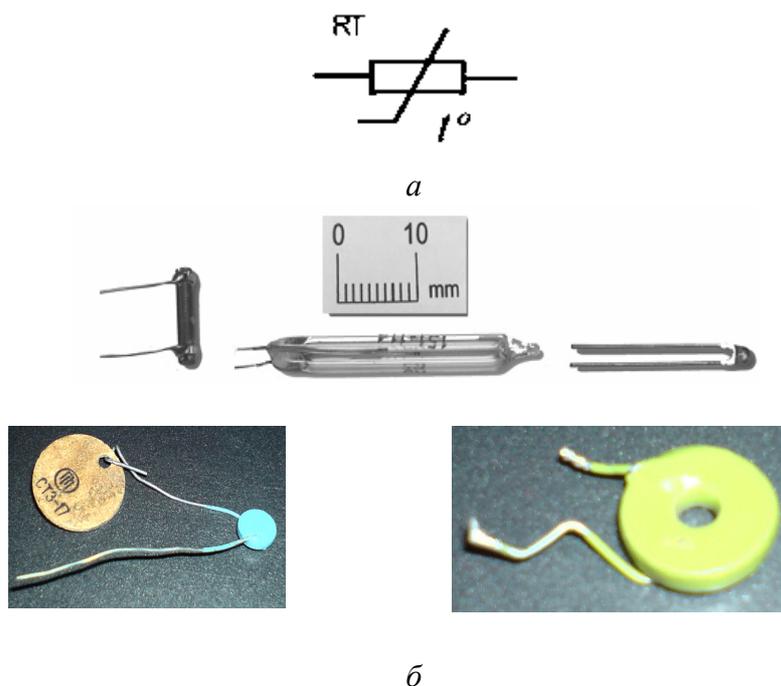


Рис 2.4. УГО терморезисторов (термистора) (а), внешний вид (б)

Сопротивление в нормальных условиях составляет порядка нескольких килоом. Кстати, маркировка сопротивления на корпусе терморезисторов указывается при 25 °С. Конструктивно изготавливаются в виде стержней, пластин, дисков, шайб или бусинок.

Терморезисторы применяются в качестве датчиков температуры и нелинейных резисторов в различных устройствах автоматики. Специальные малогабаритные сдвоенные терморезисторы, называемые болометрами, применяются для измерения лучистой энергии. Некоторые терморезисторы выпускаются с косвенным подогревом, т.е. имеют подогреватель в виде проволоочки, через которую пропускают ток.

Терморезисторы (термисторы) с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) представляют собой термически чувствительные кремниевые резисторы, у которых сопротивление уменьшается при увеличении температуры. Отрицательный ТКС термисторов составляет $-2 \dots -6 \text{ \%}/\text{K}$, что примерно в 10 раз больше, чем у металлов.

Изменение сопротивления термисторов с отрицательным ТКС может происходить из-за изменения температуры окружающей среды или за счет внутреннего саморазогрева при протекании через прибор тока, что необходимо учитывать при практическом применении.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕРМИСТОРОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ТКС

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Зависимость сопротивления термисторов от температуры в интервале температур порядка нескольких десятков градусов аппроксимируется экспоненциальной зависимостью:

$$R_T = R_N \cdot e^{\left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right]},$$

где R_T – сопротивление термистора в Ом при температуре T в К; R_N – сопротивление термистора в Ом при температуре T_N в К; β – постоянный коэффициент, зависящий от свойств материала термисторов.

Данная зависимость – приближенная, так как величина β в действительности зависит от температуры. На практике используются стандартизованные табличные R/T -характеристики, приведенные далее. Для некоторых типов резисторов, используемых при прецизионных измерениях, зависимости приведены с дискретностью в 1 градус.

Следует отметить, что R/T -характеристики в справочных таблицах приводятся относительно температуры $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (величина R_T/R_{25}). Руководствуясь данными таких таблиц для конкретной температуры использования, можно определить сопротивление термистора, допуск сопротивления, допуск температуры (при измерениях или регулировании).

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ β

Величина β , как было сказано выше, зависит от температуры. Поэтому необходимо знать температуру определения β . В справочных данных приводится величина $\beta_{25/100}$, определяемая по результатам измерений значений сопротивления при температурах $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_1) и $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_2) по формуле:

$$\beta = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} = 1483 \cdot \ln \frac{R_{25}}{R_{100}}.$$

При этом R_{25} и R_{100} – значения сопротивлений термистора, измеренные при температурах 25 °С и 100 °С.

Значения коэффициента β для большинства термисторов с отрицательным ТКС лежат в пределах 2000...6000 К. Рис. 2.5 иллюстрирует зависимость R/T-характеристики от величины β .

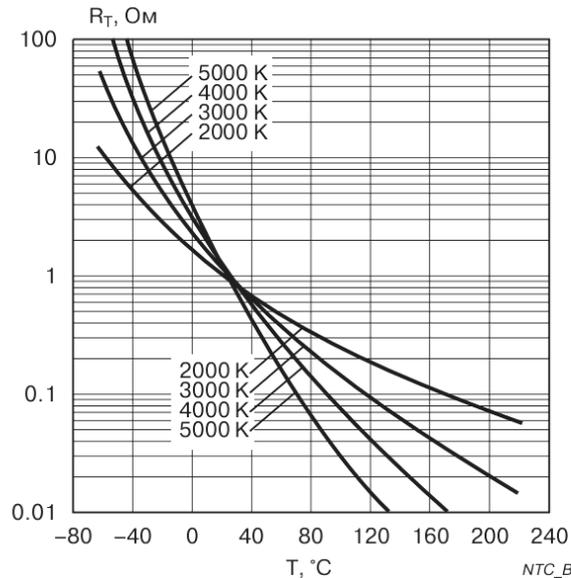


Рис 2.5. Зависимость R от T при разных β

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ α

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) или α характеризует относительное изменение сопротивления при изменении температуры на один градус. α – отношение первой производной сопротивления термистора по температуре к его сопротивлению при заданной температуре.

Для вычислений в малых интервалах температур можно использовать следующие формулы аппроксимации:

$$\alpha = \frac{1}{K} \cdot \frac{dR}{dT}; \Delta T = \frac{1}{\alpha \cdot R} \cdot \Delta R; \Delta R = \alpha \cdot R \cdot \Delta T.$$

На практике используются стандартизованные табличные R/T-характеристики. В этих таблицах значения α для термисторов приводятся с дискретностью 5 °С. Для расчетов при температурах, не вошедших в таблицы, необходимо воспользоваться формулами аппроксимации.

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для электрически нагруженных термисторов с учетом эффекта саморазогрева применимо следующее соотношение:

$$P = V \cdot I = \frac{dH}{dt} = \delta_{TH} \cdot (T - T_A) + C_{TH} \cdot \frac{dT}{dt},$$

где P – приложенная мощность; V – мгновенное значение напряжения на термисторе; I – мгновенное значение тока через термистор; dH/dt – изменение накопленной тепловой энергии с изменением времени; δ_{TH} – коэффициент рассеяния термистора; T – мгновенная температура термистора; T_A – температура окружающей среды; C_{TH} – коэффициент энергетической чувствительности термистора; dT/dt – изменение температуры с изменением времени.

При приложении к термистору постоянной электрической мощности его температура сначала немного увеличивается, затем уменьшается.

Эти параметрические уравнения описывают вольт-амперные характеристики температурно-зависимых термисторов с отрицательным ТКС. На рис. 2.6 приведена типовая вольт-амперная характеристика термистора.

На начальном участке характеристики соблюдается линейная зависимость, так как при малых токах выделяющаяся мощность недостаточна для существенного изменения температуры термистора, сопротивление не меняется, поэтому соблюдается закон Ома. При увеличении тока нагрев становится заметным, сопротивление термистора начинает уменьшаться и крутизна характеристики снижается. Достигнув некоторого максимального значения, падение напряжения на термисторе при дальнейшем росте тока начинает уменьшаться.

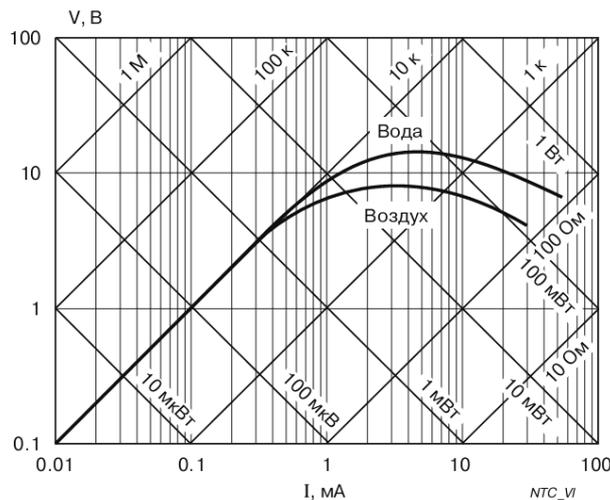


Рис 2.6. ВАХ термистора

МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ РАССЕЯНИЯ

P_{\max} – наибольшая мощность, которую может рассеивать термистор, не вызывая необратимых изменений параметров. Максимальную мощность можно выразить через коэффициент рассеяния:

$$P_{\max} = \delta_{TH} \cdot (T_{\max} - T_A).$$

КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ δ_{TH}

Коэффициент рассеяния равен мощности, рассеиваемой на термисторе, при которой его температура повышается на 1 °С:

$$\delta_{TH} = \frac{dP}{dT}.$$

ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ОХЛАЖДЕНИЯ t_C

Постоянная времени t_C в значительной степени зависит от конструкции термистора. Она равна времени, в течение которого температура электрически ненагруженного термистора изменится на 63,2 % от разности температуры термистора и температуры окружающей среды. Для определения t_C резистор внутренне разогревается до температуры 85 °С и измеряется время, за которое термистор охладится до 47,1 °С при окружающей температуре 25 °С. Чем меньше размер прибора, тем меньше время охлаждения.

ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ t_A

Постоянная времени t_A равна времени, в течение которого температура электрически ненагруженного термистора, помещенного в среду с температурой 85 °С, изменится от 25 °С до 62,9 °С. Для определения величины постоянной t_A определяется сопротивление термистора при минимальной мощности (для исключения эффекта саморазогрева) при температурах 25 °С и 62,9 °С. Термистор помещается в жидкость с температурой $25 \pm 0,1$ °С, измеряется его сопротивление для подтверждения достижения температуры жидкости, затем его сразу помещают в жидкость с температурой $85 \pm 0,1$ °С и, определяя сопротивление при минимальной мощности, измеряют время, за которое его температура достигнет 62,9 °С. Полученное в результате время есть постоянная времени, характеризующая тепловую инерционность термистора.

Применение термисторов

Термисторы с отрицательным ТКС могут быть широко использованы для температурных измерений.

В бытовой электронике – в рефрижераторах и морозильниках, стиральных машинах, электрических плитах, фенах и др. В автомобильной электронике – для измерения температуры охлаждения воды или масла, для слежения за температурой выхлопных газов, нагрева цилиндров и тормозной системы, для контроля температуры в пассажирском отсеке и др.

В системах нагрева и кондиционирования – в распределении затрат на нагрев, для слежения за температурой в помещениях, за температурой форсунок, выхлопных газов, в качестве наружных датчиков и др.

В промышленной электронике – для температурной стабилизации лазерных диодов и фотоэлементов, компенсации рабочей точки термоэлемента и др.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ (РЕЖИМ САМОРАЗОГРЕВА)

Ограничение токов включения

Импульсные источники питания, электрические моторы и трансформаторы имеют чрезмерно высокие токи при включении, которые могут привести к выходу этих устройств из строя. Применяя термисторы с отрицательным ТКС, можно значительно снизить токи включения, для чего следует подсоединить последовательно с нагрузкой термистор.

Термисторы, специально разработанные для такого применения, имеют достаточно высокое сопротивление в холодном состоянии. При протекании тока термистор разогревается и его сопротивление уменьшается в 10...50 раз, снижая потери мощности.

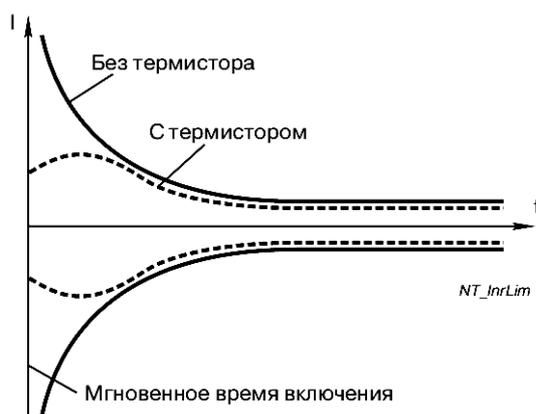


Рис 2.7. Форма тока (вверху) и напряжения (внизу) на нагрузке

Температурная компенсация

Все полупроводники имеют относительно высокие температурные коэффициенты. Поэтому термисторы с отрицательным ТКС применяются для компенсации неблагоприятных реакций на изменения температуры, тем самым термисторы позволяют эффективно управлять токами включе-

ния посредством фиксирующего резистора без потерь мощности и не учитывать влияние малого сопротивления резистора в процессе дальнейшей работы.

Ограничение тока включения используется в промышленной электронике и инженерном оборудовании. Например, во флуоресцентных, прожекторных и галогенных лампах, для ограничения частоты вращения кухонных комбайнов, обеспечения мягкого пуска моторов и импульсных источников питания и т.д.

Параллельное и последовательное включение

Термисторы для ограничения тока всегда включаются последовательно. Если для ограничения тока недостаточно одного термистора, то два или более термисторных элемента включаются последовательно. Параллельное включение нескольких термисторов недопустимо, так как невозможно правильно распределить нагрузку. Термисторы, пропускающие большой ток, могут значительно разогреться и выйти из строя, поэтому параллельное включение термисторов возможно, если они не разогреваются.

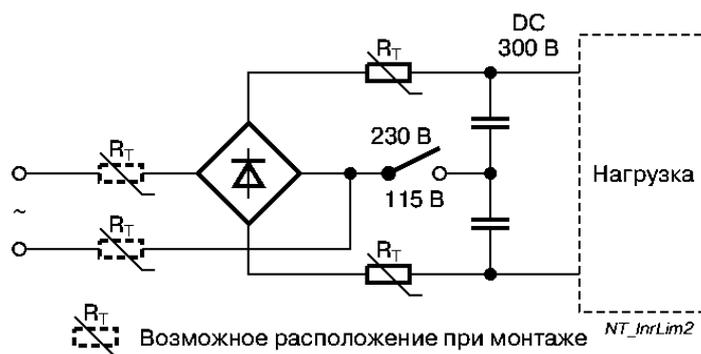


Рис. 2.8. Схема включения термисторов в защитную цепь по питанию

Позисторы – это полупроводниковые резисторы, чувствительные к изменению температуры. Сопротивление позисторов резко (на несколько порядков) возрастает после достижения определенной (опорной) температуры. Позисторы изготавливаются легированием поликристаллической керамики на основе титаната бария ($BaTiO_3$). Керамика, как известно, является хорошим изолятором с высоким сопротивлением. Полупроводящие свойства или низкое сопротивление достигаются легированием керамики примесями редкоземельных элементов. При увеличении концентрации примесей изменяется структура материала, происходит разукрупнение кристаллов и увеличение удельного сопротивления. Резкое увеличение сопротивления титаната бария в узком диапазоне температур происходит из-за фазового превращения в диапазоне температур выше точки Кюри. Увеличивая содержание примесей, можно смещать точку Кюри в сторону более низких температур и влиять на параметры позисторов.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЗИСТОРОВ

Протекающий через позистор ток приводит к разогреву прибора и увеличению его температуры выше температуры окружающей среды. Эффект саморазогрева позистора необходимо учитывать при практическом применении. Характеристики позисторов, приведенные ниже, различаются для электрически нагруженных и электрически ненагруженных позисторов. Для электрически ненагруженных позисторов вводится термин «характеристики при нулевой мощности».

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ НЕНАГРУЖЕННЫЕ ПОЗИСТОРЫ

Температурная зависимость сопротивления

Сопротивление при нулевой мощности R_T – это сопротивление, измеренное при данной температуре T и при такой малой нагрузке, что дальнейшее ее уменьшение практически не влияет на величину сопротивления.

Тестовое напряжение различается для конкретных типов позисторов (обычно $\leq 1,5$ В).

На рис. 2.9 представлена типовая зависимость сопротивления при нулевой мощности от температуры. Из-за резкого изменения сопротивления позисторов (в десятки раз) для сопротивления используется логарифмическая шкала (ордината), а для температуры – линейная (абсцисса).

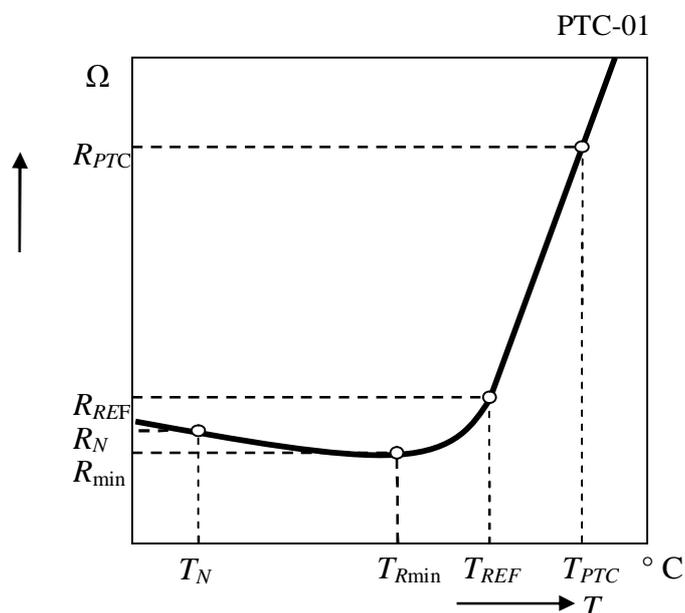


Рис. 2.9. Зависимость сопротивления позистора от температуры: R_N – номинальное сопротивление (сопротивление при температуре $T_N = 25^{\circ}\text{C}$); R_{min} – минимальное сопротивление (сопротивление при температуре T_{Rmin}); T_{Rmin} – температура, при которой сопротивление минимальное (температурный коэффициент сопротивления α становится положительным); R_{REF} – опорное сопротивление (сопротивление при температуре T_{REF}); T_{REF} – опорная температура (сопротивление резко возрастает); R_{PTC} – сопротивление в области резкого увеличения T_{PTC} ; T_{PTC} – температура, при которой гарантируется величина R_{PTC}

Номинальное сопротивление R_N

Номинальное сопротивление R_N – это величина сопротивления при температуре T_N . Позисторы классифицируются по величине этого сопротивления. Если специально не указано, то температура T_N равна 25 °С.

Минимальное сопротивление R_{\min}

Начало температурного диапазона с положительным ТКС характеризуется температурой $T_{R_{\min}}$. Величина сопротивления позистора при этой температуре обозначается R_{\min} . Это наименьшее сопротивление позистора при минимальной мощности.

Опорное сопротивление R_{REF} при опорной температуре T_{REF}

Начало области резкого увеличения сопротивления обозначается температурой T_{REF} . Этой температуре приблизительно соответствует ферроэлектрическая точка Кюри. Для позисторов R_{REF} вычисляется по формуле:

$$R_{REF} = 2 R_{\min}.$$

Сопротивление R_{PTC} при температуре T_{PTC}

Эта величина характеризует типовое сопротивление позистора в области резкого изменения характеристики: $R_{PTC} = f(T_{PTC})$. Для конкретных типов позисторов это минимальная величина.

Температурный коэффициент сопротивления α

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) или α характеризует относительное изменение сопротивления при изменении температуры на один градус. α – отношение первой производной сопротивления термистора по температуре к его сопротивлению при заданной температуре:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{d \ln R}{dT} = \ln 10 \cdot \frac{d \lg R}{dT}.$$

В области резкого увеличения сопротивления между R_{REF} и R_{PTC} ТКС приблизительно постоянен. Тогда выполняется следующее соотношение:

$$R_{REF} \leq R_1, R_2 \leq R_{PTC} \rightarrow \alpha = \frac{\ln(R_2/R_1)}{T_2 - T_1}.$$

В пределах этого температурного диапазона выполняется обратная зависимость:

$$R_2 = R_1 \cdot e^{[\alpha \cdot (T_2 - T_1)]}.$$

Температурный коэффициент α можно использовать для практического применения только в области резкого увеличения сопротивления, когда выполняется экспоненциальная зависимость.

Номинальная пороговая температура

Для некоторых типов позисторов вводятся величины T_{NAT} и R_{NAT} вместо T_{REF} и R_{REF} . Температура, относящаяся к участку с резким увеличением значения сопротивления, обозначается как номинальная пороговая температура T_{NAT} .

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫЕ ПОЗИСТОРЫ

Если через позистор протекает ток, то прибор разогревается вследствие рассеяния мощности. Эффект саморазогрева зависит не только от приложенной нагрузки, но и от коэффициента рассеяния позистора δ и его геометрических размеров. Эффект саморазогрева позистора в результате электрической нагрузки можно описать аналогичной зависимостью для термисторов.

Температура поверхности T_{SURF}

T_{SURF} – температура, которой достигает поверхность позистора при работе его при оговоренном напряжении в состоянии теплового равновесия с окружающей средой за длительный период времени. Обычно эта величина указывается для температуры окружающей среды $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Вольт-амперные характеристики

Свойства электрически нагруженного позистора лучше описываются вольт-амперными характеристиками, нежели R/T -характеристиками. Ниже приводятся зависимости тока от напряжения в состоянии теплового равновесия при температуре $25\text{ }^\circ\text{C}$ в спокойном воздухе, если не указано другой температуры.

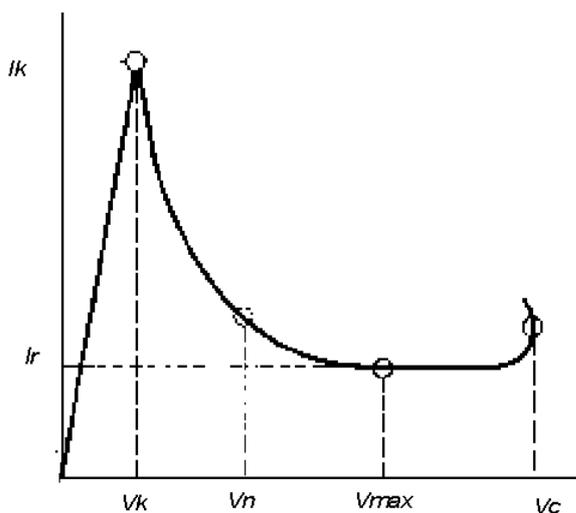


Рис 2.10. ВАХ позистора:

I_K – ток ограничения при напряжении V_K ; I_R – ток насыщения при напряжении V_{max} ;
 V_{max} – максимальное рабочее напряжение; V_N – номинальное напряжение ($V_N < V_{max}$);
 V_C – напряжение пробоя ($V_C > V_{max}$)

Ток ограничения I_K

Ток ограничения I_K – ток, протекающий через позистор при приложенном напряжении V_K , при этом приложенная мощность достаточно высока, так что достигается температура выше опорной температуры T_{REF} .

Номинальный ток I_N и ток переключения I_S

Допуск на механические и электрические компоненты зависит от допусков на ток ограничения. Зная граничные допуски, можно подобрать соответствующий позистор. На практике необходимо знать не только гарантированный ток ограничения, но и ток, при котором позистор находится в режиме малого сопротивления, и ток, при котором позистор переходит в режим высокого сопротивления.

Номинальный ток I_N – при токах $\leq I_N$ позистор находится в режиме малого сопротивления.

Ток переключения I_S – при токах $\geq I_S$ позистор находится в режиме высокого сопротивления.

Обычно эти токи приводятся для температуры окружающей среды 25 °С.

Ток насыщения I_R

Ток насыщения I_R – это ток через позистор при рабочем напряжении V_{max} и тепловом равновесии (установившийся режим).

Импульсная прочность V_P

Импульсная прочность V_P определяется на основе приложения стандартных импульсов напряжения по стандарту IEC 60-2, VDE 0433 при времени нарастания импульса 8 мкс и времени полуспада импульса 20 мкс.

Постоянная времени охлаждения t_C

Постоянная времени охлаждения t_C равна времени, в течение которого температура электрически ненагруженного позистора изменится на 63,2 % от разности температуры позистора и температуры окружающей среды.

Постоянная времени t_A

Постоянная времени t_A равна времени, в течение которого температура электрически ненагруженного термистора изменится от начальной температуры (25 °С) до опорной температуры T_{REF} или номинальной температуры T_{NAT} при внешнем разогреве.

Время отклика t_R

Время отклика t_R – время, за которое позистор достигнет заданного состояния при изменении приложенной мощности.

Время установления t_E

Время установления t_E – время, за которое позистор достигнет рабочего состояния после приложения напряжения (только для датчиков уровня).

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЗИСТОРОВ

Позисторы различаются:

1. По функциям:

а) позисторы прямого разогрева – мощные приборы, тепло выделяется на самом позисторе; применяются там, где электрическое сопротивление определяется током, текущим через позистор;

б) позисторы косвенного подогрева – температурные датчики, разогрев осуществляется извне; применяются, когда сопротивление позистора определяется температурой окружающей среды.

2. По применению – табл. 2.1.

Таблица 2.1

Применение позисторов

Мощные позисторы		Датчики	
Предохранители	Защита от коротких замыканий и ограничение тока	Датчики температуры	Тепловая защита
			Измерение и контроль
Импульсные схемы	Пуск моторов	Пороговые датчики температуры	Защита моторов
	Размагничивание		Защита от перегрева
	Временные задержки		
Нагреватели	Маломощные нагреватели		
	Темостаты		
Датчики уровня	Пороговые индикаторы		

2.3. Магниторезисторы

Магниторезисторы – это электронные компоненты, действие которых основано на явлении изменения электрического сопротивления полупроводника (или металла) при воздействии на него магнитного поля. Эти компоненты ранее выпускали только зарубежные фирмы, такие как Matsushita, Hitachi, Panasonic (Япония), Robert Bosch, Siemens (Германия), RTC (Франция), Samsung (Южная Корея) и др.

Магниторезисторы находят широкое применение в качестве чувствительных элементов магнитных датчиков электрического тока и напря-

жения, скорости и направления вращения, угла поворота и положения, линейного перемещения, расхода жидкости и газа и т.п. Их используют в бесконтактной клавиатуре и устройствах считывания информации ЭВМ, бесконтактных переменных резисторах, вентильных электродвигателях, электронных модуляторах и преобразователях, измерителях магнитного поля, металлоискателях, электронных навигаторах, в бытовой электронной аппаратуре, системах автоматического управления, определителях подлинности банкнот, электронных и электрифицированных игрушках и др.

Основные преимущества магниторезисторов по сравнению с другими преобразователями физических величин – это простота обеспечения практически идеальных механической, электрической, тепловой и других видов развязки измерительных и управляющих цепей от объектов контроля. Кроме того, магниторезисторам свойственны высокие быстродействие, чувствительность и надежность, малые энергопотребление и габариты, а также небольшая стоимость.

В настоящее время отечественные и зарубежные производители выпускают много типов магниторезисторов, отличающихся конструкцией и технологией изготовления магниточувствительного элемента и магнитной цепи. Особенно широка гамма зарубежных магниторезисторов.

Явление изменения электрического сопротивления полупроводникового материала при воздействии на него магнитного поля обнаружено известным английским физиком Томсоном еще в 1858 году. В дальнейшем оно получило наименование эффекта Гаусса, но практически применять его начали только во второй половине XX-го столетия.

Механизм изменения сопротивления очень сложен, так как является результатом одновременного действия большого числа составляющих, к тому же он различен для разных типов приборов, разной технологии и разных материалов. В общем виде магниторезистор представляет собой подложку с размещенным на ней магниточувствительным элементом (рис. 2.11, *а*). Подложка обеспечивает механическую прочность прибора. Элемент приклеен к подложке изоляционным лаком и защищен снаружи слоем лака. Для увеличения сопротивления магниторезистора элемент выполняют в форме меандра (см. рис. 2.11, *б*, *в*). На рис. 2.11, *г* схематически показано устройство магниторезистивного моста. Элементы, изображенные на рис. 2.11, *в* – *г*, предназначены для работы в устройствах с круговым перемещением источника магнитной индукции.

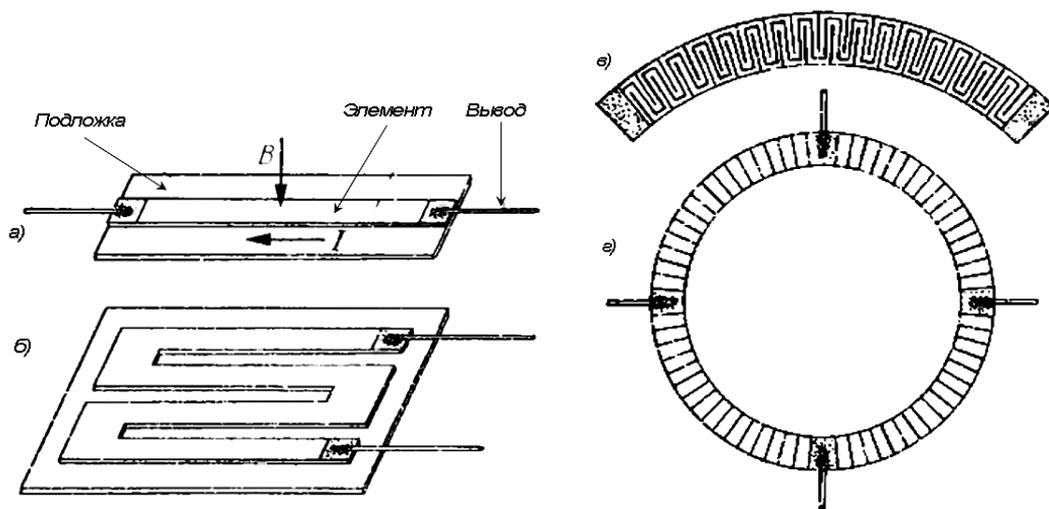


Рис. 2.11. Конструкции магниторезисторов

Наиболее широкое распространение сейчас получили две структурные разновидности магниторезисторов – монолитные и пленочные.

Монолитные изготавливают из полупроводниковых материалов, обладающих высокой подвижностью носителей заряда. К таким материалам относят антимонид индия (InSb) и его соединения, арсенид индия (InAs) и некоторые другие. Технология изготовления магниторезисторов также сложна и требует использования высокоточного современного оборудования. Для монолитных приборов она в общем случае представляет собой ряд операций по механической и химико-механической обработке – шлифование, полирование, травление, химическое полирование и т.д. – с целью получения из исходной заготовки толщиной 500...650 мкм изделия толщиной 10 мкм.

Для формирования «рисунка» магниточувствительного элемента широкое распространение получил метод электроэрозионной резки, а в более современных процессах – метод фотолитографии. Внешние выводы к элементу присоединяют микропайкой.

Сопротивление прибора зависит как от значения магнитной индукции воздействующего поля (рис. 2.12, а), так и от угла между вектором индукции и плоскостью элемента (см. рис. 2.12, б). Монолитные магниторезисторы увеличивают свое электрическое сопротивление при воздействии магнитного поля.

Основные параметры некоторых типов отечественных магниторезисторов с монолитным элементом приведены в табл. 2.2.

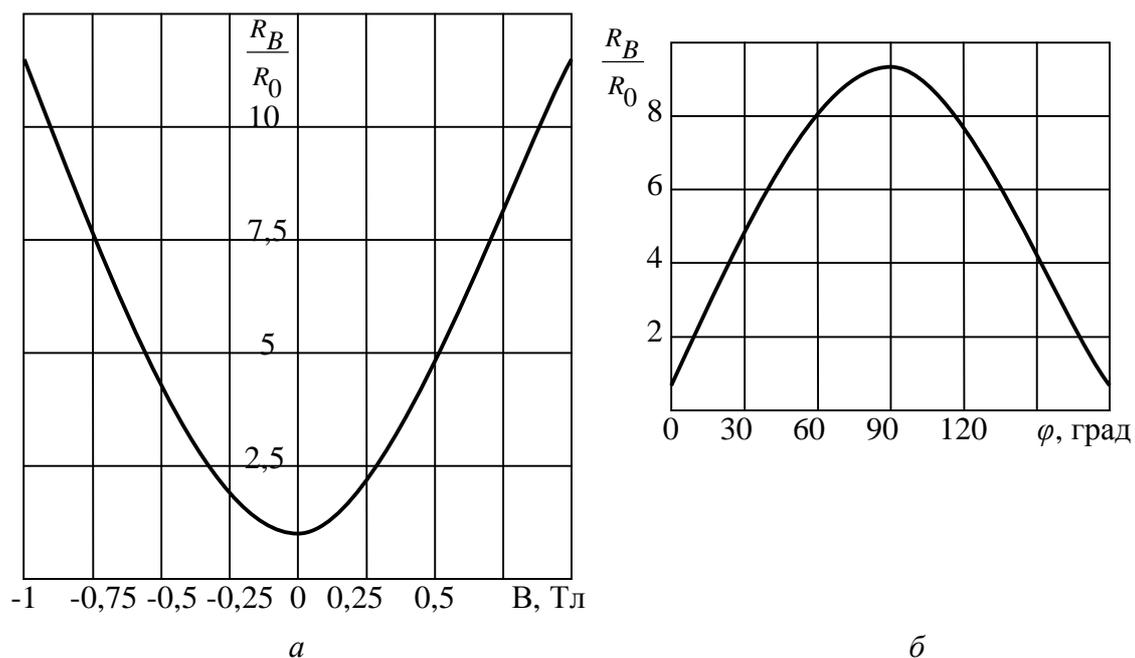


Рис. 2.12. Характеристики магниторезисторов

Таблица 2.2

Основные параметры некоторых типов отечественных магниторезисторов с монолитным элементом

Магниторезистор	Начальное сопротивление, Ом	Магниторезистивное отношение, отн.ед., не менее /при магнитной индукции, Тл	Максимально допустимая мощность рассеяния, мВт, без теплоотвода	Температурный коэффициент сопротивления, %/°C	Пределы рабочей температуры, °C
MR-1	50	3,5/0,5 7/1	5	-1,8	-60...+52
MR-2	75	3,5/0,5 7/1	5	-1,8	-60...+52
MR-3	100	3,5/0,5 7/1	5	-1,8	-60...+52
CM1-1	22; 33; 68;	6/1	5	-2	-60...+70
	100; 150;	8/1	10	-2	-60...+70
	220	10/1	15	-2	-60...+70
CM4Г1	47; 68	3,3/0,5	6	-0,61	-60...+85

Приборы изготовлены из эвтектического сплава InSb-NiSb (антимонид индия – антимонид никеля) с легирующими добавками и приклеены к подложке из слюды, пермендюра или пермаллоя (рис. 2.13). Ферромагнитная подложка служит концентратором магнитного поля. Высокое значение магнитной проницаемости индукции насыщения материала подложки обеспечивает малый эффективный зазор магнитной системы, в которой будет работать магниторезистор.

Магниторезистивные элементы формы «меандр» толщиной 60...100 мкм и шириной дорожки до 100 мкм приклеены к проводящей подложке. Выводы – гибкие, проволочные, припаяны к контактным площадкам элемента. Весь пакет покрыт защитным слоем лака. Максимальная толщина магниторезистора с учетом пайки и защитного слоя не превышает 0,8 мм.

Сопротивление и чувствительность магниторезисторов зависят от температуры.

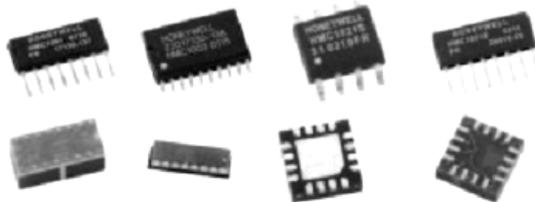


Рис. 2.13. Внешний вид магниторезистивных датчиков и сборок компании Honeywell

Фоторезисторы – группа резисторов из полупроводниковых материалов, изменяющих сопротивление при освещении. Используют явление внутреннего фотоэффекта. Применяются как фоточувствительные элементы в автоматических устройствах регулировки освещенности, контроля и учета количества произведенной продукции и т.д. О разновидностях и характеристиках этих приборов речь пойдет далее.

2.4. Приборы на аморфных полупроводниках

Помимо широко распространенных приборов, изготовленных на кристаллических полупроводниках, существуют приборы на аморфных, т.е. некристаллических, полупроводниках. Их иначе еще называют стеклообразными полупроводниками. Они могут быть сделаны из оксидов различных элементов или из таких элементов, как сера, селен, фосфор и другие, или из химических соединений, называемых халькогенидами, которые аналогичны оксидам, но вместо кислорода имеют серу или селен, или теллур.

Пленку аморфного полупроводника толщиной от единиц до сотен микрометров наносят на отшлифованную графитовую пластину и покры-

вают слоем металла. Такой прибор может работать в качестве переключателя. Его вольт-амперная характеристика похожа на вольт-амперную характеристику симметричного тиристора. Пока напряжение на приборе меньше некоторого значения, называемого напряжением переключения, сопротивление прибора очень велико, т.е. он находится в закрытом состоянии. При напряжении переключения происходит своеобразный неразрушающий тепловой пробой полупроводника, в нем образуется проводящий канал и прибор переходит в открытое состояние с малым сопротивлением. Иногда тепловому пробую предшествует лавинный электрический.

Напряжение переключения для различных приборов составляет от единиц до десятков вольт. Минимальный ток, при котором прибор еще находится в открытом состоянии, называется током выключения. Процесс включения и выключения приборов происходит весьма быстро, и потому они могут работать на частотах до сотен мегагерц.

На аморфных полупроводниках можно собирать запоминающие приборы, по принципу устройства такие же, как и переключательные, но с халькогенидными стеклами иного состава. Особенность запоминающих приборов состоит в том, что с переводом их в открытое состояние импульсом тока не менее 0,1 мА длительностью более 1 мс они сохраняют такое состояние после выключения тока. Это объясняется тем, что проводящий канал при охлаждении переходит из аморфного состояния в кристаллическое с малым удельным сопротивлением. Переход из открытого состояния в закрытое производится импульсом тока не менее 10 мА длительностью не менее 0,1 мкс. К сожалению, надежность, стабильность и срок службы приборов на аморфных полупроводниках еще недостаточно высоки. Так, например, переключатели выдерживают не более 10^{12} переключений. Однако достоинство этих приборов – простота изготовления и устойчивость к ионизирующему излучению.

2.5. Тензоэлектрические полупроводниковые приборы

Полупроводниковые тензоэлектрические приборы (тензоприборы) служат для измерения давлений и деформаций.

Работа тензорезисторов основана на тензорезистивном эффекте, который состоит в том, что сопротивление полупроводника зависит от давления на него. Материалом для тензорезисторов чаще всего служит кремний, но могут быть использованы и другие полупроводники (рис. 2.14). К основным параметрам тензорезисторов относятся номинальное сопротивление (от десятков ом до десятков килоом), т.е. сопротивление при от-

сутствии давления, и коэффициент тензочувствительности, равный отношению относительного изменения сопротивления $\Delta R/R$ к относительному изменению длины тензорезистора $\Delta l/l$. Этот коэффициент зависит от вещества полупроводника, типа электропроводности, удельного сопротивления и направления деформации.

Тензорезисторы характеризуются еще предельной допустимой деформацией, которую нельзя превышать во избежание выхода прибора из строя.

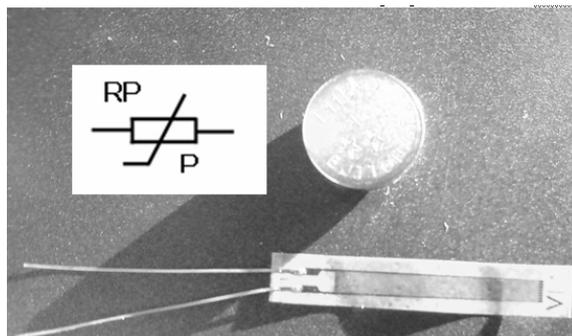


Рис. 2.14. Внешний вид тензорезистора (внизу) в сравнении с элементом питания типа AG 13 (вверху)

Помимо кристаллических тензорезисторов – из кристаллического полупроводника n- или p-типа – могут быть поликристаллические тензорезисторы, у которых при деформации сопротивление дополнительно изменяется за счет изменения сопротивления контактов между отдельными кристалликами.

Полупроводниковые тензодиоды работают по принципу изменения вольт-амперной характеристики под действием давления. Это изменение связано с тем, что при деформации изменяется высота потенциального барьера в p-n-переходе. Коэффициент тензочувствительности у тензодиодов достигает сотен и даже тысяч. Он может быть еще выше у туннельных тензодиодов.

У тензотранзисторов также под действием давления изменяется вольт-амперная характеристика. В зависимости от того, к какой области транзистора приложено давление, при его возрастании может наблюдаться уменьшение или увеличение тока.

В тензотиристорах с увеличением давления на базовый электрод, играющий роль управляющего электрода, возрастает ток эмиттера и за счет этого понижается напряжение включения.

2.6. Термоэлектрические полупроводниковые приборы

Ранее уже рассматривались терморезисторы, которые могут быть отнесены к термоэлектрическим приборам. Здесь мы познакомимся с некоторыми другими типами приборов данной группы.

Получение термо-ЭДС происходит следующим образом. Пусть имеется, например, полупроводник n-типа (рис. 2.15, а), у которого один конец (на рисунке левый) нагрет сильнее, нежели другой (правый). Тогда на левом, «горячем» конце концентрация и энергия подвижных носителей заряда (электронов) будет больше, чем на правом, «холодном» конце, и произойдет диффузия электронов от «горячего» конца к «холодному» (слева направо). В результате на правом конце образуется избыток электронов, т.е. отрицательный заряд, а на левом конце – положительный заряд. Между этими зарядами возникнет электрическое поле, которое будет стремиться двигать электроны в обратном направлении и препятствовать дальнейшему росту заряда. Установится равновесное состояние, характеризующееся некоторой разностью потенциалов, которая и есть термо-ЭДС. Она может составлять до 0,5 мВ на каждый градус разности температур. Аналогичное явление может происходить и в полупроводнике p-типа (см. рис. 2.15, б), в котором будут диффундировать дырки и возникнут заряды знаков, противоположных по сравнению с полученными в полупроводнике n-типа. Практически для получения термо-ЭДС применяют так называемые термоэлементы или термопары (рис. 2.16), у которых нагревается контакт двух полупроводников n- и p-типа. Термо-ЭДС тем больше, чем выше разность температур между нагретым и холодным торцами. Такие элементы могут быть реализованы на основе двух различных металлов или из металла и полупроводника. Однако термоэлемент из двух полупроводников дает наибольшую термо-ЭДС. При нагреве до 600 К можно получить термо-ЭДС до 0,3 В.

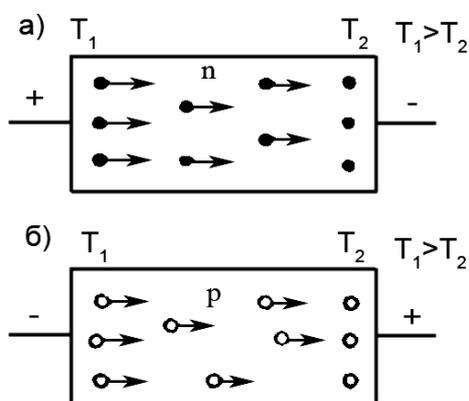


Рис. 2.15. Схема возникновения термо-ЭДС в полупроводнике

Первоначально термоэлементы использовались главным образом в измерительных приборах и в различных датчиках температуры, а в дальнейшем из них стали строить термоэлектрогенераторы, т.е. источники постоянного тока, в которых большое число термоэлементов соединено последовательно или смешанно (последовательно-параллельно).

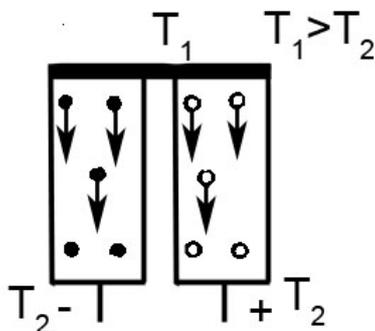


Рис. 2.16. Устройство полупроводникового термоэлемента

В 1834 г. французский физик Ж.Ш.А. Пельтье открыл эффект, названный его именем.

Суть эффекта Пельтье заключается в том, что при прохождении электрического тока через границу двух проводников, изготовленных из различных материалов, в зависимости от его направления, помимо джоулева тепла выделяется или поглощается дополнительное тепло, которое получило название тепла Пельтье. Количество выделяемого или поглощаемого тепла зависит от материалов, из которых изготовлены проводники, а также от силы протекающего по ним тока.

Наиболее сильно эффект Пельтье проявляется при использовании полупроводников р- и n-типов (рис. 2.17).



Рис 2.17. Принцип построения элемента Пельтье на полупроводниках р- и n-типов

Объединение большого количества пар полупроводников, соединенных последовательно и размещенных в одном корпусе, позволяет создавать достаточно мощные охлаждающие элементы (рис. 2.18).

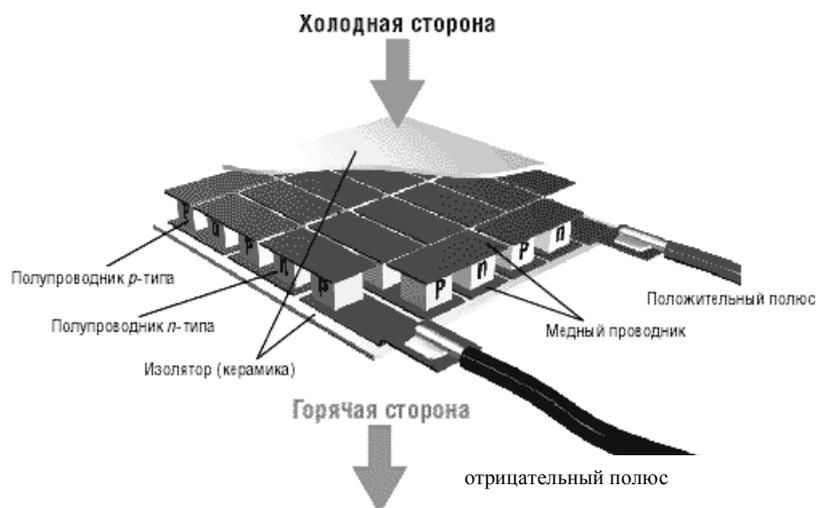


Рис. 2.18. Внутреннее устройство элемента Пельтье

Одна сторона такого элемента будет холодной, а другая – горячей; при изменении полярности питающего напряжения стороны меняются местами. Современная технология позволяет создавать элементы Пельтье, обеспечивающие разность температур между холодной и горячей стороной порядка 40 – 50 °С. Для повышения производительности несколько элементов Пельтье можно собрать на манер вафли, присоединяя горячую сторону одного к холодной стороне другого.

Разумеется, сам по себе элемент Пельтье (рис. 2.19) может обеспечить только отвод тепла от нагревающегося компонента.



Рис. 2.19. Внешний вид элемента Пельтье

Чтобы эффективно рассеивать это тепло, необходимо устанавливать на горячую сторону элемента довольно мощный кулер. Таким образом, элемент Пельтье является своеобразной прослойкой, устанавливаемой между нагревающимся компонентом и основанием радиатора. При выборе кулера стоит учитывать, что помимо тепла, отводимого от охлаждаемого элемента, модуль Пельтье и сам выделяет довольно большое количество тепла.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные типы специальных резисторов.
2. Из каких материалов изготавливают варисторы и в чем принцип их работы?
3. Приведите примеры применения варисторов.
4. Приведите УГО и характеристики терморезисторов.
5. Приведите примеры применения терморезисторов.
6. Где применяют магниторезисторы и какими параметрами их характеризуют?
7. От чего зависят параметры магниторезисторов?
8. В чем принцип работы термоэлектрических полупроводниковых приборов?
9. Как работает элемент Пельтье?

Тема 3. Электронно-дырочный (p-n) переход

Термины: *p-n-переход, потенциальная диаграмма, прямое и обратное включение p-n-перехода, прямой и обратный ток, уравнение и вольт-амперная характеристика перехода, температурные свойства перехода, емкость p-n-перехода, пробой туннельный, лавинный, тепловой, дифференциальное сопротивление, переход Шоттки, туннельный эффект, эффект Гана, эффект Холла.*

- 3.1. Образование электронно-дырочного перехода
- 3.2. Прямое и обратное включение p-n-перехода
- 3.3. Свойства и характеристики p-n-перехода
- 3.4. Пробой p-n-перехода
- 3.5. Переход Шоттки
- 3.6. Некоторые эффекты в полупроводниках

3.1. Образование электронно-дырочного перехода

Ввиду неравномерной концентрации на границе раздела p- и n-полупроводника возникает диффузионный ток, за счет которого электроны из n-области переходят в p-область, а на их месте остаются некомпенсированные заряды положительных ионов донорной примеси. Электроны, приходящие в p-область, рекомбинируют с дырками, и возникают некомпенсированные заряды отрицательных ионов акцепторной примеси. Ширина p-n-перехода – десятые доли микрона. На границе раздела возникает внутреннее электрическое поле p-n-перехода, которое будет тормозящим для основных носителей заряда и будет отбрасывать их от границы раздела.

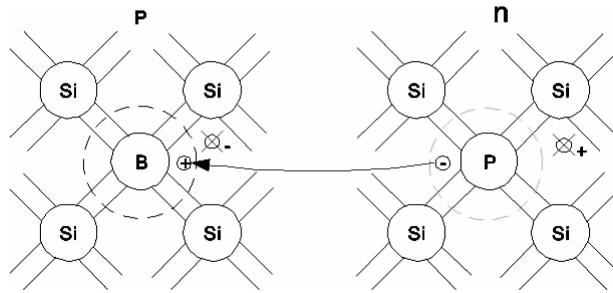


Рис. 3.1. Процесс протекания тока через переход

Для неосновных носителей заряда поле будет ускоряющим и будет переносить их в область, где они будут основными. Максимум напряженности электрического поля – на границе раздела.

Распределение потенциала по ширине полупроводника называется потенциальной диаграммой (рис. 3.2). Разность потенциалов на p-n-переходе называется контактной разностью потенциалов или потенциальным барьером. Для того чтобы основной носитель заряда смог преодолеть p-n-переход, его энергия должна быть достаточной для преодоления потенциального барьера.

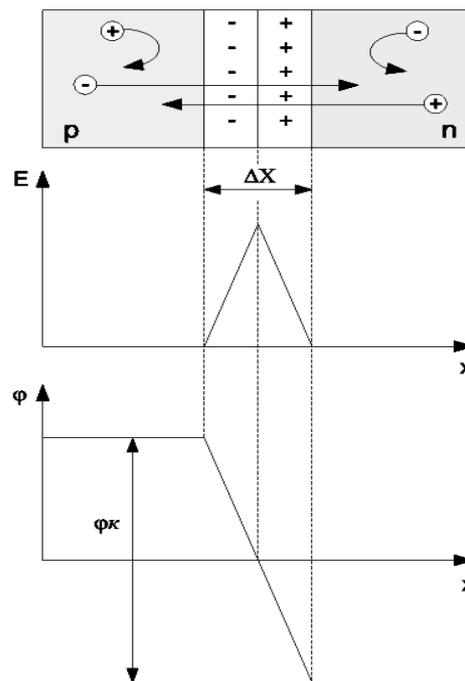


Рис. 3.2. Образование потенциального барьера p-n-перехода

3.2. Прямое и обратное включение p-n-перехода

Приложим внешнее напряжение плюсом к p-области. Внешнее электрическое поле направлено навстречу внутреннему полю p-n-перехода, что приводит к уменьшению потенциального барьера. Основные носители за-

рядов легко смогут преодолеть потенциальный барьер, и поэтому через р-п-переход будет протекать сравнительно большой ток, вызванный основными носителями заряда.

Такое включение р-п-перехода называется прямым (рис. 3.3), и ток через р-п-переход, вызванный основными носителями заряда, также называется прямым током. Считается, что при прямом включении р-п-переход открыт.

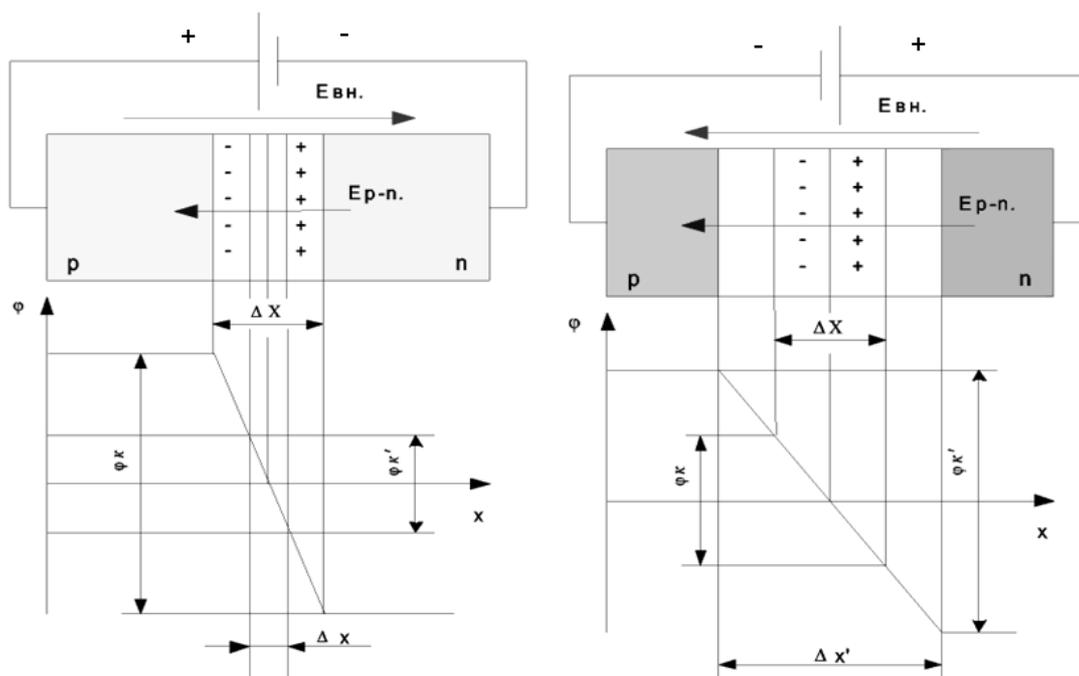


Рис. 3.3. Прямое (слева) и обратное (справа) включение р-п-перехода

Если подключить внешнее напряжение минусом на р-область, а плюсом на п-область, то возникает внешнее электрическое поле, линии напряженности которого совпадают с внутренним полем р-п-перехода. В результате это приведет к увеличению потенциального барьера и ширины р-п-перехода.

Основные носители заряда не смогут преодолеть р-п-переход и считается, что он закрыт. Оба поля – и внутреннее и внешнее – являются ускоряющими для неосновных носителей заряда, поэтому неосновные носители заряда будут проходить через р-п-переход, образуя очень маленький ток, который называется обратным током. Такое включение р-п-перехода также называется обратным.

3.3. Свойства и характеристики р-п-перехода

Свойства и характеристики р-п-перехода:

- свойство односторонней проводимости;
- температурные свойства р-п перехода;

- частотные свойства р-п перехода;
- пробой р-п перехода.

Свойство односторонней проводимости р-п-перехода нетрудно рассмотреть на вольт-амперной характеристике. Вольт-амперной характеристикой называется графически выраженная зависимость величины протекающего через р-п-переход тока от величины приложенного напряжения. $I = f(U)$.

Будем считать прямое напряжение положительным, обратное – отрицательным. Ток через р-п-переход может быть определен следующим образом:

$$I = I_0 \cdot (e^{\frac{e' \cdot U}{k \cdot T}} - 1),$$

где I_0 – ток, вызванный прохождением собственных носителей заряда; e – основание натурального логарифма; e' – заряд электрона; T – температура; U – напряжение, приложенное к р-п-переходу; k – постоянная Больцмана.

Данное выражение называется уравнением р-п-перехода.

При прямом включении:

$$I_{np} = I_0 \cdot (e^{\frac{e' \cdot U}{k \cdot T}} - 1);$$

$$\frac{e'}{k \cdot T} = const = c;$$

$$I = f(U);$$

$$I_{np} = I_0 \cdot (e^{c \cdot U} - 1);$$

$$e^{c \cdot U} \gg 1.$$

При увеличении прямого напряжения прямой ток изменяется по экспоненциальному закону.

При обратном включении:

$$I_{обр} = I_0 \cdot (e^{-c \cdot U} - 1);$$

$$e^{-c \cdot U} \ll 1;$$

$$I_{обр} = -I_0.$$

Так как величина обратного тока во много раз меньше, чем прямого, то обратным током можно пренебречь и считать, что р-п-переход проводит ток только в одну сторону. **Температурное** свойство р-п-перехода показывает, как изменяется его работа при изменении температуры (рис. 3.4). На

p-n-переход в значительной степени влияет нагрев, в очень малой степени – охлаждение. При увеличении температуры увеличивается термогенерация носителей заряда, что приводит к увеличению как прямого, так и обратного тока. **Частотные** свойства p-n-перехода показывают, как он работает при подаче на него переменного напряжения высокой частоты. Частотные свойства p-n-перехода определяются двумя видами его емкости (рис. 3.5).

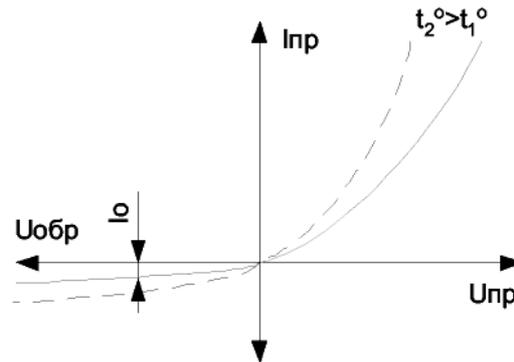


Рис. 3.4. Вольт-амперные характеристики p-n-перехода при различных температурах

Первый вид емкости – это емкость, обусловленная неподвижными зарядами ионов донорной и акцепторной примеси. Она называется **зарядной, или барьерной емкостью**.

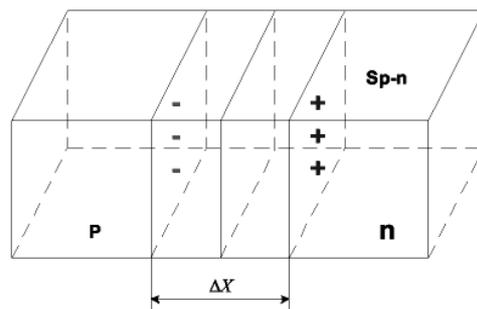


Рис. 3.5. Пояснение к внутренней емкости перехода

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d};$$

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{p-n}}{\Delta x}.$$

Второй тип емкости – это **диффузионная емкость**, обусловленная диффузией подвижных носителей заряда через р-п-переход при прямом включении.

$$C_{диф} = \frac{Q}{U_{пр}},$$

где Q – заряд, протекающий через р-п-переход.

На рис. 3.6 приведена эквивалентная схема р-п-перехода.

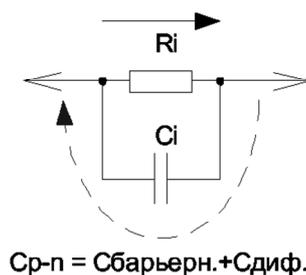


Рис. 3.6. Эквивалентная схема р-п-перехода

R_i – внутреннее сопротивление р-п-перехода. R_i очень мало при прямом включении ($R_i = 1 \dots 10$ Ом) и будет велико при обратном включении ($R_{iобр} = 100$ кОм...1 Мом).

Если на р-п-переход подавать переменное напряжение, то емкостное сопротивление р-п-перехода будет уменьшаться с увеличением частоты, и при некоторых больших частотах емкостное сопротивление может сравняться с внутренним сопротивлением р-п-перехода при прямом включении. В этом случае при обратном включении через эту емкость потечет достаточно большой обратный ток и р-п-переход потеряет свойство односторонней проводимости.

$$x_c = \frac{1}{\omega \cdot c}.$$

Вывод: чем меньше величина емкости р-п-перехода, тем на более высоких частотах он может работать.

На частотные свойства основное влияние оказывает барьерная емкость, т.к. диффузионная емкость имеет место при прямом включении, когда внутреннее сопротивление р-п-перехода мало.

3.4. Пробой р-п-перехода

Пробоем называют резкое изменение режима работы перехода, находящегося под обратным напряжением. Характерной особенностью этого изменения является резкое уменьшение дифференциального сопротивления перехода $r_{\text{диф}}$, которое определяется выражением

$$r_{\text{диф}} = \frac{du}{di},$$

где u – напряжение на переходе; i – ток перехода.

После начала пробоя незначительное увеличение обратного напряжения сопровождается резким увеличением обратного тока. В процессе пробоя ток может увеличиваться при неизменном и даже уменьшающемся (по модулю) обратном напряжении (в последнем случае дифференциальное сопротивление оказывается отрицательным).

Изобразим соответствующий участок вольт-амперной характеристики р-п-перехода (рис. 3.7).

В основе пробоя р-п-перехода лежат три физических явления:

- туннельный пробой р-п-перехода (эффект, явление Зенера);
- лавинный пробой р-п-перехода;
- тепловой пробой р-п-перехода.

Термин «пробой» используется для описания всей совокупности физических явлений и каждого отдельного явления.

И туннельный, и лавинный пробой принято называть *электрическим пробоем*.

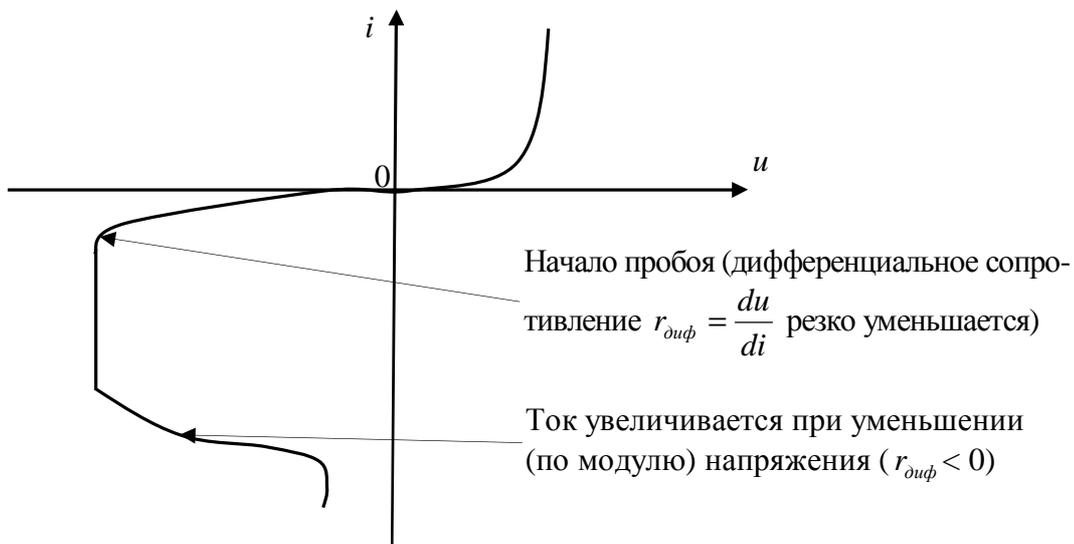


Рис. 3.7. Участки пробоя

Рассмотрим все три вида пробоя.

Тоннельный пробой. Его называют также зенеровским пробоем по фамилии ученого (Zener), впервые описавшего соответствующее явление в однородном материале. Ранее явлением Зенера ошибочно объясняли и те процессы при пробое перехода, в основе которых лежал лавинный пробой. Напряжение, при котором начинается пробой, называют напряжением Зенера. Для объяснения механизма тоннельного пробоя схематически изобразим соответствующую зонную диаграмму p-n-перехода (рис. 3.8).

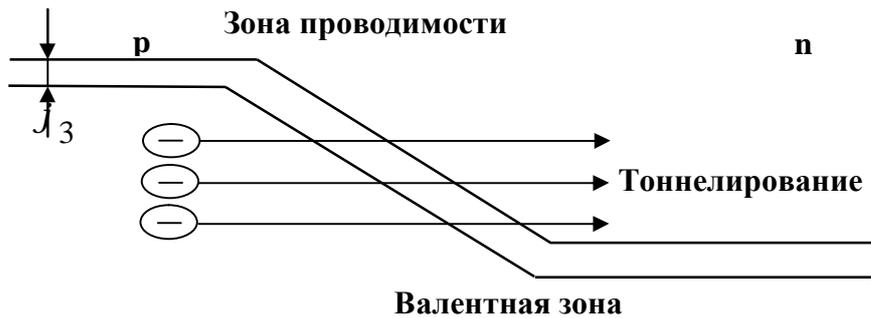


Рис. 3.8. Пояснения к эффекту тоннельного пробоя

Если расстояние между валентной зоной и зоной проводимости в кристалле (ширина, толщина барьера) достаточно мало, то возникает тоннельный эффект – явление прохождения электронов сквозь потенциальный барьер.

Лавинный пробой. Механизм лавинного пробоя подобен механизму ударной ионизации в газах, схематично явление лавинного пробоя изображено на рис. 3.9.

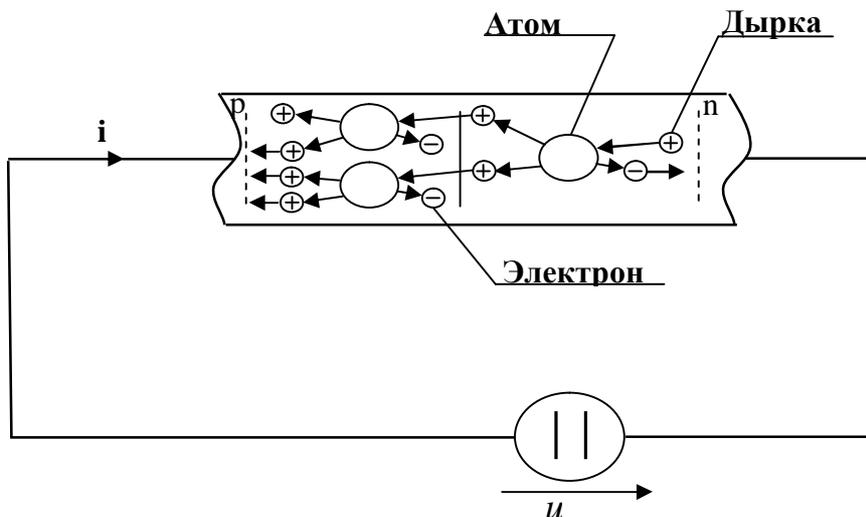


Рис. 3.9. Возникновение лавинного пробоя

Лавинный пробой возникает, если при движении до очередного соударения с атомом дырка (или электрон) приобретает энергию, достаточную для ионизации атома. Расстояние, которое проходит носитель заряда до соударения, называют длиной свободного пробега.

Явления туннельного и лавинного пробоев наблюдаются практически одновременно. Преобладание того или иного как правило определяет количество примесей (или степень легирования). В низкоомных полупроводниках преобладает первый тип пробоя, в высокоомных – второй.

Тепловой пробой (рис. 3.10). Увеличение тока при тепловом пробое объясняется разогревом полупроводника в области р-п-перехода и соответствующим увеличением удельной проводимости. Тепловой пробой характеризуется отрицательным дифференциальным сопротивлением. Если полупроводник – кремний, то при увеличении обратного напряжения тепловой пробой обычно возникает после электрического (во время электрического пробоя полупроводник разогревается, а затем начинается тепловой пробой). После электрического пробоя р-п-переход не изменяет своих свойств. После теплового пробоя, если полупроводник успел нагреться достаточно сильно, свойства перехода необратимо изменяются (полупроводниковый прибор выходит из строя).

Электрический пробой (см. рис. 3.10) – это обратимый пробой, т.е. при уменьшении обратного напряжения р-п-переход восстанавливает свойство односторонней проводимости. Если обратное напряжение не уменьшить, то полупроводник сильно нагреется за счет теплового действия тока и р-п-переход сгорит. Тепловой пробой необратим.

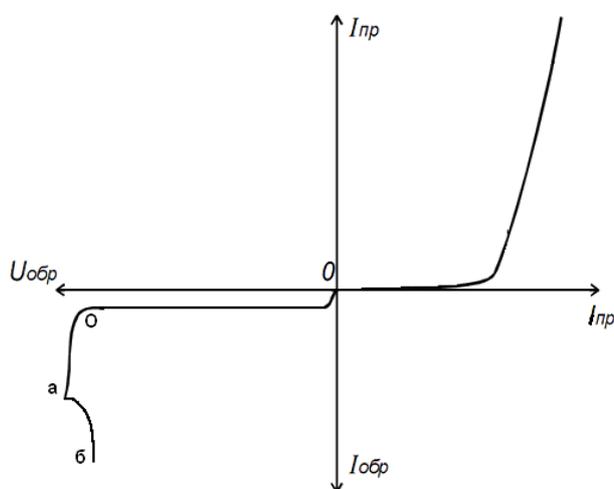


Рис. 3.10. Пробой перехода:

оа – участок электрического пробоя; аб – участок теплового пробоя

3.5. Переход Шоттки

3.5.1. Образование перехода Шоттки

Переход Шоттки возникает на границе раздела металла и полупроводника n-типа, причем *металл должен иметь работу выхода электрона большую, чем полупроводник*.

При контакте двух материалов с разной работой выхода электронов электрон проходит из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода, и ни при каких условиях – наоборот. Электроны из приграничного слоя полупроводника переходят в металл, а на их месте остаются некомпенсированные положительные заряды ионов донорной примеси. В металле большое количество свободных электронов, и, следовательно, на границе металл – полупроводник возникает электрическое поле и потенциальный барьер. Возникшее поле будет тормозящим для электронов полупроводника и будет отбрасывать их от границы раздела. Граница раздела металла и полупроводника со слоем положительных зарядов ионов донорной примеси называется переходом Шоттки (рис. 3.11), который был открыт в 1934 году.

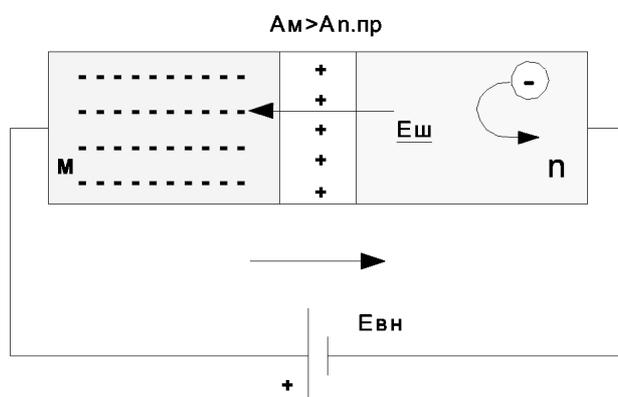


Рис. 3.11. Образование перехода Шоттки

3.5.2. Прямое и обратное включение диодов Шоттки

- Если приложить внешнее напряжение плюсом на металл, а минусом на полупроводник, возникает внешнее электрическое поле, направленное навстречу полю перехода Шоттки. Это внешнее поле компенсирует поле перехода Шоттки и будет являться ускоряющим для электронов полупроводника. Электроны будут переходить из полупроводника в металл, образуя сравнительно большой прямой ток. Такое включение называется прямым.

- При подаче минуса на металл, а плюса на полупроводник возникает внешнее электрическое поле, сонаправленное с полем перехода Шоттки. Оба этих поля будут тормозящими для электронов полупроводника и будут отбрасывать их от границы раздела. Оба этих поля будут ускоряющими для электронов металла, но они через границу раздела не пройдут, так как у металла больше работа выхода электрона. Такое включение перехода Шоттки называется обратным.

Обратный ток через переход Шоттки будет полностью отсутствовать, так как в металле не существует неосновных носителей зарядов.

Достоинства перехода Шоттки:

- отсутствие обратного тока;
- переход Шоттки может работать на СВЧ;
- высокое быстродействие при переключении из прямого состояния в обратное и наоборот.

Недостаток – стоимость. В качестве металла обычно применяют золото.

3.6. Некоторые эффекты в полупроводниках

3.6.1. Тоннельный эффект

Тоннельный эффект (открыт в 1958 году в Японии) проявляется на р-n-переходе в вырожденных полупроводниках.

Вырожденный полупроводник – это полупроводник с очень высокой концентрацией донорной или акцепторной примеси. (Концентрация – 10^{24} атомов примеси на 1 см^3 полупроводника).

В вырожденных полупроводниках очень тонкий р-n-переход: его ширина составляет сотые доли микрона, а напряженность внутреннего поля р-n-перехода $E_{p-n} \approx 10^8 \text{ В/м}$, что обеспечивает очень высокий потенциальный барьер. Основные носители заряда не могут преодолеть этот потенциальный барьер, но за счет малой его ширины как бы механически пробивают в нем тоннели, через которые проходят другие носители зарядов.

Следовательно, свойство односторонней проводимости на р-n-переходе при тоннельном эффекте отсутствует, а ток через р-n-переход будет иметь три составляющие:

$$I = I_{m.np.} - I_{m.obr.} + I_{np.},$$

где $I_{m.np.}$ – прямой тоннельный ток за счет прохождения зарядов через тоннели при прямом включении; $I_{m.obr.}$ – обратный тоннельный ток, тот же самый, что и прямой, но при обратном включении; $I_{np.}$ – прямой ток проводимости. Вызван носителями заряда, преодолевающими потенциальный барьер при относительно высоком прямом напряжении.

Вольт-амперная характеристика р-п-перехода при туннельном эффекте будет иметь вид, изображенный на рис. 3.12.

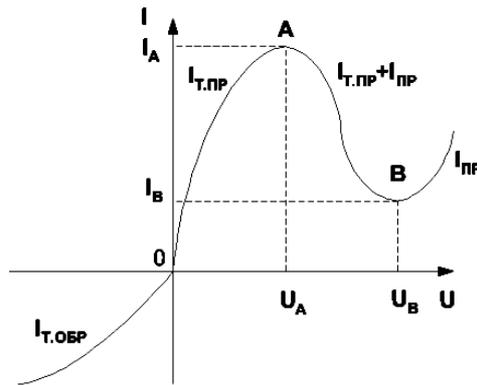


Рис. 3.12. Вольт-амперная характеристика туннельного перехода

На участке АВ прямой туннельный ток уменьшается за счет снижения потенциального барьера и в точке В он становится равным нулю, а ток проводимости незначительно возрастает. За счет этого общий ток на участке АВ уменьшается. Особенностью туннельного эффекта является то, что на участке АВ характеристики имеет место отрицательное динамическое сопротивление.

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_b - U_a}{I_b - I_a}.$$

Туннельный эффект применяется в туннельных диодах, которые используются в схемах генераторов гармонических колебаний и как маломощные бесконтактные переключающие устройства.

3.6.2. Эффект Гана

Эффект Гана проявляется в полупроводниках (рис. 3.13) *п*-типа проводимости **в сильных электрических полях**.

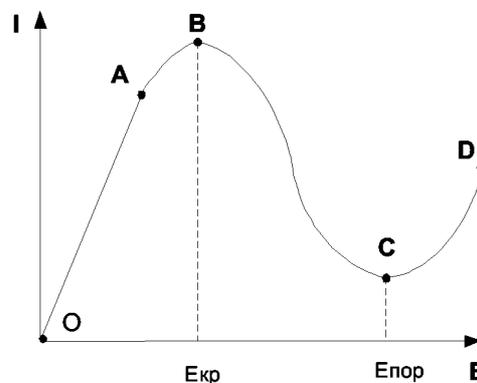


Рис. 3.13. Протекание тока в полупроводнике при эффекте Гана

Участок OA – линейный участок, на котором соблюдается закон Ома. Участок AB – при сравнительно больших напряженностях электрического поля уменьшается подвижность электронов (показывает, как легко электроны проходят сквозь кристаллическую решетку проводника) за счет увеличения амплитуд колебания атомов в узлах кристаллической решетки. И за счет этого рост тока замедляется. Участок BC – сильное уменьшение подвижности электронов, что приводит к уменьшению тока. Участок CO – при очень больших напряженностях значительно увеличивается генерация носителей зарядов и хотя подвижность электронов уменьшается, ток возрастает за счет увеличения количества зарядов.

Сущность эффекта Гана состоит в том, что если в полупроводнике создать напряженность электрического поля, большую $E_{кр}$, но меньшую $E_{пор}$, т.е. на участке BC характеристики, то в полупроводнике возникнут электрические колебания сверхвысокой частоты (СВЧ).

Эффект Гана применяется в диодах Гана, которые используются как маломощные генераторы СВЧ.

3.6.3. Эффект Холла

Эффект Холла проявляется в полупроводниках n-типа проводимости с протекающими через них токами, помещенных в магнитное поле.

На движущиеся электроны в полупроводнике будет действовать сила Лоренца P , под действием которой электроны будут отклоняться к дальнему краю пластинки (рис. 3.14), следовательно, там будет сгущение электронов, а около переднего края – недостаток их. Поэтому между этими краями возникнет ЭДС, которая называется ЭДС Холла. Эффект Холла применяется в магнитометрических датчиках.

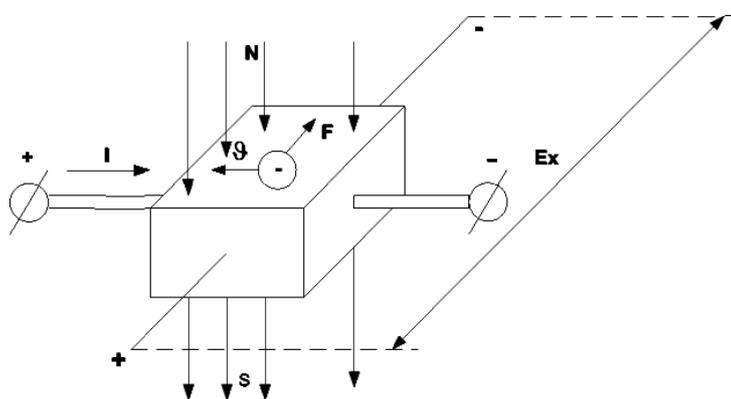


Рис. 3.14. Конструкция элемента Холла

Контрольные вопросы

1. Опишите процессы, происходящие при образовании электронно-дырочного перехода (ЭДП), и дайте объяснение этим процессам. Приведите примеры и разновидности ЭДП.
2. Расскажите о видах включения ЭДП и дайте краткое описание процессам в ЭДП.
3. Какими особенностями обладает несимметричный ЭДП?
4. Перечислите основные свойства ЭДП.
5. Как влияет температура на ВАХ ЭДП и чем это объясняется?
6. Какими внутренними емкостями характеризуется ЭДП, чем объясняется их наличие и как они влияют на работу ЭДП?
7. Дайте определение пробою ЭДП и назовите его основные виды.
8. Назовите основные условия создания перехода Шоттки и объясните принцип его работы.
9. Особенности материалов, в которых наблюдается тоннельный эффект. ВАХ и применение тоннельного эффекта.
10. Объясните принцип эффекта Холла.

Список использованных литературных источников

1. Жеребцов, И. П. Основы электроники. – 5-е изд., перераб. и доп. / И. П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ие, 1989. – 352 с. : ил.
2. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : Учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
3. Шелестов, И. П. Радиолюбителям : полезные схемы. Кн. 5 / И. П. Шелестов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 240 с. : ил.
4. <http://platan.ru>
5. М. Бараночников // «Радио». – 1994. – №№ 7, 8, 9.
6. Москатов, Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.

РАЗДЕЛ 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Содержание раздела

Классификация полупроводниковых диодов по технологии изготовления, мощности, частоте и функциональному применению: выпрямительные, стабилитроны, варикапы, импульсные диоды, диоды с накоплением заряда, диоды Шоттки, тоннельные и обращенные диоды. Принцип работы, характеристики, параметры, схемы включения. Система обозначения полупроводниковых диодов. Влияние температуры на ВАХ.

Методические указания

Полупроводниковые диоды [1, с. 47 – 78; 2, с. 79 – 90; 3, с. 40 – 55].

В результате изучения материала необходимо ознакомиться с назначением, классификацией и системой обозначений, устройством полупроводниковых диодов. Изучить ВАХ и статические параметры реальных диодов, обратив особое внимание на электрические и эксплуатационные параметры, а также схемы включения диодов.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте классификацию диодов по конструкции, технологии и их применению.
2. Нарисуйте ВАХ германиевого и кремниевого выпрямительных диодов.
3. Параметры выпрямительных диодов.
4. Каковы конструктивные особенности выпрямительных, высокочастотных и сверхвысокочастотных диодов?
5. Параметры импульсных диодов.
6. Какие виды пробоев используются в стабилитронах?
7. Параметры стабилитрона.
8. От чего зависит напряжение стабилизации стабилитрона?
9. Нарисуйте схему включения стабилитрона. На чем основано его стабилизирующее действие?
10. Основные параметры варикапов.
11. При каком смещении перехода используются варикапы?
12. Что такое добротность варикапов? Чем она определяется? Ее физический смысл.

13. В чем заключается явление туннельного эффекта? При каких условиях имеет место туннельный механизм прохождения тока через р-п-переход?
14. Параметры туннельного диода.
15. Что такое обращенный туннельный диод?
16. Приведите примеры туннельных диодов.
17. Какие требования предъявляются к конструкции СВЧ-диодов? Перечислите области применения СВЧ-диодов.

Рекомендуемая литература

1. Булычев, А. Л. Электронные приборы / А. Л. Булычев и др. – М. : ЛайтЛТд, 2000. – 416 с. : ил.
2. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 1991. – 622 с. : ил.
3. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.

Тема 4. Полупроводниковые приборы. Устройство, классификация и основные параметры полупроводниковых диодов

Термины: *классификация, система обозначений, УГО, конструкция, плоскостные и точечные, микросплавные диоды, реальная и идеальная ВАХ диода, выпрямительные, универсальные, импульсные, высокочастотные, детекторные, смесительные, умножительные, параметрические, генераторные, туннельные, обращенные диоды, стабилитроны, стабисторы, варикапы, диоды Ганна. Параметры диодов.*

- 4.1. Классификация и условные обозначения полупроводниковых диодов**
- 4.2. Конструкция полупроводниковых диодов**
- 4.3. Вольт-амперная характеристика и основные параметры полупроводниковых диодов**
- 4.4. Выпрямительные диоды**
- 4.5. Стабилитроны**
- 4.6. Варикапы**
- 4.7. Импульсные, высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) диоды**

4.1. Классификация и условные обозначения полупроводниковых диодов

Полупроводниковым диодом называют электропреобразовательный прибор, содержащий один или несколько переходов и два вывода для подключения к внешней цепи. Принцип работы большинства диодов основан на использовании физических явлений в переходе. В диодах применяются электронно-дырочный переход, контакт металл – полупроводник, гетеро-переход.

Полупроводниковый диод как элемент электрической цепи является нелинейным двухполюсником: имеет два вывода и нелинейную ВАХ.

Классификация диодов производится по следующим признакам:

1. По конструкции:

- плоскостные диоды;
- точечные диоды;
- сплавные и микросплавные диоды.

2. По мощности:

- маломощные ($I_{пр. ср} < 0,3 \text{ A}$);
- средней мощности;
- мощные ($I_{пр. ср} > 10 \text{ A}$).

3. По частоте:

- низкочастотные;
- высокочастотные;
- СВЧ.

4. По функциональному назначению:

- выпрямительные диоды;
- импульсные диоды;
- стабилитроны;
- варикапы;
- светодиоды;
- тоннельные диоды
- другие.

Условное обозначение диодов подразделяется на два вида:

- маркировка диодов;
- условное графическое обозначение (УГО) – обозначение на принципиальных электрических схемах.

Система обозначений полупроводниковых диодов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336.919-81, а силовых полупроводниковых

приборов – ГОСТ 20859.1-89. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код.

Первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал, второй (буква) – подкласс приборов (функциональная группа), третий (цифра) – основные функциональные возможности прибора и порядковый номер разработки, четвертый элемент – буква, условно определяющая классификацию (разбраковку по параметрам) приборов, изготовленных по единой технологии.

По старому ГОСТу (до 1964 г.) все диоды обозначались буквой Д и цифрой, которая указывала на электрические параметры, находящиеся в справочнике. Новый ГОСТ на маркировку диодов состоит из 4-х обозначений:

К	С	156	А
Г	Д	507	Б
I	II	III	IV

I – показывает материал полупроводника:

Г (1) – германий; К (2) – кремний; А (3) – арсенид галлия.

II – тип полупроводникового диода:

Д – выпрямительные, ВЧ и импульсные диоды;

А – диоды СВЧ;

С – стабилитроны;

В – варикапы;

И – тоннельные диоды;

Ф – фотодиоды;

Л – светодиоды;

Ц – выпрямительные столбы и блоки.

III – три цифры – группа диодов по своим электрическим параметрам:

Д	{	101...399 выпрямительные
		401...499 ВЧ диоды
		501...599 импульсные

IV – модификация диодов в данной (третьей) группе.

Условно-графические обозначения на электрических схемах выполняются согласно ГОСТ 2.730-73. Позиционное обозначение содержит буквы **VD**. (На зарубежных схемах **U(DIN)** или **D(ANSI)**).

На рис. 4.1 приведены условные графические обозначения диодов.

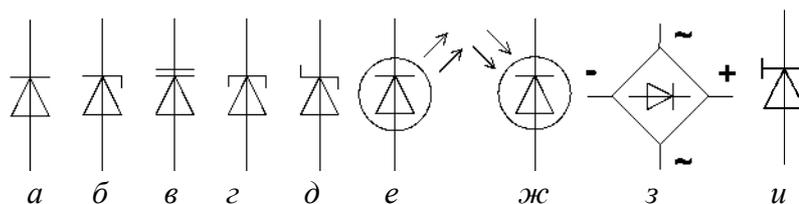


Рис. 4.1. Условные графические обозначения диодов:

а – выпрямительные, высокочастотные, СВЧ, импульсные, универсальные и диоды Гана;
б – стабилитроны; *в* – варикапы; *г* – тоннельные диоды; *д* – диоды Шоттки;
е – светодиоды; *ж* – фотодиоды; *з* – выпрямительные блоки; *и* – обращенные диоды

4.2. Конструкция полупроводниковых диодов

Основой плоскостных и точечных диодов является кристалл полупроводника *n*-типа проводимости, который называется базой. Эта область характеризуется низкой концентрацией примеси (10^{14} - 10^{16} см⁻³) и высокоомна относительно *p*-эмиттера с высокой концентрацией примеси (более 10^{18} см⁻³).

Плоскостные диоды. База припаивается к металлической пластинке, которая называется кристаллодержателем. Для плоскостного диода на базу накладывается материал акцепторной примеси и в вакуумной печи при высокой температуре (порядка 500 °С) происходит диффузия акцепторной примеси в базу диода, в результате чего образуется область *p*-типа проводимости и *p-n*-переход большой плоскости (отсюда название).

Вывод от *p*-области называется анодом, а вывод от *n*-области – катодом (рис. 4.2).

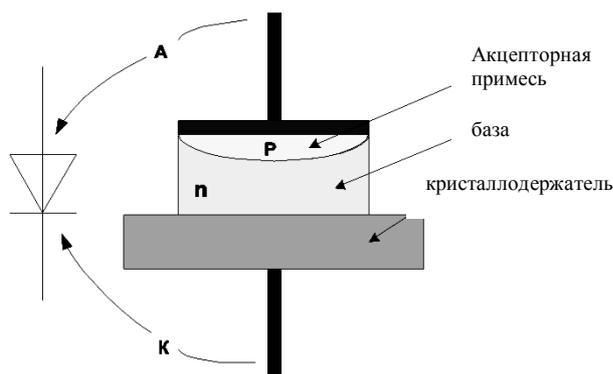


Рис. 4.2. Конструкция плоскостных диодов

Большая плоскость *p-n*-перехода плоскостных диодов позволяет им работать при больших прямых токах, но за счет большой барьерной емкости они будут низкочастотными.

Точечные диоды

К базе точечного диода (рис. 4.3) подводят вольфрамовую проволоку, легированную атомами акцепторной примеси, и через нее пропускают импульсы тока силой до 1А. В точке разогрева атомы акцепторной примеси переходят в базу, образуя р-область (рис. 4.4).

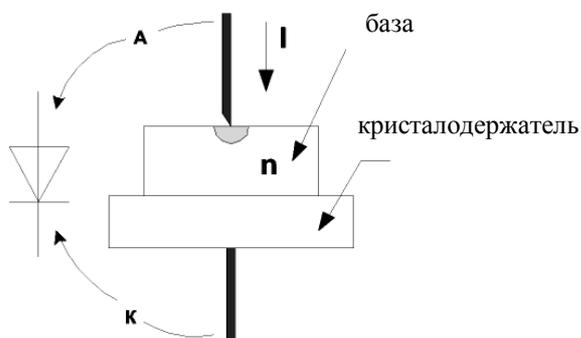


Рис. 4.3. Конструкция точечных диодов

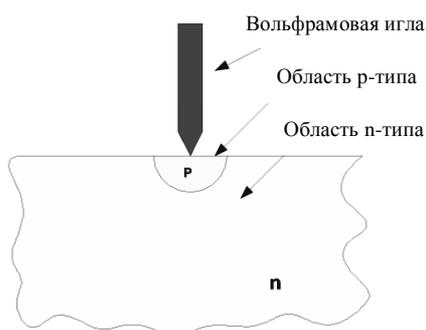


Рис. 4.4. Конструкция точечных диодов

Получается р-п-переход очень малой площади. За счет этого точечные диоды будут высокочастотными, но могут работать лишь на малых прямых токах (десятки миллиампер).

Микросплавные диоды

Их получают путем сплавления микрокристаллов полупроводников р- и n- типа проводимости. По своему характеру микросплавные диоды плоскостные, а по своим параметрам – точечные.

Диффузионные диоды

Получают путем введения акцепторной или донорной примеси из газовой среды в глубь пластины n-типа или р-типа (рис. 4.5). Диффузионный р-п-переход плавный.



Рис. 4.5. Конструкция перехода, изготовленного по диффузионной технологии

Эпитаксиальные диоды

На полупроводниковой пластине р- типа из парогазовой смеси осаждают и наращивают слой полупроводника с донорной примесью n-типа (рис. 4.6). Получаемый тип перехода резкий.



Рис. 4.6. Конструкция перехода, полученного эпитаксиальным наращиванием

4.3. Вольт-амперная характеристика и основные параметры полупроводниковых диодов

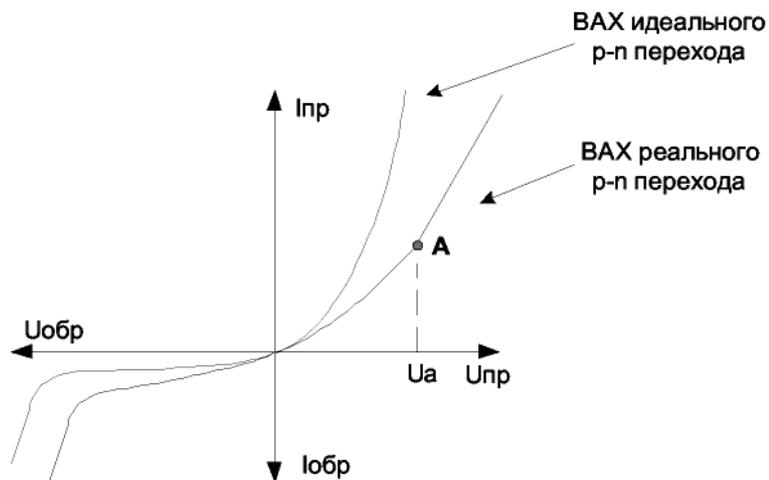


Рис. 4.7. Вольт-амперные характеристики диодов

Зависимость тока, протекающего через диод, от величины и полярности приложенного к его выводам внешнего напряжения называется вольт-амперной характеристикой диода:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (4.1)$$

где $UT = kT/q$ – температурный потенциал, равный 26 мВ при $T = 300$ К; I_0 – обратный ток насыщения.

Уравнение (4.1) называют теоретической или идеализированной ВАХ диода. В нем не учтено суммарное сопротивление базы, омических контактов и выводов диода r_d . С учетом этого сопротивления реальная ВАХ диода имеет вид:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q(U-r_d I)}{kT}} - 1 \right). \quad (4.2)$$

Вольт-амперная характеристика реального диода проходит ниже, чем у идеального р-п перехода: сказывается влияние сопротивления базы. После точки А вольт-амперная характеристика будет представлять собой прямую линию, так как при напряжении U_a потенциальный барьер полностью компенсируется внешним полем. Кривая обратного тока ВАХ имеет наклон, так как за счет возрастания обратного напряжения увеличивается генерация собственных носителей заряда.

Определение параметров диодов по ВАХ показано на рис. 4.8.

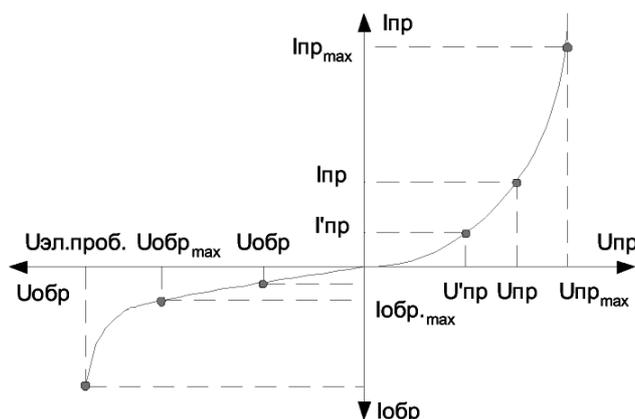


Рис. 4.8. Определение параметров диодов по ВАХ

- Максимально допустимый прямой ток – $I_{пр.max}$.
- Прямое падение напряжения на диоде при максимальном прямом токе – $U_{пр.max}$.

- Максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.мах.} = (2/3 \dots 3/4) U_{эл.проб.}$
- Обратный ток при максимально допустимом обратном напряжении – $I_{обр.мах.}$
- Прямое и обратное статическое сопротивление диода при заданных прямом и обратном напряжениях:

$$R_{ст.пр.} = \frac{U_{пр.}}{I_{пр.}}; R_{ст.обр.} = \frac{U_{обр.}}{I_{обр.}}$$

- Прямое и обратное динамическое сопротивление диода:

$$R_{инр} = \frac{\Delta U_{пр.}}{\Delta I_{пр.}};$$

$$R_{инр} = \frac{U_{пр} - U'_{пр}}{I_{пр} - I'_{пр}}; R_{иобр} = \frac{\Delta U_{обр.}}{\Delta I_{обр.}}; R_{иобр} = \frac{U_{обр} - U'_{обр}}{I_{обр} - I'_{обр}}$$

4.4. Выпрямительные диоды

Выпрямительные диоды преобразуют переменный ток в постоянный. В связи с этим к их емкости, быстрдействию и стабильности параметров не предъявляется жестких требований. Основой выпрямительного диода является несимметричный р-п-переход с большой площадью поперечного сечения, которая необходима для получения большого прямого тока. Низкоомная область (обычно это р-область), имеющая большую концентрацию примесей, называется эмиттером, а высокоомная (обычно п-область) с малой концентрацией примесей – базой. Сопротивление базовой области у реальных диодов составляет единицы – десятки ом. Работа выпрямительных диодов основана на вентильных свойствах перехода.

Наибольшее применение нашли кремниевые, германиевые диоды с барьером Шоттки, а в аппаратуре специального назначения и измерительной аппаратуре, работающей в условиях высокой температуры, – селеновые и титановые выпрямители.

Эквивалентная схема диода. С учетом полученных дифференциальных параметров можно построить эквивалентную малосигнальную схему диода для низких частот (рис. 4.9, в). В этом случае наряду с уже описанными элементами – дифференциальным сопротивлением (см. рис. 4.9, а) и емкостями диода (см. рис. 4.9, б) необходимо учесть омическое сопротивление квазинейтрального объема базы ($r_{об.}$) диода. Сопротивление квазинейтрального объема эмиттера можно не учитывать, поскольку в диодах эмиттер обычно легирован значительно более сильно, чем база.

Сравнение характеристик германиевых и кремниевых диодов показывает:

- 1) значение обратного тока германиевых диодов на два-три порядка больше, чем у кремниевых, при одинаковой площади перехода. Это объясняется различной шириной их запрещенной зоны;
- 2) допустимое обратное напряжение у кремниевых диодов больше, чем у германиевых, за счет различной ширины запрещенной зоны;
- 3) падение напряжения на кремниевых диодах больше, чем на германиевых, при одинаковых токах нагрузки, что обусловлено большим сопротивлением базовой области кремниевых диодов.

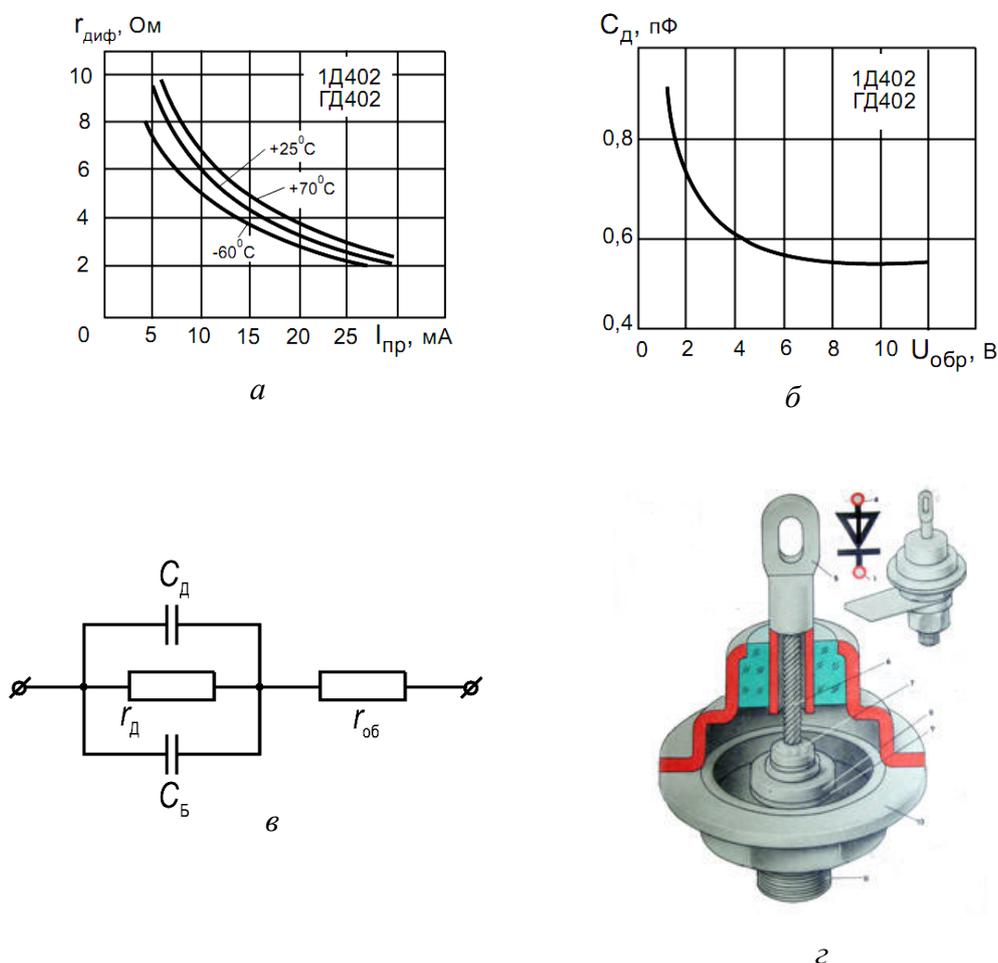


Рис. 4.9. Приборные характеристики и эквивалентная малосигнальная схема для выпрямительных диодов:

- а* – зависимость дифференциального сопротивления диода ГД402 от величины тока при прямом смещении; *б* – зависимость емкости диода ГД402 от обратного напряжения; *в* – эквивалентная малосигнальная схема диода для низких частот; *з* – конструкция выпрямительного диода большой мощности

Параметры выпрямительных диодов:

1. Средний выпрямленный ток $I_{np.ср.}$ – среднее за период значение выпрямленного тока, который может длительно протекать через диод при допустимом его нагреве (сотни микроампер – десятки ампер).
2. Среднее прямое напряжение $U_{np.ср.}$ – среднее значение прямого падения напряжения, определяемое при среднем выпрямленном токе, для германиевых диодов $U_{np.ср.} < 1$ В, для кремниевых $U_{np.ср.} < 1,5$ В.
3. Максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.мах}$ – максимально допустимое обратное напряжение, которое длительно выдерживает диод без нарушения нормальной работы; $U_{обр.мах}$ на 20 % меньше напряжения пробоя $U_{проб.}$. Для германиевых диодов $U_{проб.} = 100...400$ В, для кремниевых – 1000...1500 В.
4. Максимальный обратный ток $I_{обр.мах}$ – максимальное значение обратного тока диода при $U_{обр.мах}$.
5. Средняя рассеиваемая мощность $P_{ср.}$ – средняя за период мощность, рассеиваемая диодом при протекании $I_{np.ср.}$ (сотни милливатт – десятки ватт).
6. Диапазон рабочих температур: для германиевых диодов $-60...+85$ °С; для кремниевых диодов $-60...+125$ °С.
7. Барьерная емкость диода при подаче на него номинального обратного напряжения составляет единицы – десятки пикофарад.
8. Диапазон рабочих частот.
9. Дифференциальное сопротивление $r_{диф.}$

4.5. Стабилитроны

Стабилитроном называется полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации уровня постоянного напряжения. Стабилизация – поддержание какого-то уровня неизменным. По конструкции стабилитроны всегда плоскостные и кремниевые. Принцип действия стабилитрона основан на том, что на его вольт-амперной характеристике имеется участок, на котором напряжение практически не зависит от величины протекающего тока (рис. 4.10).

Таким участком является участок электрического пробоя, а за счет легирующих добавок в полупроводнике ток электрического пробоя может изменяться в широком диапазоне, не переходя в тепловой пробой.

Так как участок электрического пробоя находится на обратной ветви ВАХ, то стабилитрон используется при обратном включении (рис. 4.11).

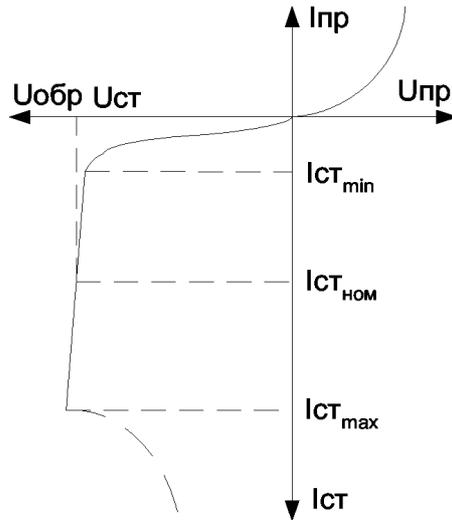


Рис. 4.10. Рабочий участок ВАХ стабилитрона и его параметры

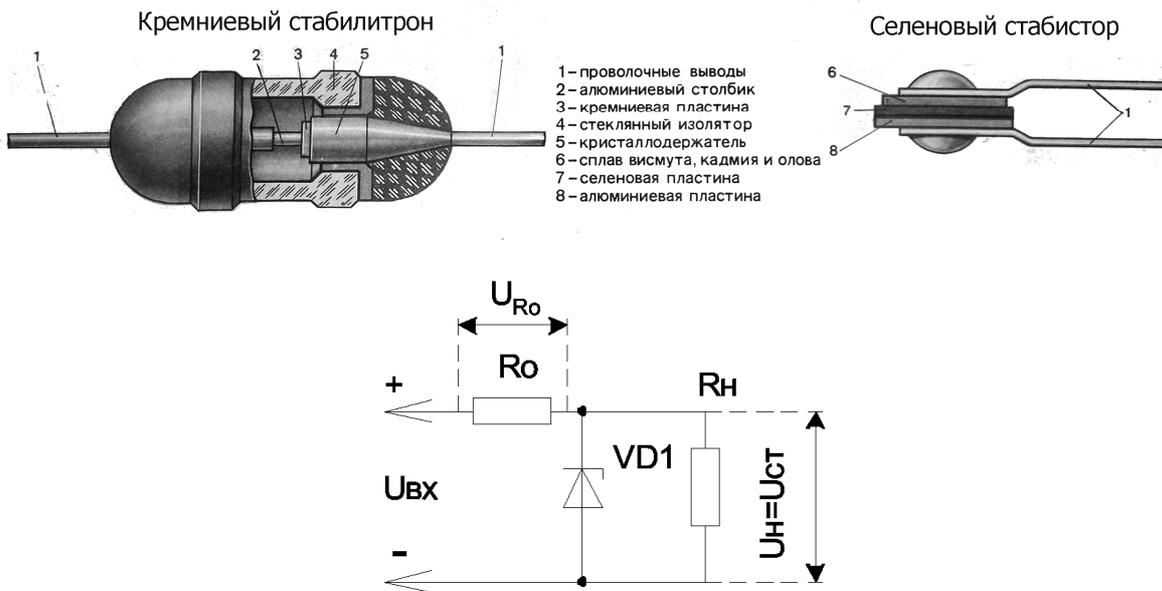


Рис. 4.11. Конструкции и схема включения стабилитрона (параметрический стабилизатор)

Резистор R_o задает ток через стабилитрон таким образом, чтобы величина тока была близка к среднему значению между $I_{ст.мин}$ и $I_{ст.маx}$. Такое значение тока называется номинальным током стабилизации.

Принцип действия. При уменьшении входного напряжения ток через стабилитрон и падение напряжения на R_o могут уменьшаться, а напряжения на стабилитроне и на нагрузке останутся постоянными, исходя из

вольт-амперной характеристики. При увеличении входного напряжения ток через стабилитрон и U_{Ro} увеличиваются, а напряжение на нагрузке все равно остается постоянным и равным напряжению стабилизации.

Вывод: стабилитрон поддерживает постоянство напряжения при изменении тока через него от $I_{ст.мин}$ до $I_{ст.мах}$.

Основные параметры стабилитронов:

- Напряжение стабилизации $U_{ст}$.
- Минимальное, максимальное и номинальные значения тока стабилизации $I_{ст.мин}$, $I_{ст.мах}$, $I_{ст.ном}$. (рис. 4.12).

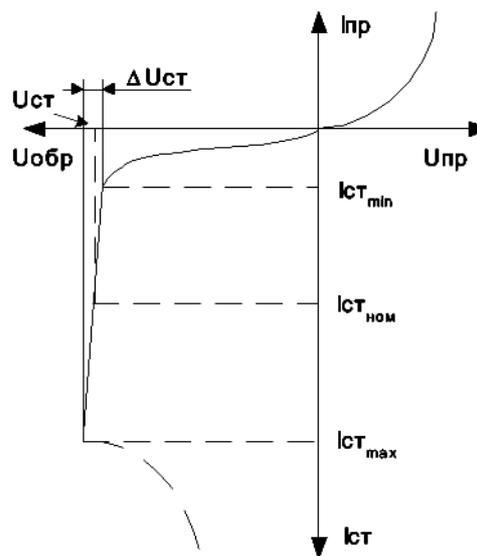


Рис. 4.12. Определение параметров стабилитрона

- $\Delta U_{ст}$ – изменение напряжения стабилизации.
- Дифференциальное сопротивление на участке стабилизации:

$$R_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} = \frac{\Delta U_{ст}}{I_{ст.мах} - I_{ст.мин}}$$

- Температурный коэффициент стабилизации:

$$\alpha_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст}} \cdot 100\%$$

$$\Delta U_{ст.t} = U_{ст}' - U_{ст}$$

$$\Delta t = t_2^0 - t_1^0$$

На рис. 4.13 приведено пояснение к расчету ТКС, $t_1 > t_2$.

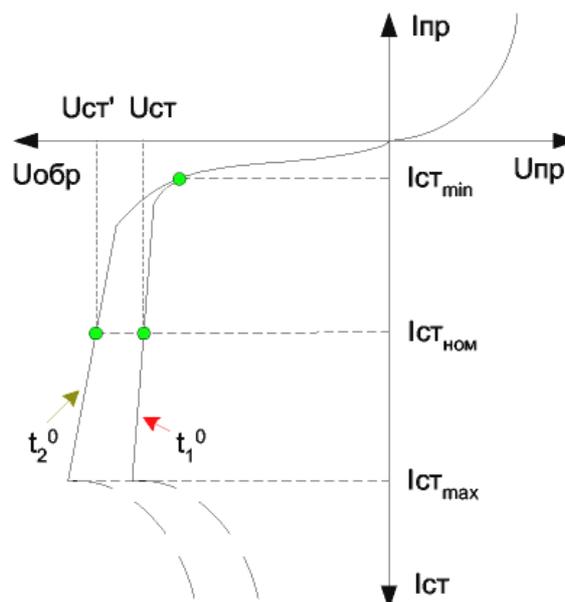


Рис. 4.13. Пояснение к расчету ТКС

Для стабилизации или ограничения коротких импульсов напряжения используют импульсные стабилитроны. Они должны обладать большим быстродействием, которое определяется временем перезарядки барьерной емкости. Примером таких стабилитронов являются 2С175Е, КС182Е, КС211Е и др.

Двуханодные стабилизаторы применяются в схемах стабилизации и двухстороннего ограничения напряжения, устройствах защиты элементов электрических цепей от перенапряжений обеих полярностей. Они имеют два р-п-перехода, включенных встречно, а их внешние выводы сделаны от р-областей. Это 2С170А, 2С182А и др.

Стабисторами называют диоды, у которых для стабилизации напряжения используется прямая ветвь ВАХ. Особенностью стабисторов является малое напряжение стабилизации $U_{ст}$ (0,35...2,25 В), которое определяется прямым падением напряжения на диоде. Для увеличения напряжения стабилизации используют последовательное соединение нескольких стабисторов, смонтированных в одном корпусе или в одном кристалле.

Примером стабисторов являются приборы КС107, 2С113А, 2С119А, и у них используется прямая ветвь ВАХ (рис. 4.14).

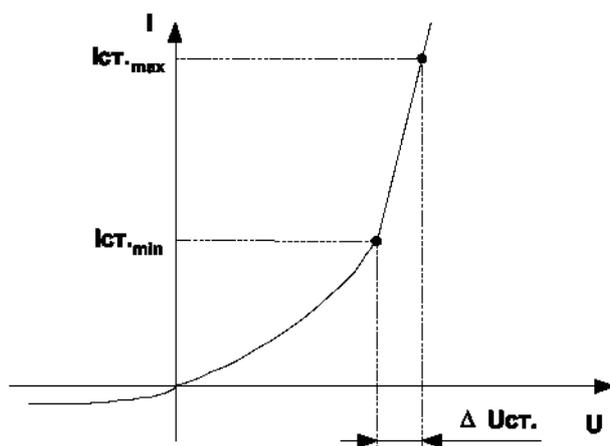


Рис. 4.14. ВАХ стабилиторов

Применяются стабилитроны в прямом включении.

В современной РЭА все чаще встречаются специальные защитные диоды высокого быстродействия TVS (Transient Voltage Suppression). В качестве токоотводящих элементов ESD защиты могут использоваться импульсные стабилитроны. Они включаются параллельно цепям питания в обратном включении. Происходящий электрический или тепловой пробой предотвращает проникновение в схему кратковременных скачков напряжения и тока и повреждение элементов от, например, статического разряда.

4.6. Варикапы

Варикапом называется полупроводниковый диод, у которого в качестве основного параметра используется барьерная емкость, величина которой варьируется при изменении обратного напряжения. Следовательно, варикап применяется как конденсатор переменной емкости, управляемый напряжением (рис. 4.15). Они находят применение для автоматической подстройки частоты радиоприемников, в частотных модуляторах, в параметрических схемах усиления, в схемах умножения частоты, в управляемых фазовращателях. Принцип действия варикапа основан на зависимости емкости р-п-перехода от внешнего напряжения.

Диффузионная емкость не нашла практического применения из-за сильной зависимости ее от температуры и частоты, высокого уровня собственных шумов и низкой добротности. Практическое применение получила барьерная емкость р-п-перехода, величина которой зависит от значения приложенного к диоду обратного напряжения.

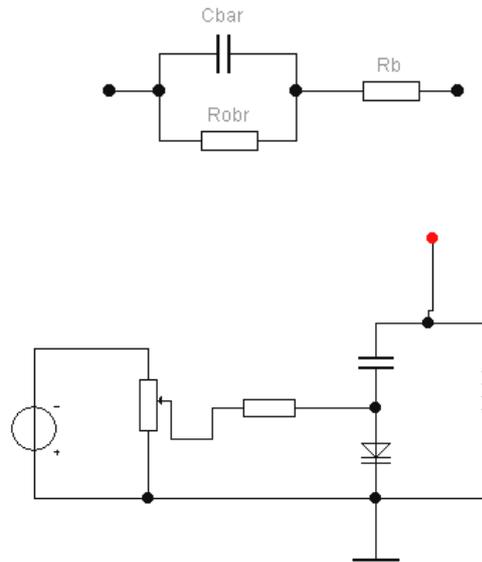


Рис. 4.15. Эквивалентная схема и схема включения варикапа

Принцип действия. Если к р-п-переходу приложить обратное напряжение, то ширина потенциального барьера увеличивается.

$$C_{\bar{\sigma}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S p - n}{\Delta X}.$$

При подключении обратного напряжения ширина перехода ΔX увеличивается, следовательно, барьерная емкость будет уменьшаться. Основной характеристикой варикапов является вольт-фарадная характеристика (рис. 4.16) $C = f(U_{обр.})$.

С ростом частоты добротность падает. Зависимость добротности варикапа от частоты имеет максимум в диапазоне 20...30 МГц.

Добротность уменьшается с повышением температуры, так как при этом возрастает $r_{\bar{\sigma}}$. С увеличением обратного напряжения емкость $C_{\bar{\sigma}}$ и сопротивление $r_{\bar{\sigma}}$ уменьшаются, ибо уменьшается толщина базы, а добротность варикапа при этом растет.

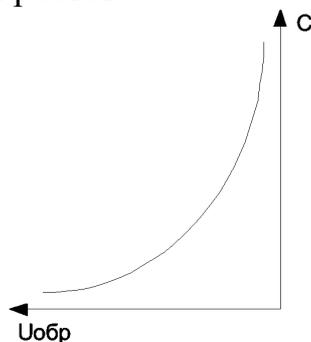


Рис. 4.16. Вольт-фарадная характеристика варикапа

Основные параметры варикапов

Параметры варикапов следующие:

1. Максимальная емкость $C_{в.маx}$ – емкость варикапа при заданном минимальном напряжении $U_{обр.}$, ограничена значением емкости C_o .
2. Минимальная емкость $C_{в.мин}$ – емкость варикапа при заданном максимальном напряжении $U_{обр.}$, ограничивается обратным допустимым напряжением р-п-перехода $U_{обр.дон.}$.
3. Коэффициент перекрытия по емкости $K = C_{в.маx} / C_{в.мин}$ (единицы – десятки единиц).
4. Сопротивление потерь R_n – суммарное активное сопротивление, включая сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов варикапа.
5. Температурный коэффициент емкости ТКЕ – представляет собой отношение относительного изменения емкости к вызвавшему его абсолютному изменению температуры окружающей среды.
6. Номинальная емкость $C_{в.ном.}$ – представляет собой барьерную емкость перехода при заданном номинальном (оптимальном) напряжении $U_{обр.ном.}$.
7. Добротность варикапа Q_B – отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к сопротивлению потерь при заданном значении емкости или обратного напряжения: $Q_B = X_c/R_n$. Добротность показывает относительные потери колебательной мощности в варикапе (десятки – сотни единиц).

4.7. Импульсные, высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) диоды

4.7.1. Импульсные диоды. Импульсные диоды предназначены для работы в быстродействующих импульсных схемах и должны обладать малой емкостью перехода и малым временем жизни неравновесных носителей заряда в базе. Импульсные диоды предназначены для работы в импульсных цепях с длительностями импульсов от нескольких нано- до нескольких микросекунд. Рассмотрим работу обычного р-п-перехода при подаче на него импульсного напряжения (рис. 4.17, 4.18).

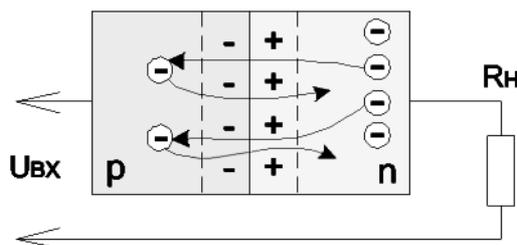


Рис. 4.17. Схема работы р-п-перехода при подаче на него импульсного напряжения

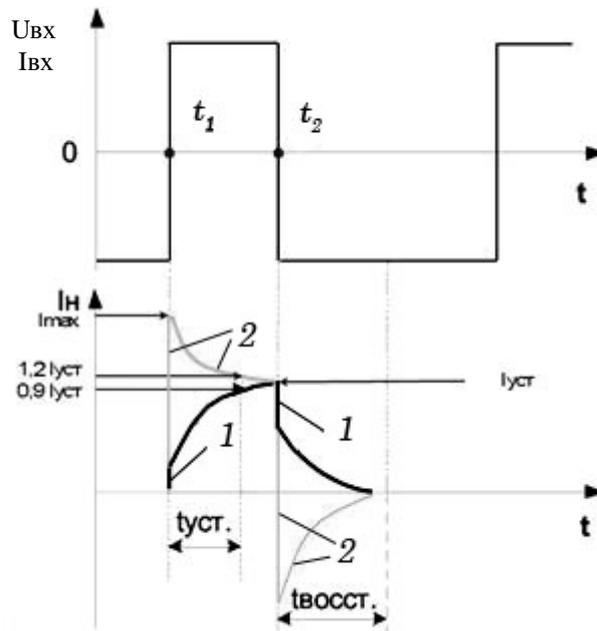


Рис. 4.18. Процессы протекания тока через диодный ключ

В промежуток времени от 0 до t_1 p-n-переход закрыт (обратным напряжением пренебрегаем). В момент t_1 p-n-переход открывается, в зависимости от соотношения внутреннего сопротивления источника, диода и нагрузки форма тока через нагрузку в интервале $t_1 - t_2$ будет отличаться от прямоугольной. В случае, когда внутреннее сопротивление источника больше внутреннего сопротивления диода, он работает как источник тока и имеет форму, изображенную на рис. 4.18 линией 1, если наоборот, то входной источник превращается в источник напряжения и форма напряжения на нагрузке имеет вид, изображенный линией 2. В общем случае ток через диод и через нагрузку достигает стабильного (установившегося) значения не мгновенно, а за время $t_{уст.}$, которое необходимо для заряда барьерной емкости p-n-перехода. Определение этого времени производится по графику в зависимости от соотношения сопротивлений. Например, время установления прямого тока определяется по моменту достижения током значения в 1,1 – 1,2 от установившегося значения тока либо 0,9 для случая с источником тока.

В момент времени t_2 p-n-переход почти мгновенно закрывается. Область p-проводимости оказывается насыщенной неосновными носителями зарядов, то есть электронами. Не успевшие рекомбинировать электроны под действием поля закрытого p-n-перехода возвращаются в n-область, за счет чего сильно возрастает обратный ток. По мере ухода электронов из

p-области обратный ток уменьшается, и через время $t_{восст.}$ p-n-переход восстанавливает свои «закрытые» свойства. Численно этот момент определяют по уровню $0,1 I_{уст.}$ [2] В импульсных диодах время восстановления и установления должны быть минимальными. С этой целью импульсные диоды конструктивно выполняются точечными или микросплавными. Толщина базы диода делается минимальной. Полупроводник легируют золотом для увеличения подвижности электронов. Для уменьшения времени переходных процессов при изготовлении обеспечивают неравномерное распределение примесей в кристалле, что вызывает накопление заряда в полупроводнике и уменьшает в 30 – 50 раз время восстановления [3]. Такие диоды называют диодами с накоплением заряда (ДНЗ).

Параметры импульсных диодов следующие:

1. Максимальное импульсное прямое падение напряжения $U_{пр.и\ max}$ – максимальное падение напряжения на диоде в прямом направлении при заданном прямом токе.

2. Время установления прямого сопротивления $t_{уст.}$ – время от момента включения прямого тока диода до момента достижения заданного уровня прямого напряжения на диоде.

3. Время восстановления обратного сопротивления $t_{вос.}$ – время с момента переключения диода с прямого на обратное импульсное напряжение до достижения обратным током заданного значения.

4. Емкость диода C_d – емкость между выводами диода при заданном обратном напряжении.

5. Постоянный обратный ток $I_{обр.}$ – ток диода при заданном обратном напряжении.

6. Постоянное прямое напряжение $U_{пр.}$ – падение напряжения на диоде при заданном прямом токе.

Заряд переключения Q – избыточный заряд, вытекающий во внешнюю цепь при изменении направления тока с прямого на обратный.

4.7.2. Диоды ВЧ. Это универсальные диоды, которые могут быть детекторными, модуляторными, импульсными при достаточных длительностях импульса, и даже выпрямительными при малых токах нагрузки. Универсальными называют высокочастотные диоды, применяемые для выпрямления, модуляции, детектирования и других нелинейных преобразований электрических сигналов, частота которых не превышает 1000 МГц. Вторым элементом обозначения универсальных диодов является буква Д. На схемах они изображаются так же, как и выпрямительные диоды. Диод

будет обладать односторонней проводимостью, если на частоте сигнала выполняется условие: $\frac{1}{\omega C_{бар.}} \ll r_{д.обр.}$.

Для выполнения этого условия необходимо уменьшать емкость $C_{бар.}$, поэтому по конструкции такие диоды, в зависимости от мощности, либо точечные, либо микросплавные.

Основное отличие ВЧ диодов – обратная ветвь вольт-амперной характеристики плавно понижается (увеличивается обратный ток, постепенно переходя в область электрического пробоя) (рис. 4.19).

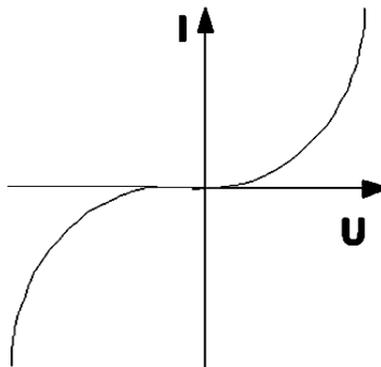


Рис. 4.19. Типовая ВАХ СВЧ диодов

Такое понижение обратной ветви ВАХ объясняется усиленной термогенерацией собственных носителей зарядов на малой площади р-п-перехода. Обычно пробивное напряжение невелико и составляет 3 – 5 вольт [2].

Микросплавные ВЧ диоды имеют большую барьерную емкость, чем точечные, и для того, чтобы их можно было использовать на высоких частотах, вблизи р-п-перехода понижают концентрацию акцепторной и донорной примеси (рис. 4.20).



Рис. 4.20. Концентрация примесей в СВЧ диодах

Понижение концентрации примеси приводит к увеличению ширины р-п-перехода, следовательно, к уменьшению барьерной емкости:

$$C_{\sigma} = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S(p - n)}{\Delta X}.$$

4.7.3. СВЧ диоды

Сверхвысокочастотными называют полупроводниковые диоды, используемые для преобразования, детектирования, усиления, умножения, генерирования и управления уровнем мощности сигналов сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

В диапазоне СВЧ в качестве линий передачи энергии и колебательных систем применяются устройства с распределенными параметрами (волноводы, фидерные линии, резонаторы и др.). Конструкция СВЧ диодов позволяет включать их в волноводно-фидерные тракты и обеспечивает получение малых емкостей и индуктивностей вводов при незначительных потерях энергии. Эквивалентная схема диода с учетом последовательной индуктивности $L_{нос.}$ и емкости корпуса $C_{кор.}$ представлена на рис. 4.21, там же показаны конструкции СВЧ диодов. В корпус диода, образованного короткими толстыми вводами 1, имеющими малую индуктивность, и изолятором 2, изготовленным из высокочастотной керамики с малыми потерями, помещается кристалл полупроводника 3 с p-n-переходом.

В большинстве диодов используется точечный p-n-переход (исключение составляют некоторые переключательные диоды). Для увеличения рабочей частоты уменьшают время жизни неравновесных носителей зарядов в базе путем повышения концентрации примесей в полупроводнике. Таким образом, для изготовления p-n-перехода берется кристалл полупроводника с малым удельным сопротивлением. На поверхности такого полупроводника существуют участки с другим типом проводимости. Прижатием конца контактной пружины к одному из этих участков получают p-n-переход малой площади и, следовательно, незначительной емкости. Из-за высокой концентрации примесей ширина запирающего слоя оказывается небольшой, и пробой перехода наступает при напряжении 3...5 В. Во втором элементе обозначения диодов СВЧ используется буква А.

Малая электрическая прочность таких диодов требует особой осторожности при обращении с ними. Диоды должны храниться в закрытых металлических патронах. Необходимо исключить возможность разряда через диод, извлекаемый из патрона, статического электричества, накопленного на теле оператора, в блоках аппаратуры и т.д. Поэтому, прежде чем вынуть диод из патрона, оператор должен снять статический заряд прикосновением руки к прибору, в который устанавливается диод.

Заостренная вольфрамовая проволока в виде пружины прижимается к базе с определенным усилием, за счет чего образуется очень малой площади p-n-переход.

На СВЧ используются диоды Шоттки и диоды с p-n-переходом, площадь которого значительно меньше, чем у точечных.

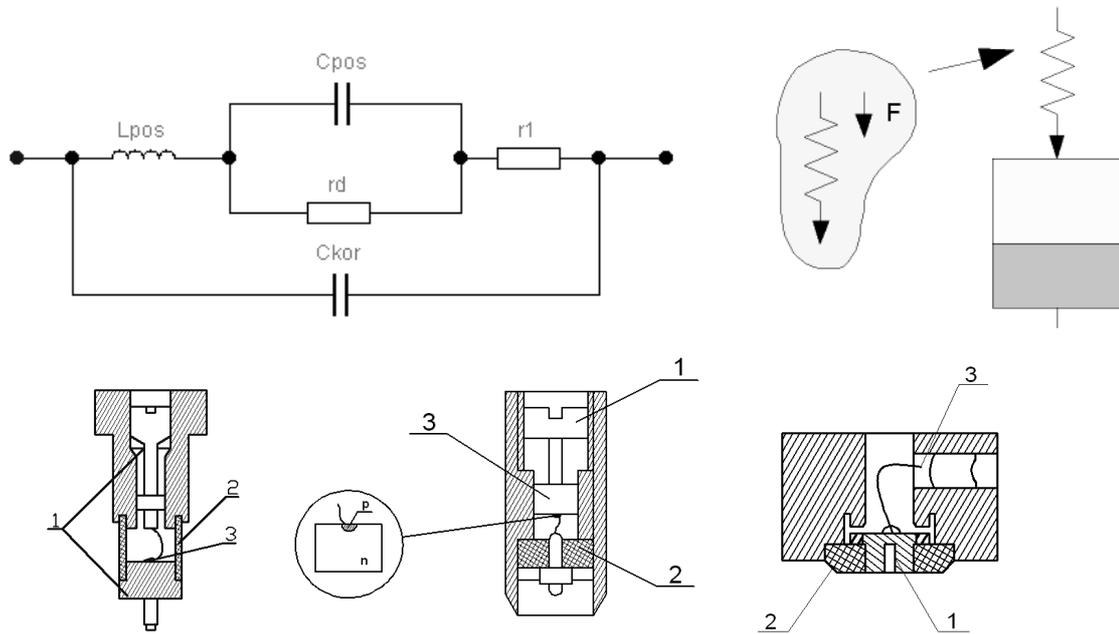


Рис. 4.21. Эквивалентная схема, конструкции СВЧ диодов

Диоды Шоттки обладают следующими преимуществами по сравнению с кремниевыми p-n-переходами [4]:

- для получения того же тока требуется более низкое прямое напряжение;
- электропроводность создается только основными носителями (электронами), инжектируемыми из полупроводника в металл. В металле они практически мгновенно рекомбинируют, поэтому накопление неосновных носителей и время восстановления диода при переключении напряжения с прямого на обратное очень малы. Быстродействие определяется скоростью перезарядки барьерной емкости;

За счет низкого прямого напряжения и высокого быстродействия диоды Шоттки используются в выпрямительных и переключающих цепях, а также для увеличения быстродействия транзисторов в цифровых схемах, таких, как ТТЛ-логика.

К недостаткам диодов Шоттки относятся:

- температурная зависимость тока утечки несколько больше, чем у обычных диодов, использующих p-n-переход;
- максимальное обратное напряжение ниже, чем у обычных кремниевых диодов.

Вольт-амперная характеристика диодов Шоттки такая же, как и у обычных диодов, а обратные токи составляют сотни пикоампер – десятки наноампер.

Смесительные диоды используются в супергетеродинных приемниках для преобразования сигналов СВЧ в сигналы промежуточной частоты.

На смесительный диод поступает принятый сигнал частотой f_c и мощностью P_c и сигнал гетеродина P_2 частотой f_2 . Из-за нелинейности характеристики диода в выходной цепи проходят токи различных комбинационных частот. С помощью колебательного контура, настраиваемого на промежуточную частоту $f_{пром} = f_c - f_2$, выделяется сигнал промежуточной частоты.

Основным специальным параметром смесительных диодов являются потери преобразования (в децибелах) L_n . Например, диод 2A101A характеризуется следующими параметрами: $L_n = 10$ дБ, $n_{ш} = 2$ дБ, $r_{вых} = 250...550$ Ом.

Детекторные диоды предназначены для детектирования сигналов СВЧ. Под *детектированием* понимают процесс выделения из модулированного напряжения высокой частоты напряжения сигнала более низкой частоты, по закону которого была осуществлена амплитудная модуляция высокочастотного сигнала.

На детекторный диод поступает модулированный высокочастотный сигнал мощностью P_c . Через детекторный диод проходит ток $I_{вых}$.

Некоторые детекторные диоды имеют характеристику, близкую к квадратичной, что позволяет использовать их для измерителей мощности колебаний СВЧ.

Параметрическими называют диоды, предназначенные для работы в параметрических усилителях. В основу работы параметрических диодов положено периодическое изменение емкости колебательной системы.

Таким образом, эти диоды являются разновидностью варикапов. Их основные параметры: емкость перехода $C_{пер.}$; емкость корпуса $C_{кор.}$; последовательная индуктивность $L_{нос.}$; напряжение пробоя $U_{проб.}$; обратный ток $I_{обр.}$; постоянная времени t , диапазон рабочих частот и температур. Например, у диода 1A404A $C_{пер.} = 0,11$ пФ, $C_{кор.} = 0,2$ пФ, $L_{нос.} = 1,5$ нГн, $t = 0,85$ пс, $U_{проб.} = 10$ В.

Умножительные диоды используются в умножителях частоты и выполняют в диапазоне СВЧ роль, аналогичную роли умножительных варикапов. Основными параметрами умножительных диодов являются: емкость диода C_0 ; индуктивность $L_{нос.}$; предельная частота f_{max} . Например, у диода 3A603B $C_0 = 0,5... 1,2$ пФ, $L_{нос.} = 1,7$ нГн, $f_{max} = 200$ ГГц.

Регулирующими называют полупроводниковые диоды, предназначенные для переключения, ограничения и модуляции сигналов СВЧ.

В ограничительных диодах используется зависимость полного сопротивления диода от мощности подводимого сигнала СВЧ. При больших уровнях мощности полное сопротивление диода обусловлено в основном сопротивлением базы, которое играет роль ограничителя мощности, проходящей по линии передачи. Принцип работы этих диодов основан на изменении полного сопротивления в зависимости от величины и полярности приложенного напряжения. Различают резонансные и p-i-n диоды.

Генераторные диоды. Диоды Ганна. В 1963 г. сотрудник фирмы IBM Дж. Ганн обнаружил, что при приложении к кристаллу арсенида галлия напряжения, создающего напряженность электрического поля более 10^5 В/см, возникают колебания высокой частоты. Исследования показали, что такое явление, названное *эффектом Ганна*, наблюдается и у кристаллов некоторых других соединений. Этот процесс объясняется эффектом образования при критических напряженностях поля в кристалле доменов (сгустков) электронов и их перемещения от одного электрода к другому (рис. 4.22).

Трудно получить величину L менее 10 мкм, поэтому частоты сигналов, генерируемых диодами Ганна, не превышают 10^{10} Гц. При этом критическая напряженность поля достигается при напряжении 5...40 В, что является препятствием для получения больших мощностей колебаний.

Исследования показали, что возможно создание генераторов Ганна мощностью 400 кВт в импульсе и частотой до 50 ГГц.

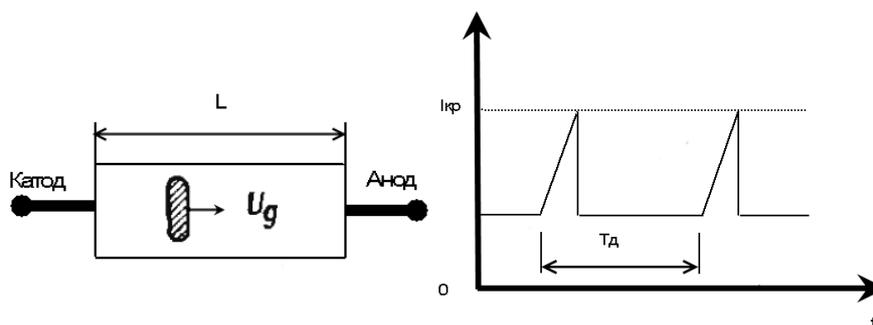


Рис. 4.22. Пояснения к работе диода Ганна

Лавинно-пролетные диоды (ЛПД). Лавинно-пролетными называют диоды с отрицательным сопротивлением в диапазоне СВЧ, обусловленным лавинным размножением носителей зарядов в p-n-переходе и ограничением скорости их дрейфа. В основе действия ЛПД лежит пробой p-n-перехода. При пробое p-n-перехода возникшие электронно-дырочные пары

двигаются в области объемного заряда (область i) в сильном электрическом поле (более 5000 кВ/м) (рис. 4.23). При такой напряженности поля скорость дрейфа электронов не увеличивается с ростом электрического поля. Это насыщение скорости вызывает сдвиг фаз между током и переменным напряжением, прикладываемым к диоду. Выбором режима и ширины области объемного заряда можно добиться сдвига фаз на 180° . Нарастанию напряжения при этом соответствует уменьшение тока, т.е. диод имеет отрицательное сопротивление. Это позволяет использовать такие диоды в качестве генераторов СВЧ колебаний.

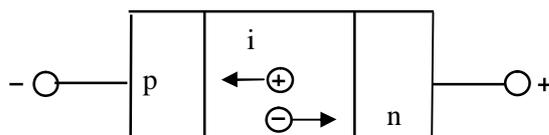


Рис 4.23. Структура лавинно-пролетного диода с р-і-п-переходом

Кроме рассмотренной структуры, существуют ЛПД с р-п-переходом типа $p^+ - n - i - n^+$ ($n^+ - p - i - p^+$). Последние были предложены Ридом в 1964 г., их называют *диодами Рида*.

ЛПД изготавливают из германия, кремния и арсенида галлия. Их рабочие частоты достигают сотен гигагерц при мощности колебаний до десятков ватт в импульсе. Недостатком таких диодов является низкий КПД, что обусловлено узким диапазоном амплитуды переменного напряжения, при котором существует отрицательное сопротивление.

К *тоннельным* относятся диоды, у которых за счет тоннельного эффекта на прямой ветви вольт-амперной характеристики существует область с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Вторым элементом их обозначения является буква И.

Тоннельный переход электронов через р-п-переход возможен, если толщина перехода мала и энергетическим уровням, заполненным электронами в одной области, соответствуют такие же свободные разрешенные энергетические уровни в соседней области.

Время тоннельного прохождения электронов через переход составляет 10^{-13} с. На самом деле тоннельные диоды работают с меньшим быстродействием из-за емкости диода и потерь.

В состоянии равновесия электроны могут совершать тоннельные переходы в обоих направлениях, в результате чего суммарный ток равен нулю (рис. 4.24, участок *а*). Небольшое прямое напряжение уменьшает высоту энергетического барьера, что отражено на рис. 4.24, участок *б*. В результате свободные энергетические уровни окажутся на одной высоте с

энергетическими уровнями электронов n-области, расположенными ниже уровня Ферми в n-области. Вследствие этого электроны будут туннелировать из зоны проводимости n-полупроводника в валентную зону p-полупроводника. Максимальный туннельный ток соответствует полному взаимному перекрытию рассматриваемых энергетических зон (см. рис. 4.24, участок *в*). Дальнейший рост прямого напряжения на диоде уменьшает взаимное перекрытие зон (рис. 4.24, участок *г*), что приводит в конечном счете к нулевой величине туннельного тока. При этом существенное влияние на общий ток оказывает инжекционная составляющая, которая, как и в обычном диоде, резко увеличивается с ростом прямого напряжения (см. рис. 4.24, участки *д*, *е*).

При обратном включении рост обратного напряжения увеличивает это взаимное перекрытие. Электроны из валентной зоны p-полупроводника будут туннелировать в зону проводимости n-полупроводника (см. рис. 4.24, участок *ж*). Это явление можно считать туннельным пробоем, при котором величина обратного тока значительно превышает ток экстракции обычных полупроводниковых диодов.

По своему назначению туннельные диоды делятся на усилительные, генераторные, переключательные. Тоннельные диоды позволяют создавать усилители, генераторы, смесители в диапазоне волн вплоть до миллиметровых. На туннельных диодах можно строить и различные импульсные устройства: триггеры, мультивибраторы и спусковые схемы с очень малым временем переключения.

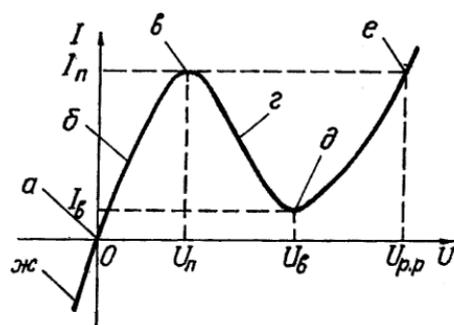
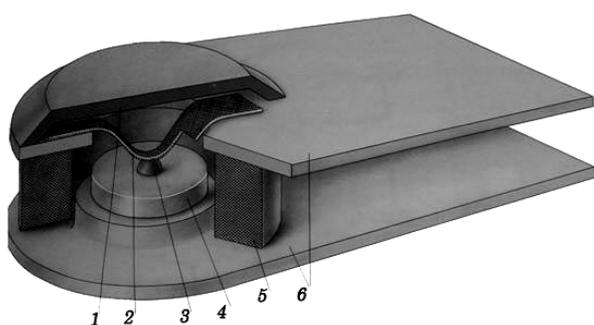


Рис. 4.24. Конструкция и вольт-амперная характеристика туннельного диода:

- 1 – крышка; 2 – верхний электрод; 3 – капля; 4 – кристалл;
- 5 – изолятор; 6 – золоченые выводы

Обращенными называют полупроводниковые диоды, в которых вследствие туннельного эффекта проводимость при обратном напряжении значительно больше, чем при прямом. Это достигнуто введением критической концентрации примесей в структуру туннельного диода.

При включении такого диода в обратном направлении за счет туннельного эффекта электроны из валентной зоны n-области переходят на свободные уровни зоны проводимости n-области, и через переход проходит большой обратный ток. Если включить диод в прямом направлении, то перекрытия зон не происходит, туннельный эффект не появляется и прямой ток определяется лишь диффузионным током. Поскольку у этих диодов прямой ток меньше обратного, они названы обращенными (рис. 4.25). Третьим элементом обозначения этих диодов является цифра 4.

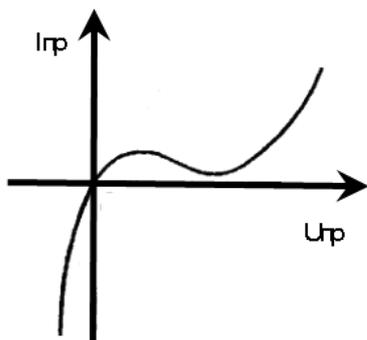


Рис. 4.25. Характеристика обращенного диода

Малая инерционность, низкий уровень собственных шумов, связанные с туннельным прохождением тока, и большая кривизна характеристики обуславливают целесообразность использования обращенных диодов в детекторах и смесителях диапазонов СВЧ, в качестве переключательных и т.д.

Первые отечественные серийные диоды (кристаллические детекторы)

Еще на заре зарождения радиотехники, когда только начали входить в технику связи первые безламповые приемники, кристаллический детектор играл важную роль, с его помощью преобразовывались принимаемые сигналы. Сначала для детектирования употреблялись естественные кристаллы, такие как галенит, пирит, цинкит, оловянный камень, карборунд, арсенопирит, медный колчедан и другие.

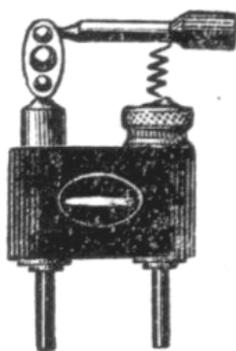


Рис 4. 26. Внешний вид одного из первых диодов

Кристаллический детектор (рис. 4.26) представлял собой систему, включающую чашечку с впаянным в нее каким-нибудь детектирующим кристаллом и подвижную контактную пружину с заостренным концом. При работе с таким детектором всегда приходилось находить на поверхности кристалла нужную чувствительную точку, что было весьма неудобным. В течение нескольких лет кристаллические детекторы успешно применялись в беспроводной связи, пока не начался промышленный выпуск электронных ламп, внесших в радиотехнику подлинную революцию. Многие были уверены, что кристаллические детекторы никогда больше не понадобятся.

Однако это предвидение не оправдалось. Интенсивное развитие коротковолновой и военной техники привело к тому, что пришлось снова обратиться к ним. Оказалось, что электронная лампа в силу присущих ей некоторых недостатков не может хорошо выполнять свои функции в радиотехнических устройствах, работающих на очень коротких волнах. Физики вспомнили, что кристаллические детекторы лишены этих недостатков, и начали разрабатывать новые, современные типы детекторов. Их усилия увенчались успехом, и радиотехники получили в свое распоряжение детекторы, изготовленные из кремния и германия.

Конструкции и внешний вид первых советских серийных диодов приведены на рис. 4.27 (материалы с <http://www.leninburg.com/trans/>).

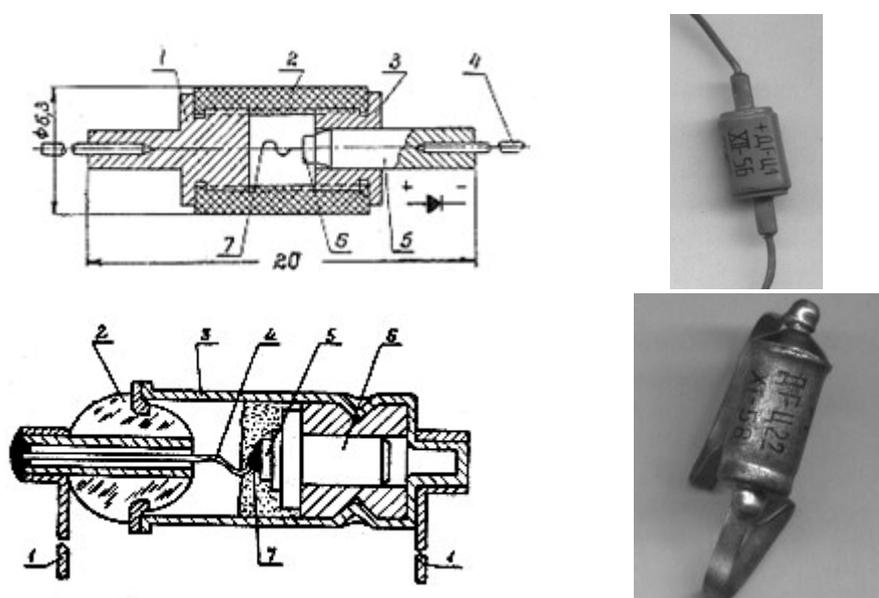


Рис. 4.27. Первые советские серийные диоды:

- 1 и 3 – нижний и верхний штырьки детектора; 2 – керамический патрон;
- 4 – проволочные выводы; 5 – кристаллодержатель; 6 – германиевый кристаллик;
- 7 – контактная пружинка (к верхней схеме)

Конструкция современного кристаллического германиевого детектора несложна. Небольшой германиевый кристаллик с электронным механизмом проводимости припаивается к нижней ножке детектора. Наружная поверхность кристаллика тщательно отполировывается и затем подвергается химической обработке. В результате этой обработки тонкий поверхностный слой кристаллика приобретает новые свойства – механизм его электропроводности становится дырочным. Следовательно, вместо прежде однородного по своим электрическим свойствам кристаллика получается кристаллик, в котором электронный германий непосредственно контактирует с дырочным.

На рис. 4.28 показан внешний вид диодов Д2.



Рис. 4.28. Популярные диоды Д2 в двух вариантах исполнения

Контрольные вопросы

1. Перечислите признаки, положенные в основу классификации полупроводниковых диодов.
2. Расскажите о системе маркировки диодов.
3. Приведите УГО различных типов диодов.
4. Расскажите об особенностях конструкции диодов, названиях электродов.
5. Перечислите основные параметры диодов и укажите особенности диодов различного типа.
6. Чем отличается стабилитрон от стабистора?
7. Что такое TVS диод?
8. Варикап: принцип действия, схема включения, применение, параметры.
9. Как ведет себя добротность варикапа с ростом частоты и почему?
10. Особенности работы, конструкции и параметры импульсных диодов.
11. СВЧ диоды: конструкция, разновидности, применение.

Список использованных литературных источников

1. Москатов, Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
2. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие / К. С. Петров. – СПб. : Питер, 2003. – 512 с. : ил.
3. Валенко, В. С. Электроника и микросхемотехника : учеб. пособие / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Минск : Беларусь, 2000. – 320 с. : ил.
4. Булычев, А. Л. Электронные приборы / А. Л. Булычев и др. – М. : ЛайтЛтд., 2000. – 416 с. : ил.
5. Шелестов, И. П. Радиолюбителям : полезные схемы. Кн. 5 / И. П. Шелестов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 240 с. : ил.
6. Гуртов, А. В. Твердотельная электроника : учеб. пособие / А. В. Гуртов. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2004. – 312 с.
7. Полупроводниковые приборы : справочник. Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы / под общ. ред. Н. А. Горюнова. – М. : Энергоиздат, 1987. – 743 с.
8. Полупроводниковые приборы : справочник. Транзисторы / под общ. ред. И. А. Горюнова. – М. : Энергоиздат, 1985.

РАЗДЕЛ 4. ТРАНЗИСТОРЫ

Содержание раздела

Биполярные транзисторы

Устройство и принцип действия. Схемы включения. Основные режимы работы: активный, отсечки, насыщения, инверсный. Принцип действия транзистора: физические процессы в эмиттерном переходе, базе и коллекторном переходе; распределение неосновных носителей в базе при различных режимах. Эффект модуляции ширины базы. Токи в транзисторе; коэффициенты передачи тока в схемах с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ).

Физические параметры транзистора: коэффициент передачи тока, дифференциальные сопротивления и емкости переходов, объемные сопротивления областей. Статические характеристики транзистора. Модель идеализированного транзистора (модель Эберса – Молла). Характеристики реального транзистора в схемах с ОБ и ОЭ. Влияние температуры на характеристики транзистора.

Транзистор как линейный четырехполюсник. Понятие малого сигнала. Системы Z, Y, H параметров и схемы замещения транзистора. Связь h-параметров с физическими параметрами транзистора. Определение h-параметров по статическим характеристикам. Зависимость h-параметров от режима работы и температуры. T- и П-образные эквивалентные схемы транзисторов.

Работа транзистора с нагрузкой. Построение нагрузочной прямой. Принцип усиления. Особенности работы транзистора на высоких частотах. Физические процессы, определяющие частотные параметры транзистора. Предельная и граничная частоты, максимальная частота транзистора на высоких частотах.

Работа транзистора в импульсном режиме. Физические процессы накопления и рассасывания носителей заряда. Импульсные параметры транзистора. Разновидности и перспективы развития биполярных транзисторов.

Полевые транзисторы

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом. Устройство, схемы включения. Принцип действия, физические процессы, влияние напряжений электродов на ширину p-n-перехода и форму канала. Статические характеристики, области отсечки, насыщения и пробоя p-n-перехода.

Полевой транзистор с барьером Шоттки. Устройство, принцип действия. Характеристики и параметры.

Полевые транзисторы с изолированным затвором. МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналами. Устройство, схемы включения. Режимы обеднения и обогащения в транзисторе со встроенным каналом и его статические характеристики. Факторы, определяющие частотные свойства. Предельная частота. Эквивалентная схема на высоких частотах. Области применения полевых транзисторов. Сравнение полевых и биполярных транзисторов. Перспективы развития и применения полевых транзисторов.

Методические указания

Биполярные транзисторы[1, с. 79 – 179; 2, с. 91 – 112; 3, с. 56 – 81]

При изучении данного материала основное внимание следует уделить физическим процессам, протекающим в транзисторе, а также режимам работы.

Необходимо ознакомиться с классификацией транзисторов по различным признакам и знать систему обозначений в соответствии с ГОСТ. Знать схемы включения транзисторов.

Изучение статических характеристик транзистора при включении с общей базой и с общим эмиттером необходимо производить, хорошо зная принцип работы транзистора.

Знать причины, вызывающие смещение характеристик при изменении температуры.

Для описания усилительных свойств транзистора в режиме малого сигнала вводят малосигнальные параметры, рассматривая транзистор как четырехполюсник. Особое внимание следует уделить системам гибридных H-параметров, методике определения этих параметров по статическим характеристикам. Уметь составить эквивалентные схемы и объяснить частотные свойства транзисторов.

При изучении транзистора в схеме усилителя необходимо овладеть методикой построения нагрузочных характеристик на семействах входных и выходных характеристик, необходимо знать физический смысл параметров режима усиления.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте классификацию транзисторов.
2. Расскажите об устройстве и принципе действия биполярного транзистора.
3. В какой из областей транзистора концентрация примеси выше: в области базы или в области эмиттера?

4. С какой целью площадь коллекторного перехода обычно делают существенно большей по сравнению с площадью эмиттерного перехода?
5. Назовите три основных режима работы транзистора.
6. Что такое коэффициент инжекции (эффективность эмиттера)? Почему он должен быть как можно более близок к единице?
7. Что такое коэффициент переноса? От каких параметров базы зависит его величина?
8. Как связаны между собой коэффициент усиления по току, эффективность эмиттера и коэффициент переноса?
9. Нарисуйте три схемы включения биполярного транзистора. Каковы особенности каждой из этих схем?
10. Нарисуйте семейства входных и выходных характеристик транзистора в схеме с общей базой.
11. Нарисуйте семейства входных и выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером.
12. Определите h -параметры транзистора по статическим характеристикам.
13. Что называется предельной частотой усиления по току?
14. Как зависит коэффициент передачи тока от частоты в схеме с общей базой и в схеме с общим эмиттером?
15. Дайте определение максимальной частоты генерации транзистора. Как она связана с $f_{гр}$?
16. В какой схеме – с общей базой или с общим эмиттером – выше предельная частота коэффициента передачи тока и примерно во сколько раз?
17. Как влияет время рассасывания носителей заряда в базе на частотные свойства транзистора?
18. Чем характеризуется ключевой режим работы транзистора?

Полевые транзисторы [1, с. 180 – 213; 2, с. 120 – 136; 3, с. 82 – 99]

В результате изучения данного материала необходимо знать устройство и принцип действия полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом, МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналами, их характеристики и параметры, уметь определять малосигнальные параметры по статическим характеристикам, иметь четкие представления о влиянии режима работы и температуры на характеристики и параметры полевых транзисторов. Области применения полевых транзисторов.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим р-п-переходом.
2. Нарисуйте стокзатворную характеристику полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и поясните ее ход.
3. Для чего канал полевого транзистора с управляющим р-п-переходом изготавливают из слаболегированного полупроводника?
4. В чем состоит различие между МДП-транзисторами с индуцированным и встроенным каналами?
5. Почему входное дифференциальное сопротивление полевого транзистора с изолированным затвором больше, чем у полевого транзистора с управляющим р-п-переходом?
6. Какие основные отличия стоковых характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом от аналогичных характеристик:
 - а) полевого транзистора с управляющим р-п-переходом;
 - б) МДП-транзистора со встроенным каналом.
7. Назовите дифференциальные параметры полевого транзистора.
8. Что такое режим обеднения и обогащения?
9. Почему уровень шума полевых транзисторов меньше, чем биполярных?

Рекомендуемая литература

1. Булычев, А. Л. Электронные приборы / А. Л. Булычев и др. – М. : ЛайтЛтд, 2000. – 416 с. : ил.
2. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк. 1991. – 622 с. : ил.
3. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.

Тема 5. Биполярные транзисторы. Устройство, классификация и принцип действия биполярных транзисторов

Термины: *классификация, система обозначений, УГО, конструкция, коллектор, диффузионные и дрейфовые транзисторы, ширина базы, площади переходов, режимы работы: активный, отсечки, насыщения, инверсный, эффективность эмиттера, коэффициент инжекции, коэффициент перехода (переноса), основное соотношение токов в транзисторе, основные механизмы в действии транзистора, схемы включения ОБ, ОЭ, ОК, эмиттерный повторитель.*

5.1. Классификация и маркировка транзисторов

5.2. Устройство биполярных транзисторов

5.3. Принцип действия биполярных транзисторов

5.4. Схемы включения биполярных транзисторов

5.1. Классификация и маркировка транзисторов

Транзистором называется полупроводниковый преобразовательный прибор, имеющий, как правило, не менее трех выводов и два р-п-перехода (исключение составляют некоторые виды фототранзисторов и однопереходные транзисторы) и способный усиливать мощность. Классификация транзисторов производится по следующим признакам:

- По материалу полупроводника – обычно германиевые или кремниевые, арсенид-галлиевые, гетеропереходные.
- По типу проводимости областей (только биполярные транзисторы) – с прямой проводимостью (р-п-р-структура) или с обратной проводимостью (п-р-п-структура).
- По характеру переноса носителей заряда транзисторы подразделяются на биполярные и полевые (униполярные).
- По частотным свойствам:
 - низкой частоты (НЧ) (<3 МГц);
 - среднечастотные (СрЧ) (3...30 МГц);
 - высокочастотные (ВЧ) (30...300 МГц);
 - сверхвысокочастотные (СВЧ) (>300 МГц).
- По числу переходов – однопереходные, двухпереходные и многопереходные.
- По технологии изготовления транзисторы бывают сплавные, диффузионные, эпитаксиальные, планарные.

- По мощности – маломощные транзисторы ($< 0,3$ Вт), средней мощности ($0,3 \dots 1,5$ Вт), мощные ($> 1,5$ Вт).

В табл. 5.1 приведены примеры маркировки транзисторов.

Таблица 5.1

Маркировка транзисторов

Г(1)	Т	313	А
К(2)	П	103	Л
I	II	III	IV

I – материал полупроводника – Г(1) – германий, К(2) – кремний, А(3) – арсенид галлия и т.д.

II – тип транзистора по принципу действия – Т – биполярные, П – полевые.

III – три или четыре цифры – группа транзисторов по электрическим параметрам.

Первая цифра показывает частотные свойства и мощность транзистора в соответствии с нижеприведенной табл. 5.2.

Таблица 5.2

Принцип формирования первой цифры маркировки в группе электрических параметров

Мощность/Частота	< 3 МГц (низкой частоты)	$3 \dots 30$ МГц (средней частоты)	> 30 МГц (высокой и сверхвысокой частоты)
Малой $< 0,3$ Вт	1	2	3
Средней $0,3 \dots 1,5$ Вт	4	5	6
Большой $> 1,5$ Вт	7	8	9

IV – модификация транзистора в 3-й группе.

Как видно на рис. 5.1, существует несколько вариантов маркировки, в том числе сокращенно-кодированная, или цветовая. Пояснения можно найти в соответствующих справочниках.

Изображения транзисторов в схемах приводят согласно ГОСТ 2.730-73. Некоторые примеры приведены в табл. 5.3.

На электрических принципиальных схемах позиционное обозначение транзисторов начинается с букв VT (ГОСТ 2.710-81 «Буквенно-цифровые обозначения в схемах»), на зарубежных – Т или U (DIN – западно-европейский стандарт), или Q (ANSI – северно-американский стандарт).

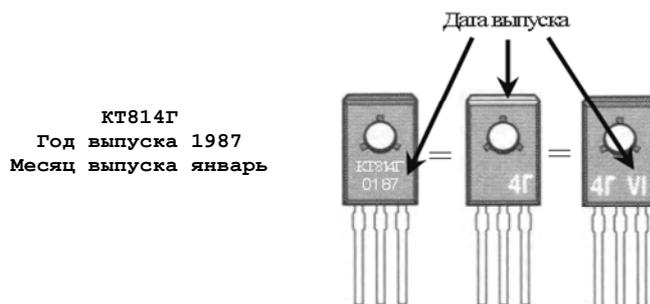


Рис. 5.1. Варианты маркировки

Таблица 5.3

Условные графические изображения некоторых типов транзисторов

Транзистор биполярный с р-п-переходом	УГО
типа р-п-р	
типа р-п-р с выводом от внутреннего экрана	
типа п-р-п с дополнительным экранирующим выводом от металлизированного корпуса	
типа п-р-п	
лавинный типа п-р-п	
однопереходный с п-базой	
однопереходный с р-базой	
типа р-п-р двухбазовый	
типа р-п-і-р	
Транзистор р-п-р бескорпусный для гибридных ИМС или интегральный (в составе ИМС)	
многоэмиттерный типа п-р-п	

5.2. Устройство биполярных транзисторов

Основой биполярного транзистора (bipolar transistor) является кристалл полупроводника р-типа или n-типа проводимости, который так же, как и вывод от него, называется базой (рис 5.2).

Диффузией примеси или сплавлением с двух сторон от базы образуются области с противоположным типом проводимости, нежели база.

Область, имеющую большую площадь р-п-перехода, и вывод от нее называют коллектором. Область, имеющую меньшую площадь р-п-перехода, и вывод от нее называют эмиттером, р-п-переход между коллектором и базой называют коллекторным переходом, а между эмиттером и базой – эмиттерным переходом. Условные графические обозначения приведены в табл. 5.3 и на рис. 5.2, б.

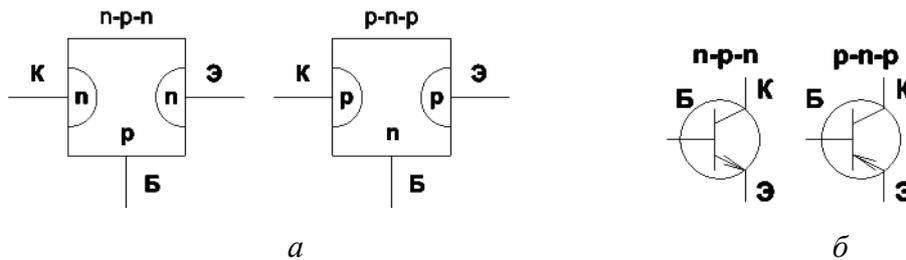


Рис. 5.2. Конструкция (а) и изображения на схемах (б) транзисторов различного типа проводимости

При равномерном распределении примеси в базе внутреннее электрическое поле в ней отсутствует, и неосновные носители движутся вследствие процесса диффузии. Такие транзисторы называют диффузионными или бездрейфовыми. При неравномерном распределении примесей в базе имеется внутреннее электрическое поле, и неосновные носители движутся в ней в результате дрейфа и диффузии. Такие транзисторы называют дрейфовыми.

Направление стрелки в транзисторе показывает направление протекающего тока.

Первой особенностью устройства биполярных транзисторов является неравномерность концентрации основных носителей зарядов в эмиттере, базе и коллекторе. В эмиттере концентрация носителей заряда максимальная. В коллекторе – несколько меньше, чем в эмиттере. В базе – во много раз меньше, чем в эмиттере и коллекторе (рис. 5.3).

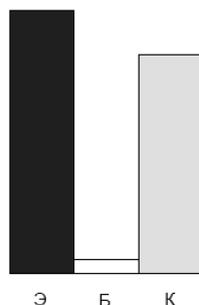


Рис. 5.3. Степень легирования областей транзистора

Второй особенностью конструкции является ширина базы – она должна быть соизмерима с диффузионной длиной неосновных носителей заряда.

Третьей особенностью является то, что площадь коллекторного перехода больше, чем эмиттерного, это связано с тем, что из-за меньшей степени легирования сопротивление коллектора больше, чем эмиттера, и значит, сильнее разогрев этой области.

5.3. Принцип действия биполярных транзисторов

При работе транзистора в усилительном режиме эмиттерный переход открыт, а коллекторный закрыт. Это достигается соответствующим включением источников питания.

В зависимости от полярности внешних напряжений, подаваемых на электроды транзистора, различают следующие режимы его работы:

1. Активный режим – эмиттерный переход смещен в прямом направлении (открыт), а коллекторный – в обратном направлении (закрыт) (рис. 5.4.).

2. Режим отсечки – оба перехода смещены в обратном направлении (закрыты).

3. Режим насыщения – оба перехода смещены в прямом направлении (открыты).

4. Инверсный режим – коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном. В таком режиме коллектор выполняет роль эмиттера, а эмиттер – роль коллектора. При инверсном включении параметры реального транзистора существенно отличаются от параметров при нормальном включении.

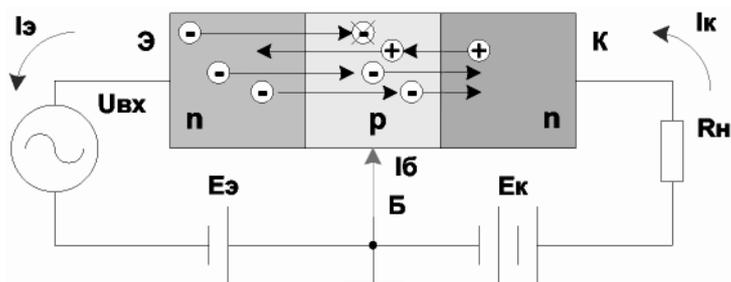


Рис. 5.4. Процесс работы транзистора в схеме с общей базой

Так как эмиттерный переход открыт, то через него будет протекать ток эмиттера, вызванный переходом электронов из эмиттера в базу и переходом дырок из базы в эмиттер. Следовательно, ток эмиттера будет иметь две составляющие – электронную и дырочную. *Эффективность эмиттера оценивается коэффициентом инжекции:*

$$\gamma = \frac{I_{э.н.}}{I_э} (0,999);$$

$$I_э = I_{э.н.} + I_{э.р.}$$

Инжекцией зарядов называется переход носителей зарядов из области, где они были основными, в область, где они становятся неосновными. В базе электроны рекомбинируют, а их концентрация в базе пополняется от «+» источника $E_э$, за счет чего в цепи базы будет протекать очень малый ток. Оставшиеся электроны, не успевшие рекомбинировать в базе, под ускоряющим действием поля закрытого коллекторного перехода как неосновные носители будут переходить в коллектор, образуя ток коллектора. Переход носителей зарядов из области, где они были неосновными, в область, где они становятся основными, называется экстракцией зарядов. Степень рекомбинации носителей зарядов в базе оценивается *коэффициентом перехода (переноса)* носителей зарядов δ :

$$\delta = \frac{I_{к.н.}}{I_{э.н.}}$$

Основное соотношение токов в транзисторе:

$$I_э = I_к + I_б;$$

$$\delta \cdot \gamma = \frac{I_{э.н.} \cdot I_{к.н.}}{I_э \cdot I_{э.н.}} = \frac{I_{к.н.}}{I_э} = \alpha,$$

где α – коэффициент передачи тока транзистора или коэффициент усиления по току.

$$I_к = \alpha \cdot I_э.$$

Дырки из коллектора как неосновные носители зарядов будут переходить в базу, образуя обратный ток коллектора $I_{кб0}$. Таким образом, полный ток коллектора содержит управляемую и неуправляемую составляющие:

$$I_к = \alpha \cdot I_э + I_{кб0}.$$

Из трех выводов транзистора на один подается входной сигнал, со второго снимается выходной сигнал, а третий вывод является общим для входной и выходной цепи. Таким образом, рассмотренная выше схема получила название схемы с общей базой.

Схема включения транзистора в схеме с общей базой приведена на рис. 5.5.

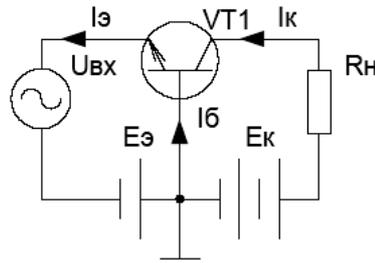


Рис. 5.5. Схема включения транзистора в схеме с общей базой

$$I_{вх} = I_{э};$$

$$I_{вых} = I_{к};$$

$$U_{вх} = U_{эб};$$

$$U_{вых} = U_{кб}.$$

Напряжение в транзисторных схемах обозначается двумя индексами в зависимости от того, между какими выводами транзистора эти напряжения измеряются.

Так как все токи и напряжения в транзисторе помимо постоянной составляющей имеют еще и переменную составляющую, то ее можно представить как приращение постоянной составляющей и при определении любых параметров схемы пользоваться либо переменной составляющей токов и напряжений, либо приращением постоянной составляющей (рис. 5.6).

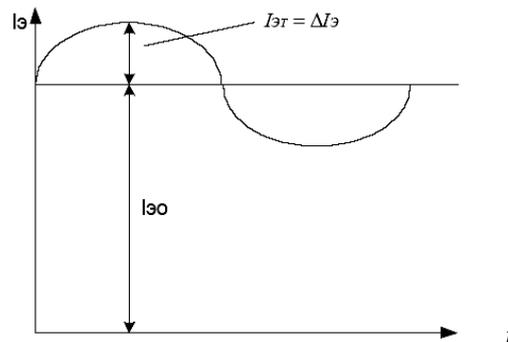


Рис. 5.6. Постоянные и переменные составляющие тока эмиттера

$$\alpha_{=} = \frac{I_{к}}{I_{э}};$$

$$\alpha_{\approx} = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{э}},$$

где $I_{к}$, $I_{э}$ – постоянные составляющие коллекторного и эмиттерного тока; $\Delta I_{к}$, $\Delta I_{э}$ – переменные составляющие.

Т.о. перечислим основные механизмы в действии биполярного транзистора:

1. Инжекция основных носителей заряда из эмиттера в базу через прямосмещенный эмиттерный переход, где они станут неосновными (из-за несимметричного перехода).

2. Частичная рекомбинация в базе и диффузия к обратносмещенному коллекторному переходу.

3. Захват неосновных носителей в базе ускоряющим (для них) полем коллекторного перехода и выведение (экстракция) через коллекторную область.

5.4. Схемы включения биполярных транзисторов

Схемы включения транзисторов получили свое название в зависимости от того, какой из выводов транзисторов будет являться общим для входной и выходной цепи.

5.4.1. Схема включения с общей базой

Схема включения с общей базой приведена на рис. 5.5.

Каждая схема включения транзистора характеризуется следующими основными показателями:

- коэффициент усиления по току $K_I = I_{\text{вых.}}/I_{\text{вх.}}$ (для ОБ – α , для ОЭ – β , для ОК – γ);
- коэффициент усиления по напряжению $K_u = U_{\text{вых.}}/U_{\text{вх.}}$;
- коэффициент усиления по мощности $K_p = K_I K_u$;
- входное сопротивление $R_{\text{вх.}} = U_{\text{вх.}}/I_{\text{вх.}} = U_{\text{бэ}}/I_{\text{э}}$.

Входное сопротивление для схемы с общей базой мало и составляет десятки Ом, так как входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

Недостатки схемы с общей базой:

- Схема не усиливает ток (для схемы с общей базой $I_{\text{вых.}}/I_{\text{вх.}} = I_{\text{к}}/I_{\text{э}} = \alpha$ ($\alpha < 1$)).
- Малый коэффициент усиления по напряжению (100) и по мощности (< 100).
- Малое входное сопротивление $n = 10$ Ом.
- Два разных источника напряжения для питания.

Достоинства – хорошие температурные и частотные свойства.

5.4.2. Схема включения с общим эмиттером

Эта схема, изображенная на рис. 5.7, является наиболее распространенной, так как она дает наибольшее усиление по мощности.

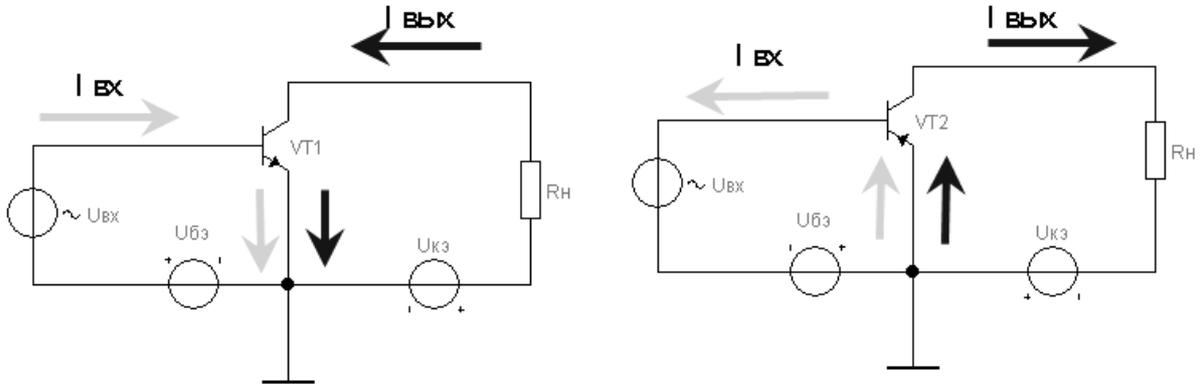


Рис. 5.7. Схемы включения транзисторов различной проводимости в схеме с общим эмиттером

$$I_{вх} = I_{б};$$

$$I_{вых} = I_{к};$$

$$U_{вх} = U_{бэ};$$

$$U_{вых} = U_{кэ};$$

$$\beta = I_{вых} / I_{вх} = I_{к} / I_{б} \quad (n: 10 \dots 100);$$

$$K_u \approx 10 \dots 100;$$

$$K_p \approx 1000 \dots 10000;$$

$$R_{вх.э} = U_{вх} / I_{вх} = U_{бэ} / I_{б} \quad [\text{Ом}] \quad (n: 100 \dots 1000).$$

Коэффициент усиления по току такого каскада представляет собой отношение амплитуд (или действующих значений) выходного и входного переменного тока, то есть переменных составляющих токов коллектора и базы. Поскольку ток коллектора в десятки раз больше тока базы, то коэффициент усиления по току составляет десятки единиц.

Коэффициент усиления каскада по напряжению равен отношению амплитудных или действующих значений выходного и входного переменного напряжения. Входным является переменное напряжение база – эмиттер $U_{бэ}$, а выходным – переменное напряжение на резисторе нагрузки R_n или, что то же самое, между коллектором и эмиттером – $U_{кэ}$.

Напряжение база – эмиттер не превышает десятых долей вольта, а выходное напряжение при достаточном сопротивлении резистора нагрузки и напряжении источника E_k достигает единиц, а в некоторых случаях и де-

сятков вольт. Поэтому коэффициент усиления каскада по напряжению имеет значение от десятков до сотен. Отсюда следует, что коэффициент усиления каскада по мощности получается равным сотням или тысячам, или даже десяткам тысяч. Этот коэффициент представляет собой отношение выходной мощности к входной. Каждая из этих мощностей определяется половиной произведения амплитуд соответствующих токов и напряжений. Входное сопротивление схемы с общим эмиттером мало (от 100 до 1000 Ом). Каскад по схеме ОЭ при усилении переворачивает фазу напряжения, т.е. между выходным и входным напряжением имеется фазовый сдвиг 180° .

Достоинства схемы с общим эмиттером:

- Большой коэффициент усиления по току.
- Больше, чем у схемы с общей базой, входное сопротивление.
- Для питания схемы требуются два однополярных источника, что позволяет на практике обходиться одним источником питания.

Недостатки: худшие, чем у схемы с общей базой, температурные и частотные свойства. Однако за счет преимуществ схема с ОЭ применяется наиболее часто.

5.4.3. Схема включения с общим коллектором

Схема включения с общим коллектором приведена на рис. 5.8.

$$I_{вх} = I_{б};$$

$$I_{вых} = I_{э};$$

$$U_{вх} = U_{бк};$$

$$U_{вых} = U_{эк};$$

$$\gamma = I_{вых} / I_{вх} = I_{э} / I_{б} = (I_{к} + I_{б}) / I_{б} = \beta + 1 = n = 10 \dots 100;$$

$$K_u \approx 1;$$

$$K_p \approx 10;$$

$$R_{вх} = U_{бк} / I_{б} = n(10 \dots 100) \text{ кОм}$$

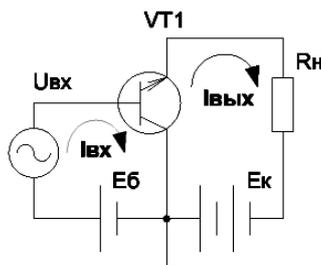


Рис. 5.8. Схема с общим коллектором

В схеме с ОК (см. рис. 5.8) коллектор является общей точкой входа и выхода, поскольку источники питания E_b и E_k всегда шунтированы конденсаторами большой емкости и для переменного тока могут считаться короткозамкнутыми. Особенность этой схемы состоит в том, что входное напряжение полностью передается обратно на вход, т.е. очень сильна отрицательная обратная связь. Нетрудно видеть, что входное напряжение равно сумме переменного напряжения база – эмиттер $U_{бэ}$ и выходного напряжения. Коэффициент усиления по току каскада с общим коллектором почти такой же, как и в схеме с ОЭ, т.е. равен нескольким десяткам. Однако в отличие от каскада с ОЭ, коэффициент усиления по напряжению схемы с ОК близок к единице, причем всегда меньше ее. Переменное напряжение, поданное на вход транзистора, усиливается в десятки раз (так же, как и в схеме ОЭ), но весь каскад не дает усиления. Коэффициент усиления по мощности равен примерно нескольким десяткам. Рассмотрев полярность переменных напряжений в схеме, можно установить, что фазового сдвига между $U_{вых.}$ и $U_{вх.}$ нет. Значит, выходное напряжение совпадает по фазе с входным и почти равно ему. То есть, выходное напряжение повторяет входное. Именно поэтому данный каскад обычно называют эмиттерным повторителем и изображают схему так, как показано на рис. 5.9. Эмиттерным – потому, что резистор нагрузки включен в провод вывода эмиттера и выходное напряжение снимается с эмиттера (относительно корпуса).

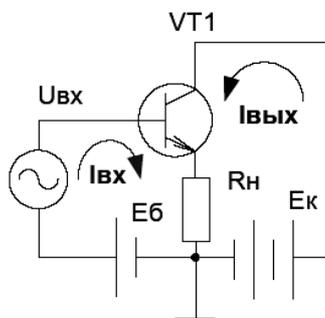


Рис. 5.9. Эмиттерный повторитель

Так как входная цепь представляет собой закрытый коллекторный переход, входное сопротивление каскада по схеме ОК составляет десятки килоом, что является важным достоинством схемы. Выходное сопротивление схемы с ОК, наоборот, получается сравнительно небольшим, обычно единицы килоом или сотни ом. Эти достоинства схемы с ОК побуждают использовать ее для согласования различных устройств по входному сопротивлению.

Недостатком схемы является то, что она не усиливает напряжение – коэффициент усиления чуть меньше 1.

5.4.4. Усилительные свойства биполярного транзистора. Независимо от схемы включения транзистор характеризуется тремя коэффициентами усиления:

- $K_I = I_{\text{вых.}} / I_{\text{вх.}}$ – по току;
- $K_U = U_{\text{вых.}} / U_{\text{вх.}} = (I_{\text{вых.}} \cdot R_H) / (I_{\text{вх.}} \cdot R_{\text{вх.}}) = K_I \cdot R_H / R_{\text{вх.}}$ – по напряжению;
- $K_P = P_{\text{вых.}} / P_{\text{вх.}} = (U_{\text{вых.}} \cdot I_{\text{вых.}}) / (U_{\text{вх.}} \cdot I_{\text{вх.}}) = K_I \cdot K_U$ – по мощности.

Для схемы с общей базой:

$$K_I = I_K / I_E = \alpha (\alpha < 1);$$

$$K_U = \alpha \cdot (R_H / R_{\text{вх.}});$$

$$R_H \approx n \cdot 1 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{вх.}} \approx n \cdot 10 \Omega;$$

$$K_U \approx n \cdot 100;$$

$$K_P = K_U \cdot K_I = n \cdot 100.$$

Для схемы с общим коллектором:

$$K_I = I_E / I_B = \beta + 1 = n;$$

$$K_U = \beta \cdot (R_H / R_{\text{вх.}}) \approx n;$$

$$K_U < 1.$$

Для схемы с общим эмиттером:

$$K_I = I_K / I_B = \beta = n \cdot (10 \dots 100);$$

$$K_U = \beta \cdot (R_H / R_{\text{вх.}});$$

$$K_P = K_I \cdot K_U = n \cdot (1000 \dots 10000).$$

Работа усилительного каскада с транзистором происходит следующим образом. Представим транзистор переменным резистором r_0 , последовательно с которым включено нагрузочное сопротивление R_H и источник питания E (рис 5.10). Напряжение источника E делится между сопротивлением нагрузки R_H и внутренним сопротивлением транзистора r_0 , которое он оказывает постоянному току коллектора. Это сопротивление приблизительно равно сопротивлению коллекторного перехода транзистора для постоянного тока. В действительности к этому сопротивлению еще добавляются небольшие сопротивления эмиттерного перехода, а также n- и p-областей, но эти сопротивления сейчас можно не принимать во внимание. Если во входную цепь включается источник колебаний, то при изменении его напряжения изменяется ток эмиттера, а, следовательно, – сопротивление кол-

лекторного перехода. Тогда напряжение источника E будет перераспределяться между R_n и r_0 . При этом переменное напряжение на резисторе нагрузки может быть получено в десятки раз большим, чем входное переменное напряжение. Изменения тока коллектора почти равны изменениям тока эмиттера и во много раз больше изменений тока базы. Поэтому в рассматриваемой схеме получается значительное усиление тока и очень большое усиление мощности. Усиленная мощность является частью мощности, затрачиваемой источником E .

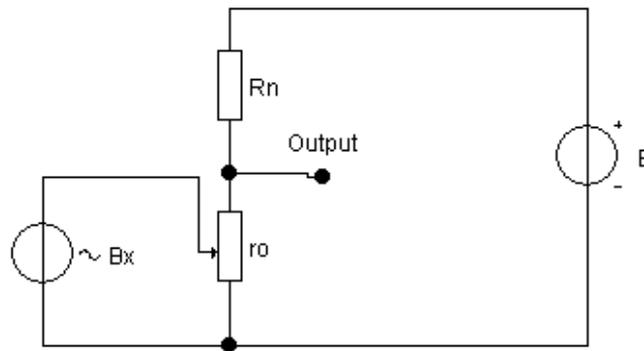


Рис 5.10. Пояснения к принципу усиления транзистора

В табл. 5.4 приведены сравнительные характеристики различных схем включения транзисторов.

Таблица 5.4

Сравнительные характеристики различных схем включения транзисторов

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
K_I	Десятки – сотни	Немного меньше единицы	Десятки – сотни
K_U	Десятки – сотни	Десятки – сотни	Немного меньше единицы
K_p	Сотни – десятки тысяч	Десятки – сотни	Десятки – сотни
$R_{вх.}$	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки ом	Десятки – сотни килоом
$R_{вых.}$	Единицы – десятки килоом	Сотни килоом – единицы мегаом	Сотни ом – единицы килоом
Фазовый сдвиг между $U_{вых.}$ и $U_{вх.}$	180°	0	0

Первые отечественные серийные транзисторы

Первые отечественные серийные транзисторы появились в 1955 г., о чем радостно сообщил журнал «Радио» в номере 6 от 1955 г. В этом номере журнала впервые были даны характеристики первых полупроводниковых триодов, которые в те времена еще назывались кристаллическими приборами. Сначала транзисторы выпускались двух видов – плоскостные, которые получили название П1 с буквой-модификацией (П1А, П1Б и т.д.), и точечные, которые получили название С1 (С1А, С1Б и т.д.). Транзисторы серии П2 были сделаны в таком же корпусе, что и П1, транзисторы серии С2 – в том же корпусе, что и С1.

Общий вид первых советских транзисторов П1А и С1В (информация <http://www.leninburg.com/trans/trans2.htm>) приведен на рис. 5.11.

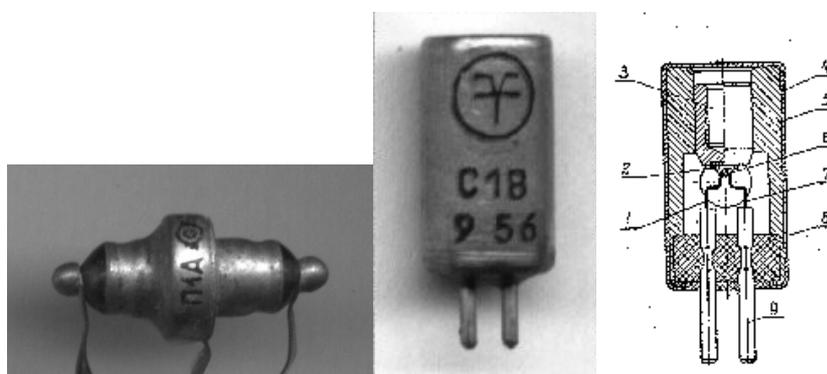


Рис 5.11. Первые советские транзисторы:
1 – эмиттер; 2 – германий; 3 – держатель;
4 – кожух; 5 – корпус; 6 – наполнитель; 7 – коллектор; 8 – втулка; 9 – вывод

Контрольные вопросы

1. Приведите условные графические обозначения транзисторов; как называются электроды и что указывают стрелки?
2. Какие принципы положены в основу классификации и маркировки?
3. В чем особенности конструкций транзистора?
4. Что означает инверсный режим работы и какие другие режимы вам известны?
5. Что такое эффективность эмиттера и коэффициент переноса?
6. Перечислите механизмы в действии биполярного транзистора.
7. Приведите схемы включения транзисторов для режима работы в насыщении.
8. Сравните схемы включения транзистора в активном режиме и приведите их достоинства и недостатки.

Тема 6. Статические характеристики схем включения биполярных транзисторов. Частотные, температурные и электрические параметры

Термины: *входные, выходные статические характеристики, схемы снятия ВАХ, эффект Эрли, нагрузочная прямая, рабочая точка, температурный дрейф рабочей точки, эквивалентная схема транзисторного каскада на высоких частотах, удельные сопротивления областей и емкости переходов, разность фаз и зависимость коэффициента усиления от частоты, векторные диаграммы, предельная и граничная частота, максимальная частота генерации.*

6.1. Статические характеристики транзистора по схеме ОБ

6.2. Статические характеристики транзистора по схеме ОЭ

6.3. Температурные свойства транзисторов

6.4. Частотные свойства транзисторов

6.5. Параметры биполярных транзисторов

6.1. Статические характеристики транзистора по схеме ОБ

Статическим режимом работы транзистора называется такой режим, при котором изменение входного тока или напряжения не вызывает изменения выходного напряжения. Статические характеристики каскада, включенного по схеме с ОБ, измеряются по общей схеме, изображенной на рис. 6.1.

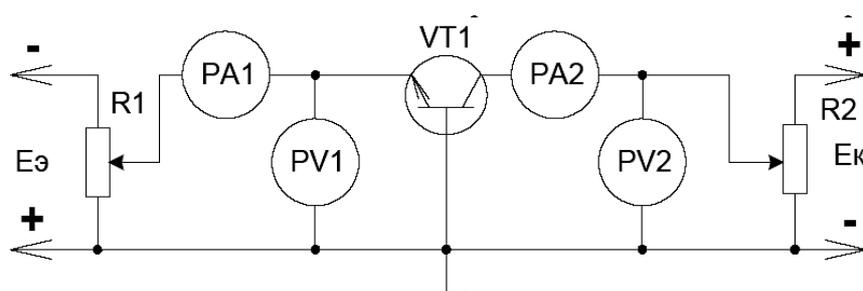


Рис. 6.1. Схема снятия статических ВАХ ОБ

Резистором R_1 (см. схему на рис. 6.1) изменяется напряжение эмиттер – база, а резистором R_2 поддерживается постоянным напряжение $U_{бк}$. Обычно входные характеристики измеряются при двух значениях постоянного напряжения $U_{бк}$ (рис. 6.2).

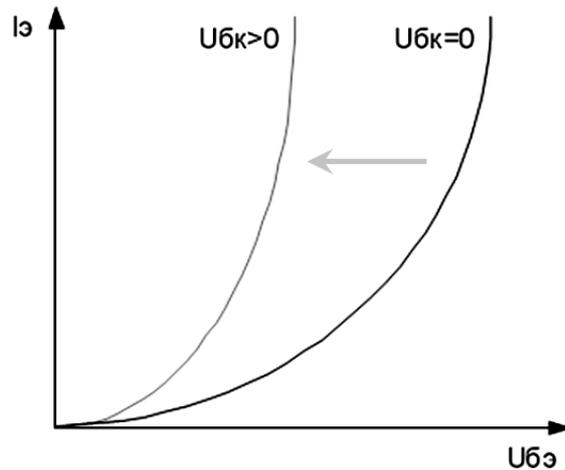


Рис. 6.2. Входные статические характеристики ОБ

6.1.1. Входная характеристика. Входная характеристика – это зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном выходном напряжении.

$$I_{вх.} = f(U_{вх.}) \text{ при } U_{вых.} = \text{const.}$$

Для схемы с ОБ

$$I_э = f(U_{эб}) \text{ при } U_{бк} = \text{const.}$$

Входная характеристика схемы ОБ представляет собой прямую ветвь открытого р-п-перехода (см. рис. 6.2). При увеличении выходного напряжения $U_{кб}$ ширина запирающего слоя коллекторного перехода увеличивается, носители заряда быстрее пролетают базу, меньшее число их рекомбинирует, следовательно, ток базы уменьшается, однако большее число носителей из эмиттера проникает напрямую в область коллектора при неизменном напряжении $U_{эб}$. Поэтому характеристика при $U_{бк} > 0$ будет проходить выше и левее. Этот эффект называется эффектом Эрли.

6.1.2. Выходная характеристика. Это зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе.

$$I_{вых.} = f(U_{вых.}) \text{ при } I_{вх.} = \text{const.}$$

Для схемы включения с общей базой $I_к = f(U_{бк})$ при $I_э = \text{const.}$

На рис. 6.3 дана иллюстрация, из которой видно, что выходные характеристики представляют собой прямые линии, почти параллельные оси напряжения. Выходной ток, протекающий при отсутствии входного, называется обратным (неуправляемым, паразитным) и обусловлен наличием неосновных носителей заряда в коллекторной области.

Это объясняется тем, что коллекторный переход закрыт независимо от величины напряжения база – коллектор и ток коллектора определяется только количеством носителей заряда, проходящих из эмиттера через базу в коллектор, то есть током эмиттера.

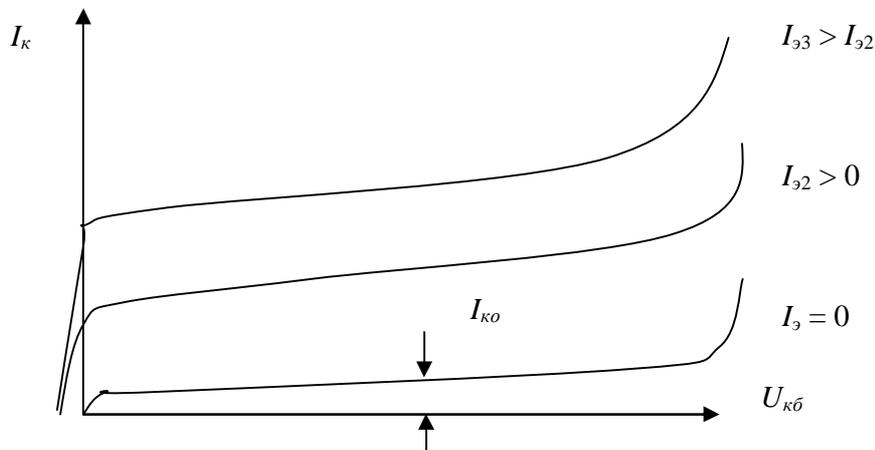


Рис. 6.3. Выходные статические характеристики ОБ

6.2. Статические характеристики транзистора по схеме ОЭ

На рис. 6.5 изображена схема установки для измерения статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

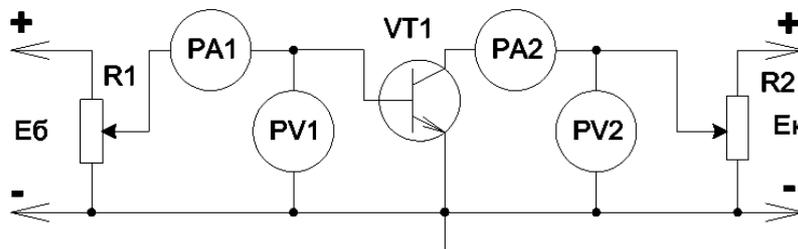


Рис. 6.5. Схема снятия статических ВАХ ОЭ

- **Входная характеристика**

$$I_{бх.} = f(U_{бх.}) \text{ при } U_{кэ} = \text{const};$$

$$I_{б} = f(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = \text{const}.$$

Входные характеристики представляют собой семейство прямых ветвей открытого эмиттерного перехода при различных выходных напряжениях.

Иллюстрация входных характеристик приведена на рис. 6.6.

- **Выходная характеристика**

$$I_{вых.} = f(U_{вых.}) \text{ при } I_{бх.} = \text{const};$$

$$I_{к} = f(U_{кэ}) \text{ при } I_{б} = \text{const}.$$

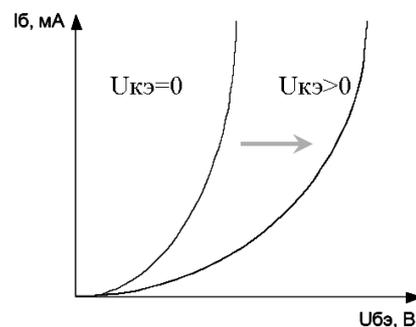


Рис. 6.6. Входные статические характеристики ОЭ

Семейство выходных статических характеристик ОЭ приведено на рис. 6.7.

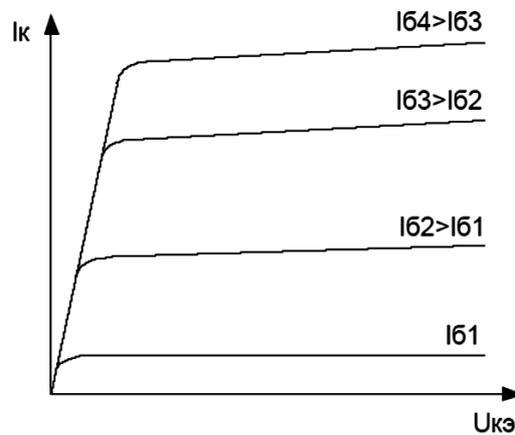


Рис. 6.7. Выходные статические характеристики ОЭ

6.3. Температурные свойства транзисторов

Диапазон рабочих температур транзистора определяется температурными свойствами p-n-перехода. Особенно сильно на работу транзисторов влияет нагрев и менее существенно – охлаждение (до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Исследования показывают, что при нагреве от 20 до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ параметры плоскостных транзисторов изменяются следующим образом: r_k падает примерно вдвое, r_b – на $15 - 20\%$, r_z возрастает на $15 - 20\%$.

Нагрев вызывает и смещение выходных характеристик, и изменение их наклона, что также нарушает работу транзисторов. Особенно существенно влияет на их работу при нагреве обратный ток коллектора $I_{кбо}$:

$$I_{кбоt} \approx I_{кбон} e^{0,07\Delta t}.$$

Он увеличивается в два раза при увеличении температуры на каждые $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Все это влияет на характеристики транзистора и положение рабочей точки (рис. 6.8, а). Наиболее часто для работы при повышенных температурах применяют кремниевые транзисторы ($t_{np} \leq 125 \dots 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Также используют приборы, изготовленные из карбида кремния ($t_{np} \leq 500 \dots 600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Ток коллектора увеличивается, а напряжение $U_{кэ}$ уменьшается, что равносильно открыванию транзистора.

Вывод: схемы включения транзисторов с общим эмиттером требуют температурной стабилизации.

Усилительные свойства и параметры транзисторов тоже изменяются при изменении температуры. В качестве примера на рис. 6.8, б приведены зависимости некоторых h -параметров для транзистора марки КТ315.

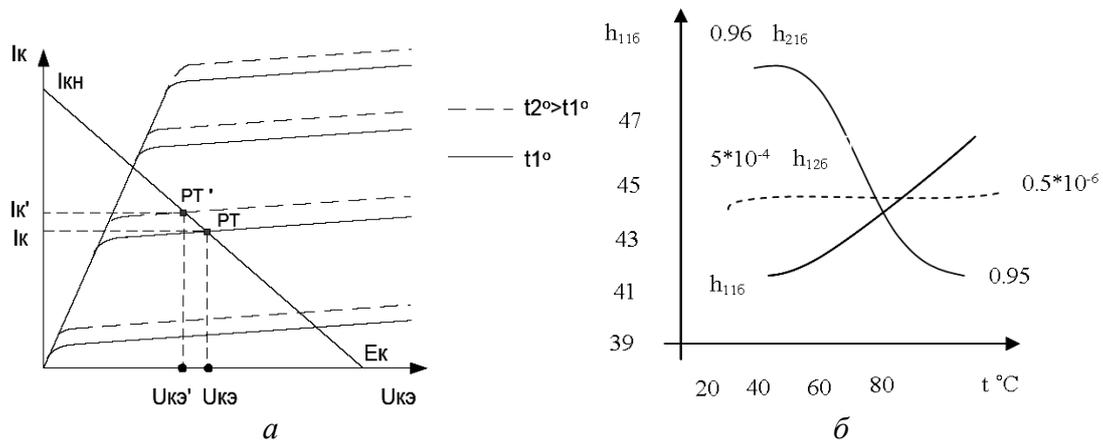


Рис. 6.8. Пояснения к температурной реакции транзистора

6.4. Частотные свойства транзисторов

Диапазон рабочих частот транзистора определяется двумя факторами:

- Наличие барьерных емкостей на p-n-переходах. В схеме ОЭ коллекторная емкость влияет значительно сильнее, так как она подключается параллельно большому сопротивлению обратносмещенного коллекторного перехода (рис. 6.9).
- Возникновение разности фаз между токами эмиттера и коллектора. Ток коллектора отстает от тока эмиттера на время, требуемое для преодоления базы носителями заряда.

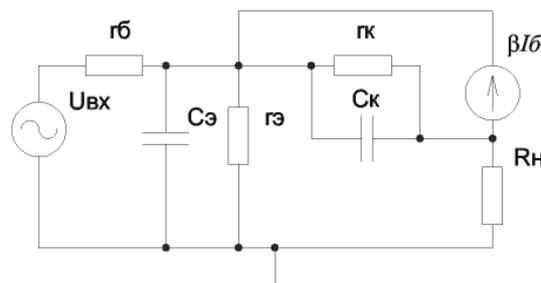


Рис. 6.9. Типовая эквивалентная модель транзистора (Т-модель) схемы с общим эмиттером

Пояснения наглядно отображены на векторных диаграммах.

1. Рис. 6.10, а:

$$\omega_1 = 0, \varphi_1 = 0;$$

$$\beta_1 = \frac{I_K}{I_{б1}}.$$

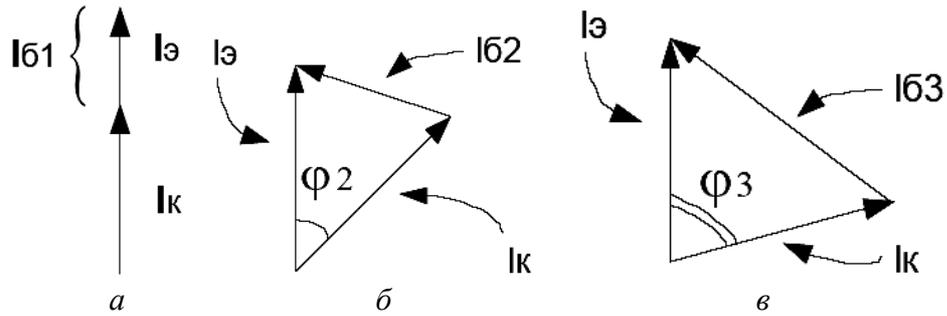


Рис. 6.10. Пояснения к образованию фазового сдвига

2. Рис. 6.10, б:

$$\omega_2 > 0, \varphi_2 > 0, I_{\beta 2} > I_{\beta 1}, \beta_2 = \frac{I_{\kappa}}{I_{\beta 1}} < \beta_1.$$

3. Рис. 6.10, в:

$$\omega_3 \gg 0, \beta_3 \ll \beta_1.$$

С увеличением частоты коэффициент усиления по току уменьшается. Для расширения частотного диапазона транзисторов необходимо увеличить скорость перемещения не основных носителей зарядов через базу, уменьшив толщину базы и коллекторную емкость. При этих условиях транзисторы могут работать на частотах порядка десятков и сотен мегагерц.

Предельной частотой $f_{h_{21}}$ называется такая частота, на которой коэффициент усиления уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Взаимосвязь между коэффициентом усиления и частотой (рис. 6.11) обычно описывают модулем ко-

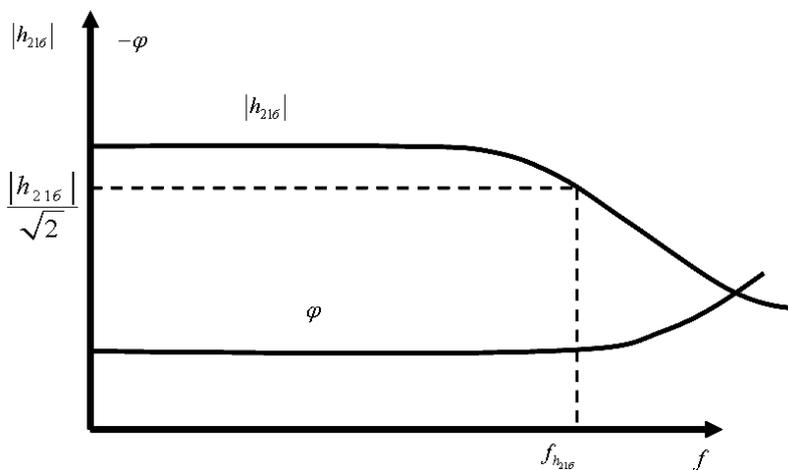


Рис. 6.11 Зависимость модуля коэффициента усиления и фазового сдвига от частоты

эффициента передачи (в зависимости от схемы включения)

$$h_{21} = \frac{h_{210}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{h_{21}}}\right)^2}},$$

где h_{210} – коэффициент усиления на постоянном токе; f – частота, на которой определяется коэффициент усиления h_{21} .

Граничной или критической частотой $f_{зр}$ усиления транзистора называют частоту, на которой модуль коэффициента усиления транзистора сравнивается с 1 .

Максимальная частота генерации $f_{макс}$ – наибольшая частота, на которой транзистор может работать в схеме автогенератора и коэффициент усиления по мощности становится равным единице. Максимальная частота генерации определяет область частот, в которой транзистор остается активным элементом электрической цепи.

6.5. Параметры биполярных транзисторов

Основные параметры биполярных транзисторов следующие:

1. Коэффициенты передачи базового и эмиттерного токов

$$h_{21б} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_э}; U_{кб} - \text{const} = 0,95...0,9995$$

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_б}; U_{кэ} - \text{const} = \text{десятки...сотни раз}$$

2. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении $I_{кбо} = I_K$ при $I_э = 0$ (единицы наноампер – десятки микроампер).

3. Максимально допустимый ток коллектора $I_{к\text{ max}}$ (сотни миллиампер ... десятки ампер).

4. Наибольшая мощность, рассеиваемая коллекторным переходом, $P_{к\text{ max}}$ (единицы милливатт ... десятки ватт).

5. Предельная частота коэффициента передачи тока эмиттера $f_{h21б}$ – частота, на которой модуль коэффициента передачи тока эмиттера уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со своим низкочастотным значением.

6. Граничная частота коэффициента передачи тока эмиттера – это частота, на которой $|h_{21э}| \rightarrow 1$.

7. Максимальная частота генерации $f_{\text{ max}}$ – наибольшая частота, на которой транзистор может работать в схеме автогенератора и коэффициент усиления по мощности становится равным единице. Максимальная частота генерации определяет область частот, в которой транзистор остается активным элементом электрической цепи.

8. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода

$$r_{э\text{ диф}} = \frac{\Delta U_э}{\Delta I_э}; U_{кэ} - \text{const} \text{ (единицы ... десятки ом)}.$$

9. Объемное сопротивление области базы r_b (десятки ... сотни ом).
 10. Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода или выходная проводимость

$$r_{k \text{ диф}} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_k} = \frac{1}{h_{22э}}$$

11. Емкость коллекторного перехода (единицы ... десятки пикофарад).
 12. Коэффициент обратной связи по напряжению $h_{12б}$ (10^{-3} ... 10^{-4}).

Контрольные вопросы

1. Приведите схемы для снятия статических характеристик на транзисторах р-п-р-проводимости.
2. Что такое статические ВАХ и какие виды их вам известны?
3. В чем суть эффекта Эрли?
4. Чем обусловлено наличие протекания тока в выходной цепи при отсутствии входного?
5. Как строится нагрузочная прямая? Что происходит с выходным напряжением и током с ростом температуры?
6. Приведите эквивалентную схему транзистора в схеме с общей базой. Объясните, какая из схем обладает наилучшими частотными характеристиками и почему.
7. Какие частотные характеристики транзисторов вам известны?

Тема 7. Полевые транзисторы

Термины: *униполярный, исток, сток, затвор, канал, напряжение отсечки, пороговое напряжение, стокозатворная характеристика, стоковая характеристика, крутизна, изолированный затвор, подложка, встроенный и индуцированный каналы, режим обеднения и обогащения канала, плавающий затвор.*

- 7.1. Устройство и принцип действия полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом
- 7.2. Характеристики и параметры полевых транзисторов
- 7.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором
- 7.4. Полевые транзисторы для ПМС, репрограммируемых постоянных запоминающих устройств (РПЗУ)
- 7.5. Схемы включения полевых транзисторов
- 7.6. Параметры полевых транзисторов

7.1. Устройство и принцип действия полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом

Полевым транзистором (unipolar FET, field-controlled [field-effect] transistor, unipolar transistor) называется полупроводниковый прибор, в котором ток создается только основными носителями зарядов под действием продольного электрического поля, а управление этим током осуществляется поперечным электрическим полем, которое создается напряжением, приложенным к управляющему электроду.

Несколько определений:

- Вывод полевого транзистора, от которого истекают основные носители зарядов, называется истоком (англ. – source).
- Вывод полевого транзистора, к которому стекают основные носители зарядов, называется стоком (англ. – drain).
- Вывод полевого транзистора, к которому прикладывается управляющее напряжение, создающее поперечное электрическое поле, называется затвором (англ. – gate).
- Участок полупроводника, по которому движутся основные носители зарядов (между р-п-переходами), называется каналом полевого транзистора (channel unipolar transistor).

Полевые транзисторы подразделяются на транзисторы с каналом р-типа или n-типа. Условное графическое изображение (УГО) полевого транзистора с каналом n-типа изображено на рис. 7.3, а, а с каналом р-типа – на рис. 7.3, б.

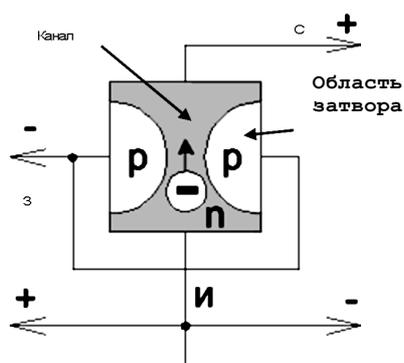


Рис. 7.1. Структура n-типа

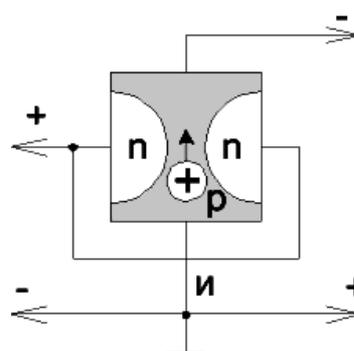
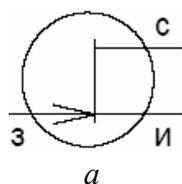
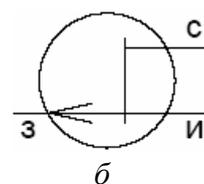


Рис. 7.2. Структура p-типа



а



б

Рис. 7.3. Условное графическое изображение полевого транзистора: а – с каналом n-типа; б – с каналом p-типа

Принцип действия рассмотрим на примере транзистора с каналом n-типа (рис 7.4).

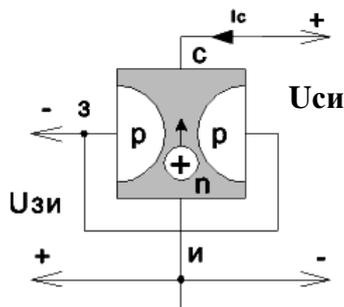


Рис. 7.4. Структура полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа на примере включения с общим истоком

$$1) U_{зи} = 0; I_{c1} = \max;$$

$$2) U_{омс} > |U_{зи}| > 0; I_{c2} < I_{c1};$$

$$3) U_{омс} = |U_{зи}| \gg 0; I_{c3} = 0.$$

На затвор транзистора при его работе подается напряжение $U_{зи}$, смещающее р-п-переход в обратном направлении. Такой режим работы называется режимом с обеднением канала. Напряжение между стоком и истоком создает продольное электрическое поле, за счет которого через канал движутся основные носители зарядов, создавая ток стока.

При отсутствии напряжения на затворе р-п-переходы закрыты собственным внутренним полем, ширина их минимальна, а ширина канала максимальна и ток стока будет максимальным.

При увеличении запирающего напряжения на затворе ширина р-п-переходов увеличивается, а ширина канала и ток стока уменьшаются.

При достаточно больших напряжениях на затворе ширина р-п-переходов может увеличиться настолько, что они сольются, ток стока станет равным нулю.

Напряжение на затворе, при котором ток стока равен нулю, называется напряжением отсечки. Вывод: полевой транзистор представляет собой управляемый полупроводниковый прибор, так как, изменяя напряжение на затворе, можно уменьшать ток стока и поэтому принято говорить, что полевые транзисторы с управляющими р-п-переходами работают только в режиме *обеднения канала*.

По аналогии в процессах работы полевые транзисторы сравнивают со шлангом, в один конец которого подводят давление (сток), а величину вытекающего потока с истока контролируют, передавливая шланг рукой (рис 7.5).

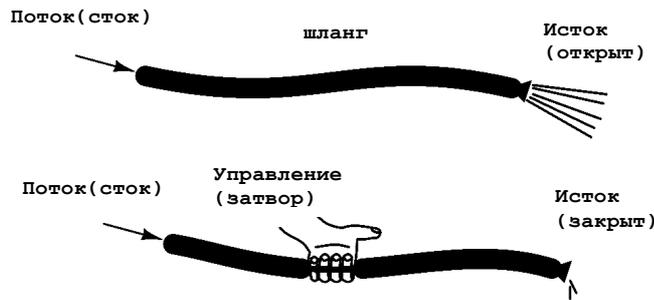


Рис. 7.5. Пояснения к работе полевого транзистора с управляющим переходом

7.2. Характеристики и параметры полевых транзисторов

К основным характеристикам относятся:

- Стокзатворная характеристика – это зависимость тока стока (I_c) от напряжения на затворе ($U_{зи}$) для транзисторов с каналом n-типа.

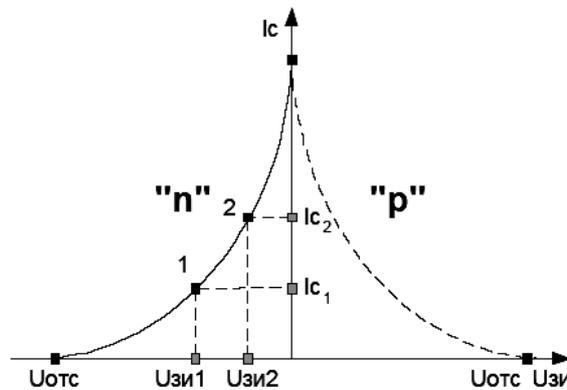


Рис. 7.6. Стокзатворная характеристика полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

- Стоковая характеристика – это зависимость I_c от $U_{си}$ при постоянном напряжении на затворе (рис. 7.7, 7.8). $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$.

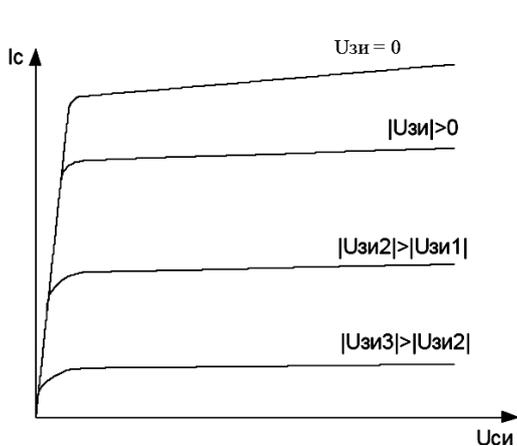


Рис. 7.7. Выходные (стоковые) характеристики

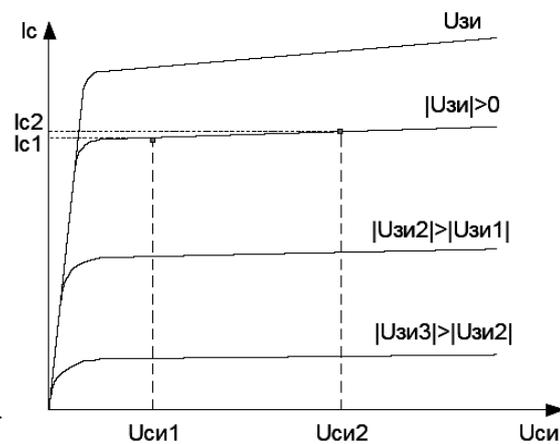


Рис. 7.8. Определение внутреннего (выходного) сопротивления по стоковым характеристикам

Основные параметры:

- Напряжение отсечки $U_{отс.}$. (Пороговое напряжение $U_{пор.}$).
- Крутизна стокзатворной характеристики. Она показывает, на сколько миллиампер изменится ток стока при изменении напряжения на затворе на 1 В.

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{си} = \text{const};$$

$$S = \frac{I_{c2} - I_{c1}}{|U_{зи1} - U_{зи1}|}.$$

- Внутреннее сопротивление (или выходное) полевого транзистора

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{зи} = \text{const}.$$

- Входное сопротивление

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_з} \leq 10^9 \text{ Ом}.$$

Так как на затвор подается только запирающее напряжение, то ток затвора будет представлять собой обратный ток закрытого р-п-перехода и будет очень мал. Величина входного сопротивления $R_{вх}$ будет очень велика и может достигать $10^7 \dots 10^9$ Ом.

7.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором

Эти приборы имеют затвор в виде металлической пленки, которая изолирована от полупроводника слоем диэлектрика, в качестве которого применяется окись кремния. Поэтому полевые транзисторы с изолированным затвором называют МОП и МДП. Аббревиатура МОП расшифровывается как металл – окись – полупроводник (MOS – metal – oxide – semiconductor либо metal – oxide – semiconductor (field – effect) transistor (MOSFET)). МДП расшифровывается как металл – диэлектрик – полупроводник (MIS – metal – insulator – semiconductor). МОП-транзисторы могут быть двух видов:

- Транзисторы со встроенным (build in, embed) каналом (рис. 7.9).

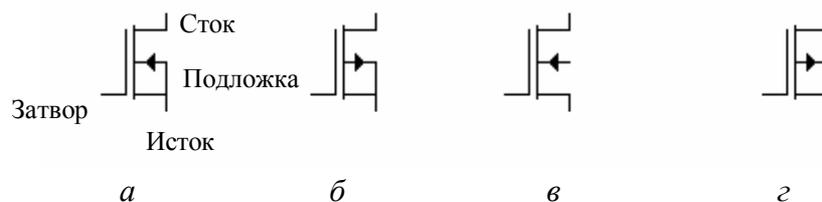


Рис. 7.9. Полевые транзисторы с изолированным затвором и встроенным каналом: а – n-типа; б – p-типа; в и г – n- и p-типа с отдельным выводом от подложки

- Транзисторы с индуцированным (induce) каналом (рис. 7.10).

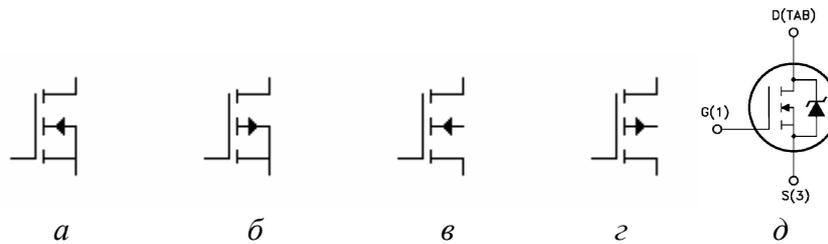


Рис. 7.10. Полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом:

a – n-типа; *б* – p-типа; *в* и *г* – n- и p-типа с отдельным выводом от подложки;
д – со встроенным защитным диодом

Транзистор со встроенным каналом

Основой такого транзистора является кристалл кремния p- или n-типа проводимости (рис. 7.11). Наличие сильнолегированных областей под стоком и истоком предотвращает появление выпрямляющего контакта металл – полупроводник и уменьшает сопротивление канала.

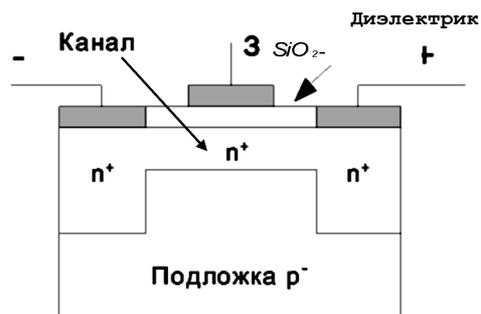


Рис. 7.11. Структура полевого транзистора со встроенным каналом n-типа проводимости

Для транзистора с n-типом проводимости:

При $U_{зи} = 0$; $I_{c1} = \text{среднее (начальное) значение}$;

$U_{зи} > 0$; $I_{c2} > I_{c1}$ (до $I_{c \max}$);

$U_{отс} < U_{зи} < 0$; $I_{c3} < I_{c1}$;

$U_{зи} \leq U_{отс}$; $I_{c4} \approx 0$.

Принцип действия

Под действием электрического поля между стоком и истоком через канал будут протекать основные носители зарядов, т.е. будет существовать ток стока. При подаче на затвор положительного напряжения электроны как неосновные носители подложки будут притягиваться в канал. Канал обогатится носителями заряда, и ток стока увеличится.

При подаче на затвор отрицательного напряжения электроны из канала уходят в подложку, канал обедняется основными носителями зарядов и ток стока уменьшается. При достаточно больших напряжениях на затворе все носители заряда могут из канала уходить в подложку и ток стока станет равным нулю.

Вывод: МОП-транзисторы со встроенным каналом могут работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения зарядов. Напряжение, при котором происходит исчезновение канала и прекращение протекания тока между истоком и стоком, называют напряжением отсечки.

На рис. 7.12 приведены стокзатворные характеристики полевых транзисторов со встроенным каналом.

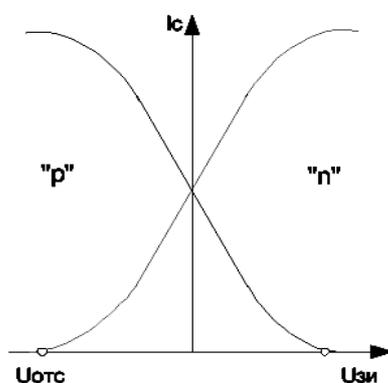


Рис. 7.12. Стокзатворные характеристики полевых транзисторов со встроенным каналом

Транзисторы с индуцированным каналом

При $U_з = 0; I_{c1} = 0;$

При $U_з < 0; I_{c2} = 0;$

При $U_{пор} > U_з > 0; I_{c3} = 0;$

При $U_{пор} \leq U_з; I_4 > 0.$

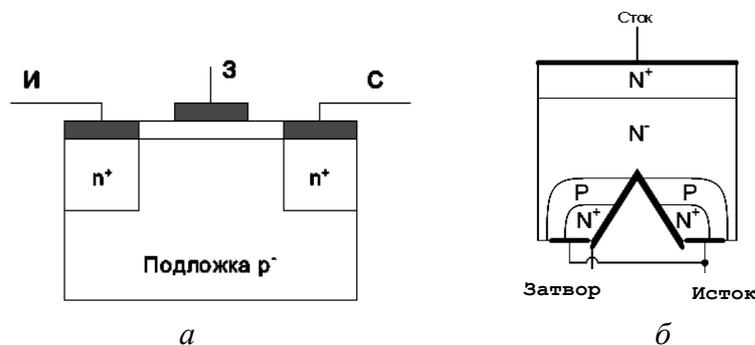


Рис. 7.13. Структура полевого транзистора с индуцированным каналом: *а* – n-типа проводимости; *б* – изготовленного по V-технологии

При напряжениях на затворе, равных или меньше нуля, канал отсутствует и ток стока будет равен нулю. При положительных напряжениях на затворе электроны, как неосновные носители заряда подложки р-типа, будут притягиваться к затвору, а дырки будут отталкиваться в глубь подложки. В результате в тонком слое под затвором концентрация электронов превысит концентрацию дырок, т.е. в этом слое полупроводник поменяет тип своей проводимости (инверсия типа проводимости). Образуется (индуцируется) канал, и в цепи стока потечет ток, величина которого зависит от ширины канала, т.е. напряжения на затворе. Напряжение, при котором происходит образование канала под затвором, называется пороговым ($U_{пор}$).

На рис. 7.14 приведены стокзатворные характеристики полевых транзисторов с индуцированными каналами.

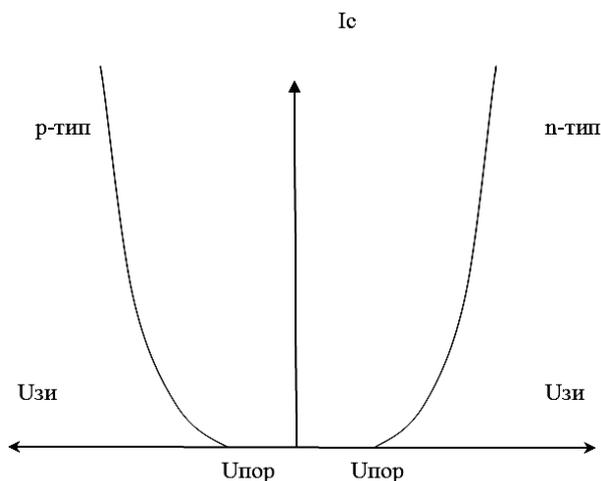


Рис 7.14. Стокзатворные характеристики полевых транзисторов с индуцированными каналами

Вывод: МОП-транзисторы с индуцированным каналом могут работать только в режиме обогащения.

МОП-транзисторы обладают большим входным сопротивлением, чем транзисторы с управляемым переходом. $R_{вх} = (10^{13} \dots 10^{15}) \text{ Ом}$.

В последнее время все чаще встречаются транзисторы, изготовленные по V-технологии. Затвор таких транзисторов по-прежнему изолирован от канала, а стоковый электрод контактирует одновременно и с подслоем n^+ , и р-областью подложки. В обычном включении (+ на сток, – на исток) он работает как обычный транзистор с индуцированным каналом, однако при смене полярности откроется р-п-переход и канал окажется зашунтированным сопротивлением открытого перехода. Такие транзисторы обладают повышенным пробивным напряжением сток – исток и используются в мощных высоковольтных ключевых схемах.

7.4. Полевые транзисторы для ИМС РПЗУ

В интегральных микросхемах РПЗУ в виде ячейки для хранения 1 бита информации используются полевые транзисторы МНОП (MNOS) structure или МОП-транзисторы с плавающим затвором. Аббревиатура МНОП расшифровывается следующим образом: М – металл; Н – сплав Si_3N_4 ; О – оксид металла; П – полупроводник.

Принцип действия этих транзисторов основан на том, что в сильных электрических полях электроны могут проникать в диэлектрик на глубину до 1 мкм.

МНОП-структура транзистора изображена на рис. 7.15.

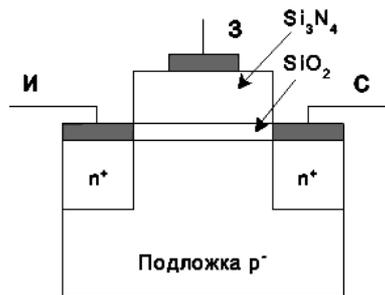


Рис. 7.15. Конструкция МНОП транзистора

Транзисторы структуры МНОП имеют двухслойный диэлектрик. Первый слой, толщиной менее 1 мкм, – это окись кремния, второй слой, толщиной несколько микрон, – нитрид кремния. Без программирования этот транзистор работает как обычный МОП-транзистор и содержит логическую единицу информации.

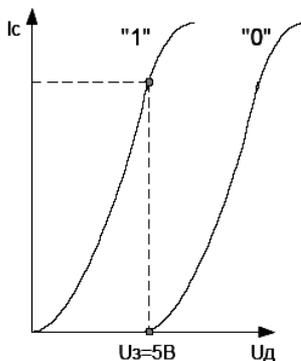


Рис. 7.16 Изменение хода стокзатворной характеристики при разных состояниях заряда затвора

Для программирования логического нуля на затвор подают кратковременное напряжение ($U = 25 \dots 30\text{В}$). Под действием этого напряжения электроны проходят слой окиси малой толщины, но не могут пройти слой нитрида кремния и скапливаются на границе этих слоев. Изменение хода стокзатворной характеристики при разных состояниях заряда затвора показано на рис. 7.16.

Поскольку напряжение кратковременно, то они остаются на границе слоев этих диэлектриков. Оставшись, электроны создают объемный отрицательный заряд, который может храниться достаточно долго (дни – месяцы). За счет этого заряда возникает электрическое поле, противодействующее полю затвора. Чтобы индуцировать канал в транзисторе, на затвор необходимо подавать большее напряжение, чтобы

преодолеть действие поля объемного заряда. Это соответствует сдвигу стокозатворной характеристики вправо по оси напряжений. При подаче на затвор импульса запроса (считывании) 5 В канал индуцироваться не будет, ток стока и ток в нагрузке отсутствуют, и на нагрузке будет уровень логического нуля.

Для стирания информации на затвор подают также напряжение 25 ... 30 В, только отрицательной полярности.

Структура МНОП-транзисторов с плавающим затвором (floating gate)

В слое окисла кремния создается область из алюминия или поликристаллического кремния на расстоянии менее 1 мкм от полупроводника (рис. 7.17).

Принцип действия МОП-транзисторов с плавающим затвором точно такой же, как у транзисторов МНОП, только при программировании электроны скапливаются в плавающем затворе из алюминия или кремния. Стирание информации осуществляется ультрафиолетовым облучением. В процессе записи в некоторых структурах процесс перехода носителей заряда в плавающий затвор связан с лавинным эффектом (см. эффекты в полупроводниках). Такие транзисторы называют ЛИЗМОП (лавинно-инжекционные).

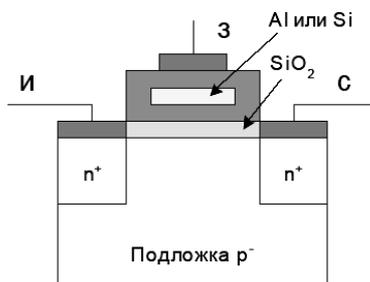


Рис. 7.17. Структура МНОП-транзисторов с плавающим затвором

7.5. Схемы включения полевых транзисторов

Полевой транзистор – трехэлектродный (четырёхэлектродные – при наличии вывода от подложки) прибор. Один из его электродов всегда будет общим для входной и выходной частей электрической схемы. Название общего электрода определяет схему включения транзистора. На рис. 7.18 представлены три схемы включения: а – схема с общим затвором (ОЗ); б – схема с общим истоком (ОИ); в – схема с общим стоком (ОС).

Наиболее часто используется схема включения с ОИ. Входными и выходными напряжениями (токами) в схемах являются:

Параметр/схема	ОЗ	ОИ	ОС
$U_{вх}(I_{вх})$	$U_{из}(I_u)$	$U_{зи}(I_3)$	$U_{зс}(I_3)$
$U_{вых}(I_{вых})$	$U_{сз}(I_c)$	$U_{си}(I_c)$	$U_{ис}(I_u)$

Наиболее распространенной является схема с общим истоком. Схема с общим стоком (истоковый повторитель (см. рис 7.18, г) по аналогии с эмиттерным повторителем на биполярном транзисторе) имеет ограниченное применение в схемах, где требуется согласование с сопротивлением нагрузки и совпадение фазы входного и выходного сигналов. Схема с общим затвором, имеющая низкое входное сопротивление $r_{вх}$, из-за значительного значения входного тока, протекающего от выходного источника через канал ($U_{сз} \gg U_{из}$), редко используется в некоторых специальных схемах. В схемах с общим истоком и общим стоком входной ток равен нулю: $I_{вх} = I_з \approx 0$ (обратный ток перехода). Поэтому мощность, потребляемая от источника входного сигнала для управления выходным током, ничтожно мала.

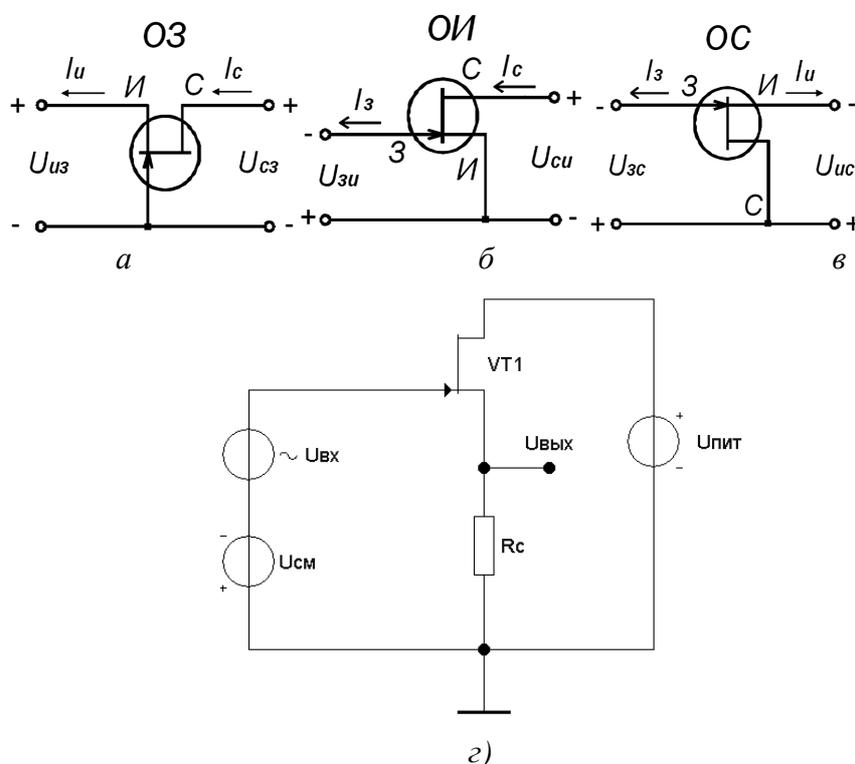


Рис. 7.18. Схемы включения с ОЗ (а), с ОИ (б), с ОС (в), истоковый повторитель (г)

7.6. Параметры полевых транзисторов

Электрические параметры:

$Y_{21} = S$ – крутизна характеристики управления при заданных значениях выходного напряжения $U_{си}$, тока I_c ; $U_{зи\ отс.}$ – напряжение отсечки (пороговое напряжение $U_{пор.}$) при заданном напряжении $U_{си}$; $I_{з\ ут.}$ – ток утечки затвора при заданных напряжениях $U_{зи}$ и $U_{си}$; $C_{вх.}$, $C_{вых.}$ – входная и выходная емкости при заданных значениях выходных напряжений $U_{си}$ и тока I_c ;

$y_{22} = \frac{1}{r_i}$ – выходная проводимость при заданных значениях $U_{си}$ и I_c .

Предельные эксплуатационные параметры:

$U_{cu \max}$ – напряжение сток – исток; $U_{zu \max}$ – напряжение затвор – исток; $U_{zc \max}$ – напряжение затвор – сток; $I_{c \max}$ – ток стока; $P_{c \max}$ – допустимая мощность рассеяния тепловых потерь.

Контрольные вопросы

1. Какая полярность прикладываемого напряжения недопустима между затвором и истоком транзистора с управляющим переходом и каналом p-типа?
2. Как называются рабочие режимы работы каналов транзисторов различного типа?
3. В чем разница между пороговым и напряжением отсечки?
4. Какой из типов полевых транзисторов обладает максимальным входным сопротивлением?
5. Какой из типов полевых транзисторов допускает подачу разнополярного напряжения на затвор без дополнительного смещения?
6. Приведите стокзатворные характеристики полевых транзисторов разных типов и укажите, какие параметры по ним определяются.
7. Зачем под областями истока и стока транзисторов с изолированным затвором делают легированные области?
8. Объясните, что дает возможность использования отдельного вывода от подложки, например, при подключении к нему источник ЭДС? Докажите это экспериментально, например, в программе EWB.
9. Приведите английские названия и аббревиатуры областей и разновидностей полевых транзисторов.
10. Какая из схем включения полевых транзисторов наиболее распространена?

Список использованных литературных источников

1. Москатов, Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
2. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы : справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, В. Л. Прохоренко. – Минск : Беларусь, 1987. – 285 с.
3. Жеребцов, И. П. Основы электроники. – 5-е изд., перераб. и доп. / И. П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с. : ил.
4. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000.
5. Kuphaldt, Tony R. Lessons In Electric Circuits. Volume III. Semiconductors / Tony R. Kuphaldt. – Third Edition, last update August 23, 2002.

РАЗДЕЛ 5. БЕСКОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА КОММУТАЦИИ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Содержание раздела

Переключающие приборы

Устройство, принцип действия, ВАХ, разновидности тиристоры, диодные тиристоры, триодные тиристоры, симисторы, области применения. Параметры и система обозначения переключающих приборов, однопереходной (двухбазовый) транзистор, биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT), работа IGBT-транзистора, IGBT-модули, применение.

Оптоэлектронные приборы и устройства

Классификация элементов оптоэлектроники. Полупроводниковые источники оптического излучения. Электролюминесценция. Светодиоды, устройство, принцип работы, характеристики, параметры. Полупроводниковые приемники излучения: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры. Принцип работы, характеристики, параметры.

Фотоэлементы на ПЗС, устройство, принцип работы. Оптроны, их разновидности. Классификация, принцип действия, входные и выходные параметры оптопар.

Электронные индикаторные приборы

Физические эффекты, пригодные для создания индикаторов. Полупроводниковые, жидкокристаллические, газоразрядные, электролюминесцентные и другие индикаторы. Сравнение различных индикаторов и их применение.

Методические указания

Переключающие приборы [1, с. 214 – 220; 2, с. 113 – 120; 3, с. 100 – 106]

При изучении данного материала необходимо знать устройство и принцип действия динисторов, тиристоры, симисторы, применение и принцип работы однопереходных транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором, их характеристики и параметры, области применения.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните работу динистора. Нарисуйте ВАХ.
2. Объясните механизм управления процессом переключения в тиристоре.
3. Назовите параметры тиристора.

4. Чем отличается механизм включения тиристора от механизма включения динистора?
5. Симистор, его устройство. Характеристики.
6. Система обозначения и маркировка переключающих приборов.
7. Устройство, ВАХ и УГО однопереходного транзистора.
8. Приведите структуру и расскажите о принципе работы IGBT-транзистора.

Приборы оптоэлектроники[1, с. 328 – 351; 2, с. 148 – 200, 3, с. 125 – 150]

Изучение этого материала необходимо начать с явлений внутреннего и внешнего фотоэффектов, которые лежат в основе работы всех фотоэлектрических приборов. После этого необходимо изучить принцип работы и параметры фоторезисторов, фотоэлементов, фотодиодов, фототранзисторов.

В последнее время широко начали применяться излучающие полупроводниковые приборы, использующие явления инжекционной электролюминесценции, – люминесцентные индикаторы и светодиоды. Сочетание фотоприемников и излучателей позволило создать новые приборы – оптроны. Необходимо знать устройство и принцип действия простейших разновидностей оптронов.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные законы фотоэффекта.
2. На чем основан принцип действия фоторезистора?
3. Назовите параметры фоторезистора.
4. Чем определяется величина темнового тока у фоторезистора?
5. Для чего служит фотоэлемент и в каких областях науки и техники он применяется?
6. Чем отличается фотодиод от фотоэлемента?
7. Основные параметры фотодиода в фотодиодном и вентильном режимах.
8. Устройство и принцип действия фототранзистора.
10. Характеристики фототранзистора, включенного по схеме с общим эмиттером и плавающей базой.
11. Преимущества фототранзисторов по сравнению с фотодиодами.
12. Какие полупроводниковые приборы относятся к излучательным?
13. Объясните принцип работы светодиода.
14. Что такое оптрон?
15. Назовите простейшие разновидности оптронов. Характеристики и параметры простейших оптронов.

Рекомендуемая литература

1. Электронные приборы / А. Л. Булычев [и др.]. – М. : ЛайтЛтд, 2000. – 416 с. : ил.
2. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 1991. – 622 с. : ил.
3. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.

Тема 8. Приборы бесконтактной коммутации: тиристоры, IGBT-транзисторы

Термины: *тиристор, динистор, тринистор, симистор, триггерный эффект, структура, параметры, запираемые и незапираемые тиристоры, однопереходной (двухбазовый) транзистор, биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT), работа IGBT-транзистора, IGBT-модули, применение.*

Тиристорами называют полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми режимами работы (включен, выключен), имеющие три или более р-п-переходов.

Тиристор по своему принципу – прибор ключевого действия. Во включенном состоянии он подобен замкнутому ключу, а в выключенном – разомкнутому ключу. Те тиристоры, которые не имеют специальных электродов для подачи сигналов с целью изменения состояния, а имеют только два силовых электрода (анод и катод), называют *неуправляемыми*, или *диодными* тиристорами (динисторами). Если тиристоры имеют дополнительный (третий) управляющий электрод, то этот вид называют *управляемыми* тринисторами или просто тиристорами.

Динисторы – это диодные тиристоры, или неуправляемые переключательные диоды (four-layer [four-region] diode, diode-thyristor, dynistor, diode thyristor, two-terminal thyristor, Shokley diode).

Тринисторы (триодные тиристоры) – это управляемые переключательные диоды (triode-thyristor, controlled tyristor, controlled rectifier).

Симисторы – это симметричные тиристоры, т.е. тиристоры с симметричной ВАХ. Различают управляемые (триаки) и неуправляемые (диакки) симисторы.

Область применения тиристоров, главным образом, – силовые коммутаторы в системах электропривода мощных установок, управление цепями освещения и автоматики. Отличительная особенность ключей на ти-

ристорах по сравнению с ключами на биполярных транзисторах – малые потери на переходном сопротивлении в открытом состоянии, высокое внутреннее сопротивление в закрытом, большие токи коммутации и возможность регулировки мощности в цепях переменного тока (для симисторов). Благодаря триггерному эффекту (запоминание состояния) тиристоры используют в запоминающих устройствах низкой емкости.

8.1. Устройство и принцип действия динисторов

8.2. Основные параметры тиристоров

8.3. Триисторы

8.4. Симисторы

8.5. Однопереходные транзисторы

8.6. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

8.1. Устройство и принцип действия динисторов

Наружная p-область и вывод от нее называется анодом (структура и распределение примесей (степень легирования) – рис. 8.1).

Наружная n-область и вывод от нее называется катодом. Внутренние p- и n-области называются базами динистора. Крайние p-n-переходы называются эмиттерными, а средний p-n-переход называется коллекторным. Подадим на анод «-», а на катод «+». При этом эмиттерные переходы будут закрыты, коллекторный открыт. Основные носители зарядов из анода и катода не смогут перейти в базу, поэтому через динистор будет протекать только маленький обратный ток, вызванный неосновными носителями заряда.

Если на анод подать «+», а на катод «-», эмиттерные переходы открываются, а коллекторный закрывается.

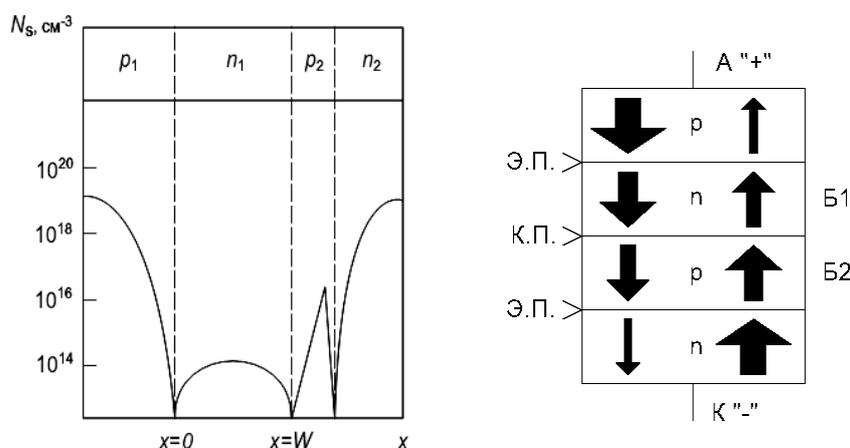


Рис. 8.1. Структура и распределение примесей (степень легирования) динисторов

Динисторы применяются в виде бесконтактных переключательных устройств, управляемых напряжением (ВАХ – рис. 8.2).

Принцип действия. Основные носители зарядов переходят из анода в базу 1, а из катода – в базу 2, где они становятся неосновными и в базах происходит интенсивная рекомбинация зарядов, в результате которой количество основных свободных носителей зарядов уменьшается. Эти (неосновные) носители заряда подходят к коллекторному переходу, поле которого для них будет ускоряющим, затем перекидываются базы и носители заряда переходят через открытые эмиттерные переходы, т.к. в базах они опять становятся основными. Пройдя эмиттерные переходы, электроны переходят в анод, а дырки – в катод, где они вторично становятся неосновными и вторично происходит интенсивная рекомбинация. В результате количество зарядов, прошедших через динистор, будет очень мало, и прямой ток также будет очень мал. При увеличении напряжения прямой ток незначительно возрастает, т.к. увеличивается скорость движения носителей, а интенсивность рекомбинации уменьшается. При увеличении напряжения до определенной величины происходит электрический пробой коллекторного перехода. Сопротивление динистора резко уменьшается, ток через него сильно увеличивается за счет интенсивной инжекции из эмиттеров неосновных носителей через прямосмещенные эмиттерные переходы (вследствие неравномерного легирования областей), и падение напряжения на нем значительно уменьшается. Считается, что динистор перешел из выключенного состояния во включенное.

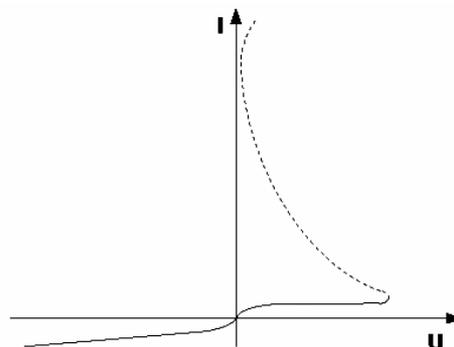


Рис. 8.2. ВАХ динистора

8.2. Основные параметры тиристоров

Тиристоры характеризуются следующими параметрами (рис. 8.3):

1. Напряжение включения $U_{вкл.}$ – минимальное прямое анодное напряжение, при котором тиристор переходит из закрытого в открытое состояние при разомкнутой управляющей цепи (десятки – сотни вольт).

2. Ток включения $I_{вкл.}$ – это значение прямого анодного тока, протекающего через тиристор, выше которого он переходит в открытое состояние при разомкнутой цепи управляющего вывода.

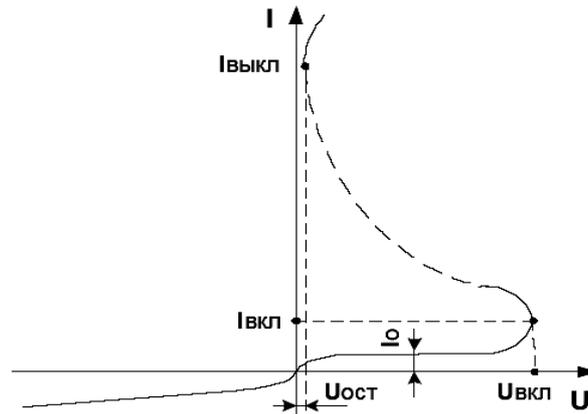


Рис. 8.3. Определение параметров тиристоров по ВАХ

3. Ток удержания (выключения) $I_{уд.}$ ($I_{выкл.}$) – значение прямого тока, протекающего через тиристор при разомкнутой цепи управления, ниже которого тиристор выключается (единицы – сотни миллиампер).

4. Напряжение в открытом состоянии (остаточное напряжение) $U_{пр.}$ – падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии (1 ... 3 В).

5. Максимально допустимый ток в открытом состоянии $I_{пр. max}$ – максимальное значение тока в открытом состоянии, при котором обеспечивается заданная надежность тиристора (сотни миллиампер – сотни ампер).

6. Обратное максимальное напряжение $U_{обр. max}$ – напряжение, при котором тиристор может работать длительное время без нарушения его работоспособности (единицы – тысячи вольт).

7. Обратный ток $I_{обр.}$ – наибольшее значение обратного тока, протекающего через тиристор при $U_{обр.}$ (доли миллиампер).

8. Отпирающий ток управления $I_{у. вкл.}$ – наименьший ток в цепи управляющего электрода, необходимый для включения тиристора с момента подачи отпирающего импульса (десятки мА).

9. Время задержки $t_{зад.}$ – время до момента, когда анодный ток через тиристор возрастает до величины 0,1 от установившегося значения или время, в течение которого анодное напряжение на тиристоре уменьшится до 0,9 от начального значения с момента подачи на тиристор управляющего импульса. Эти определения равноценны при активной нагрузке во внешней цепи тиристора.

10. Время включения $t_{вкл.}$ – время с момента подачи отпирающего импульса до момента, когда напряжение на тиристоре уменьшается до 0,1 своего установившегося значения (мкс – десятки мкс), или время с момента подачи отпирающего импульса до момента, когда ток через тиристор возрастает до 0,9 своего установившегося значения.

11. Время выключения $t_{\text{выкл.}}$ – минимальное время, в течение которого к тиристорному прикладывается запирающее напряжение (десятки – сотни мкс).

12. Максимально допустимая скорость нарастания прямого напряжения $(dU/dt)_{\text{max}}$ – скорость нарастания прямого анодного напряжения, при котором еще не происходит переключения тиристора в открытое состояние при отключенном управляющем электроде.

13. Максимально допустимая скорость нарастания прямого тока $(dI/dt)_{\text{max}}$ – скорость нарастания прямого тока, не вызывающая необратимых процессов в тиристорной структуре.

14. Рассеиваемая мощность P (единицы – десятки ватт).

15. Помехоустойчивость $U_{\text{уп.}}$ – наибольшее напряжение, не вызывающее отпирания тиристора (доли вольт).

16. Запирающее напряжение на управляющем электроде $U_{\text{уз}}$ – напряжение, обеспечивающее требуемое значение запирающего тока управляющего электрода (единицы – десятки вольт).

8.3. Тринисторы

Тринисторы можно включать при напряжениях, меньших напряжения включения динистора. Для этого достаточно на одну из баз подать дополнительное напряжение таким образом, чтобы создаваемое им поле совпадало по направлению с полем анода на коллекторном переходе (рис. 8.4). Можно подать ток управления на вторую базу, но для этого на управляющий электрод необходимо подавать напряжение отрицательной полярности относительно анода, и поэтому различают тринисторы с управлением по катоду и с управлением по аноду.

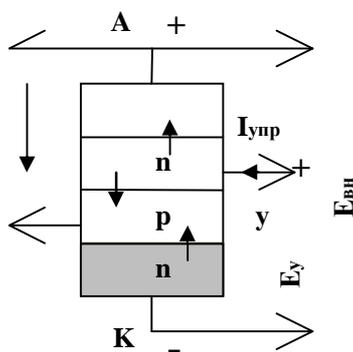


Рис. 8.4. Структура тринистора

На рис. 8.5 приведены ВАХ тринистора и внешний вид мощного тринистора.

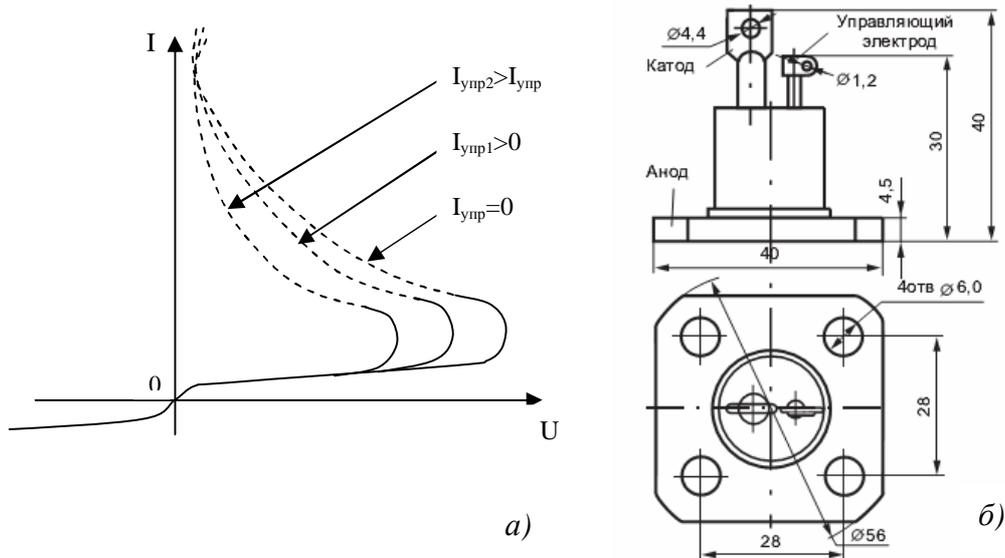


Рис.8.5. ВАХ тристора (а) и внешний вид мощного тристора (б)

Тиристоры делятся на запираемые и незапираемые. Запираемые тиристоры способны переключаться из открытого состояния в закрытое при подаче на управляющий электрод сигнала отрицательной полярности. Незапираемые тиристоры отключаются только при снижении анодного тока до уровня $I_{a\text{ упр}} < I_{\text{удерж}}$.

На рис. 8.6 – 8.11 изображены условные графические обозначения рассматриваемых в данной теме приборов.

На электрических принципиальных схемах позиционное обозначение тиристоров начинается с букв VS.

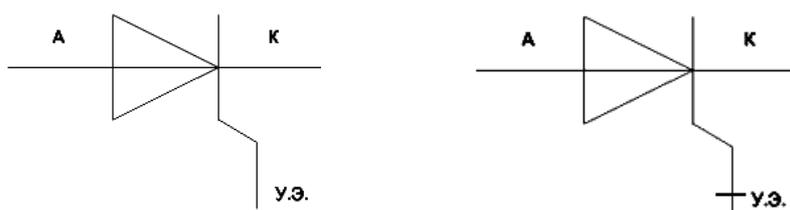


Рис. 8.6. УГО тристора с управлением по катоду (слева незапираемый, справа запираемый)

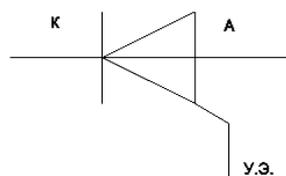


Рис. 8.7. УГО тристора с управлением по аноду

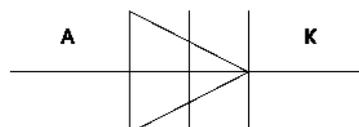


Рис. 8.8. УГО динистора

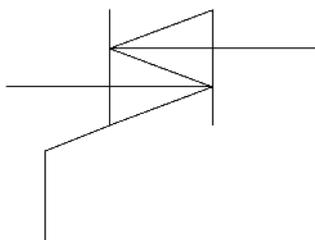


Рис. 8.9. УГО симистора с управлением по аноду

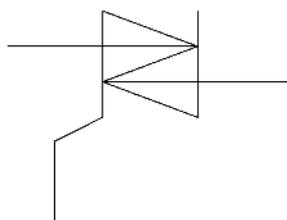


Рис. 8.10. УГО симистора с управлением по катоду

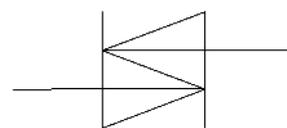


Рис. 8.11. УГО неуправляемого симистора

Маркировка расшифровывается так:

КН102Б – кремниевый динистор; КУ202А – кремниевый тринистор. Первая буква «К» обозначает материал кремний. Вторая – тип прибора – динистор или тринистор. Третья группа – трехзначный цифровой код – и четвертая группа расшифровываются так же, как и для всех рассмотренных ранее полупроводниковых приборов.

8.4. Симисторы

Подадим положительное напряжение на области p_1, n_1 , а отрицательное – на области p_2, n_3 .

Переход П1 (рис. 8.12) закрыт, и выключается из работы область n_1 . Переходы П2 и П4 открыты и выполняют функцию эмиттерных переходов. Переход П3 закрыт и выполняет функцию коллекторного перехода.

Таким образом, структура симистора будет представлять собой области p_1, n_2, p_2, n_3 , где p_1 будет выполнять функции анода, а n_3 – катода при прямом включении. Подадим напряжение плюсом на области p_2, n_3 , а минусом на области p_1, n_1 . Переход П4 закроется и выключит из работы область n_3 . Переходы П1 и П3 откроются и будут играть роль эмиттерных переходов. Переход П2 закроется и будет выполнять функцию коллекторного перехода.

Структура симистора будет иметь вид p_2-n_2, p_1-n_1 , где область p_2 будет являться анодом, а n_1 – катодом. В результате будет получаться структура в прямом включении, но при обратном напряжении. ВАХ будет иметь вид, изображенный на рис. 8.13.

Основным отличием и достоинством тиристорной структуры по сравнению с транзисторной является то, что тиристор обладает свойством памяти. Достаточно кратковременным сигналом переключить его в проводящее состояние, как он остается в этом состоянии до тех пор, пока ток через него не станет меньше тока выключения. Для управления транзистором

на его входе необходимо поддерживать сигнал управления. Крутизна фронтов импульсов, формируемых с помощью транзисторов, существенно зависит от величины и формы входного сигнала. В тиристорных схемах из-за лавинообразного переключения тиристора форма выходного сигнала практически не зависит от величины и формы входного. Все это позволяет получить в тиристорных схемах большой коэффициент усиления по мощности, крутые фронты импульсов сигнала и большой кпд.

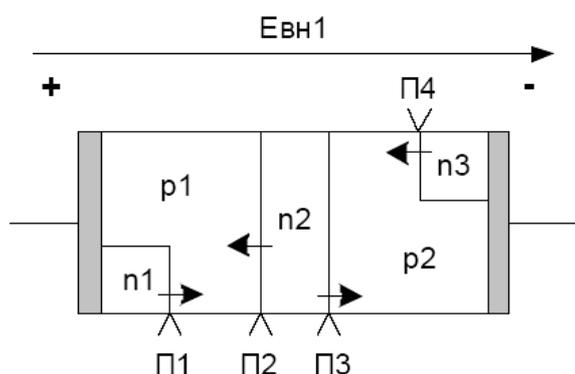


Рис. 8.12. Структура симистора

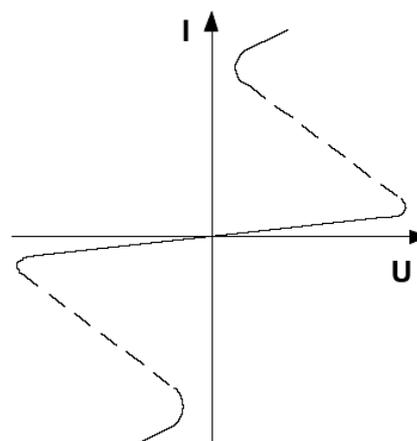


Рис. 8.13. Вах симистора

8.5. Однопереходные транзисторы (двухбазовые)

Однопереходный транзистор – это трехэлектродный полупроводниковый прибор с одним р-п-переходом и двумя выводами базовой области, предназначенный для переключения и генерирования электрических импульсов за счет модуляции сопротивления базы в результате инжекции через р-п-переход неосновных носителей заряда.

База однопереходного транзистора (рис. 8.14) выполнена из полупроводника n-типа, область эмиттера – из полупроводника р-типа. Причем эмиттерная область должна быть более низкоомной (высоколегированной), чем базовая. Это необходимо для того, чтобы при прямом включении р-п-перехода прямой ток через него имел в основном лишь дырочную составляющую. Дырки инжектируются в базу, где они являются неосновными носителями. Для компенсации этого объемного заряда через один из невыпрямляющих контактов в базу входят основные носители. При этом будет происходить уменьшение сопротивления базы и увеличение тока в цепи нагрузки (или между невыпрямляющими контактами).

При подаче напряжения $U_{б1}$, $U_{б2}$ на базовые выводы вдоль базы будет протекать ток $I_{б2}$, создающий продольное падение напряжения между базовыми выводами. Следовательно, на участке базы l_1 будет существовать падение напряжения $U_{вн} = I_{б2} \cdot r_{б}$, которое смещает р-п-переход в обратном направлении. Поэтому при напряжении на эмиттере $U_{эб} < U_{вн}$ р-п-переход смещен в обратном направлении и во входной цепи будет протекать небольшой обратный ток $I_{эб0}$.

Эквивалентная схема однопереходного транзистора приведена на рис. 8.15.

При подаче на эмиттер относительно Б1 напряжения $U_{эб} > U_{вн}$ р-п-переход откроется и неосновные носители – дырки начнут инжектироваться в базу. Причем инжекция вначале происходит только через часть перехода ближе к Б1, имеющей нулевой потенциал. В результате сопротивление $R_{б1}$ части базы протяженностью l_1 уменьшается, а это приведет к еще большему смещению р-п-перехода эмиттера в прямом направлении и к появлению на входной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 8.16).

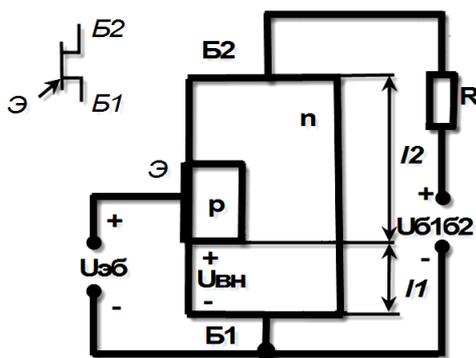


Рис. 8.14. Однопереходный транзистор: УГО, структура

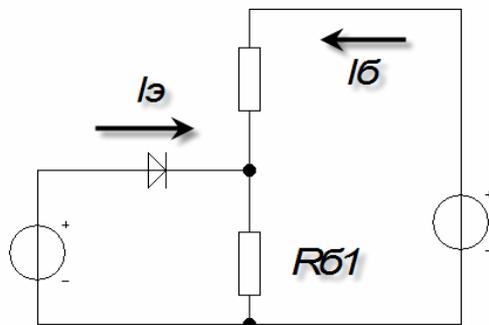


Рис. 8.15. Эквивалентная схема однопереходного транзистора

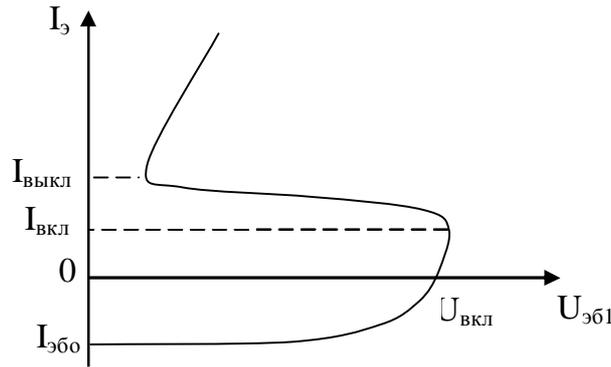


Рис 8.16. Входная характеристика однопереходного транзистора

Следовательно, однопереходный транзистор может находиться в двух устойчивых состояниях:

- в закрытом, которое характеризуется большими сопротивлениями между районными выводами однопереходного транзистора;
- в открытом (состоянии насыщения), которое характеризуется малыми сопротивлениями между выводами транзистора.

В открытом состоянии однопереходный транзистор будет находиться до тех пор, пока в базе будет поддерживаться избыточный заряд основных и неосновных носителей заряда, т.е. до тех пор, пока ток эмиттера будет превышать значение тока выключения.

Выходные, или межбазовые, статические характеристики однопереходного транзистора представляют собой зависимость тока через второй базовый вывод Б2 от межбазового напряжения при определенных токах эмиттера (рис. 8.17). При $I_э = 0$ выходная характеристика близка к прямой линии. Для прямых токов эмиттера, отличных от нуля, выходные характеристики тока оказываются нелинейными, так как суммарное напряжение на эмиттерном переходе изменяется с изменением выходного тока $I_б2$. Наличие отрицательного сопротивления позволяет использовать однопереходные транзисторы в качестве переключателей и генераторов. Примером может послужить транзистор КТ117.

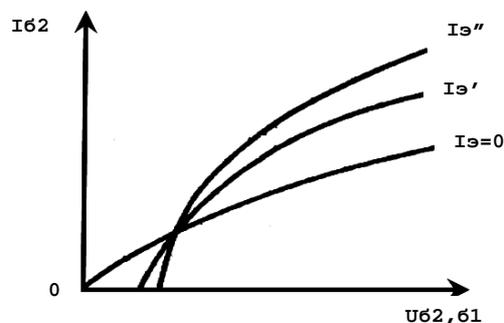


Рис. 8.17. Выходные (межбазовые) характеристики однопереходного транзистора

8.6. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

Устройство и особенности работы

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistors*) – полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого – трехслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком. На рис. 8.18 приведено условное обозначение IGBT.

Коммерческое использование IGBT началось с 80-х годов и уже претерпело четыре стадии своего развития.

I поколение IGBT (1985 г.) – предельные коммутируемые напряжения 1000 В и токи 200 А в модульном и 25 А в дискретном исполнении, прямые падения напряжения в открытом состоянии 3,0 – 3,5 В, частоты коммутации до 5 кГц (время включения / выключения около 1 мкс).

II поколение (1991 г.) – коммутируемые напряжения до 1600 В, токи до 500 А в модульном и 50 А в дискретном исполнении; прямое падение напряжения 2,5 – 3,0 В, частота коммутации до 20 кГц (время включения / выключения около 0,5 мкс).

III поколение (1994 г.) – коммутируемое напряжение до 3500 В, токи 1200 А в модульном исполнении. Для приборов с напряжением до 1800 В и токов до 600 А прямое падение напряжения составляет 1,5 – 2,2 В, частота коммутации до 50 кГц (время около 200 нс).

IV поколение (1998 г.) – коммутируемое напряжение до 4500 В, токи до 1800 А в модульном исполнении; прямое падение напряжения 1,0 – 1,5 В, частота коммутации до 50 кГц (время около 200 нс).

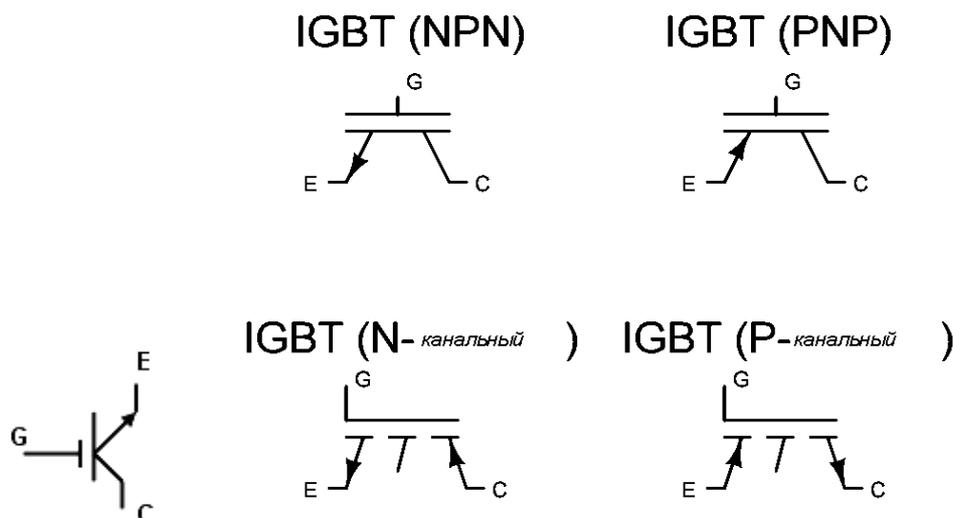


Рис. 8.18. Варианты условных обозначений IGBT

IGBT являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл – оксид – полупроводник, управляемых электрическим полем (MOSFET-*Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor*), и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Эквивалентная схема включения двух транзисторов приведена на рис. 8.19. Прибор введен в силовую цепь выводами биполярного транзистора E (эмиттер) и C (коллектор), а в цепь управления – выводом G (затвор). Таким образом, IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Соединения коллектора и истока (S), базы и стока (D) являются внутренними. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включенном состоянии. Следует обратить внимание, что биполярный транзистор оказывается включен в цепь с общим коллектором, что повышает коэффициент усиления по току (рис. 8.20). В отношении к внешней цепи коллектор и эмиттер меняют местами и проводимость транзистора меняется на противоположную в общем УГО.

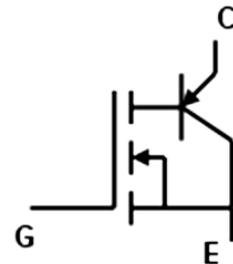


Рис. 8.19. Схема соединения транзисторов в единой структуре IGBT

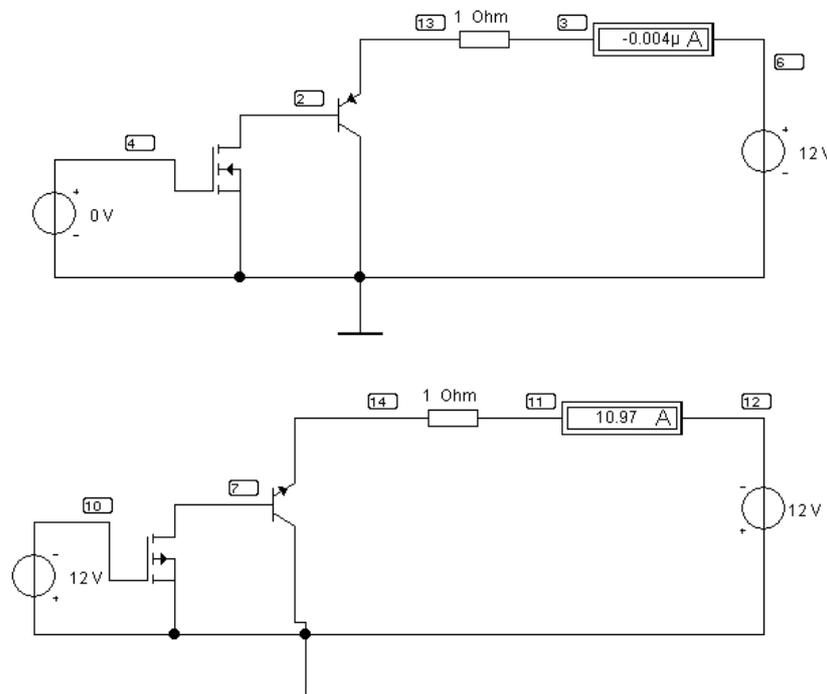
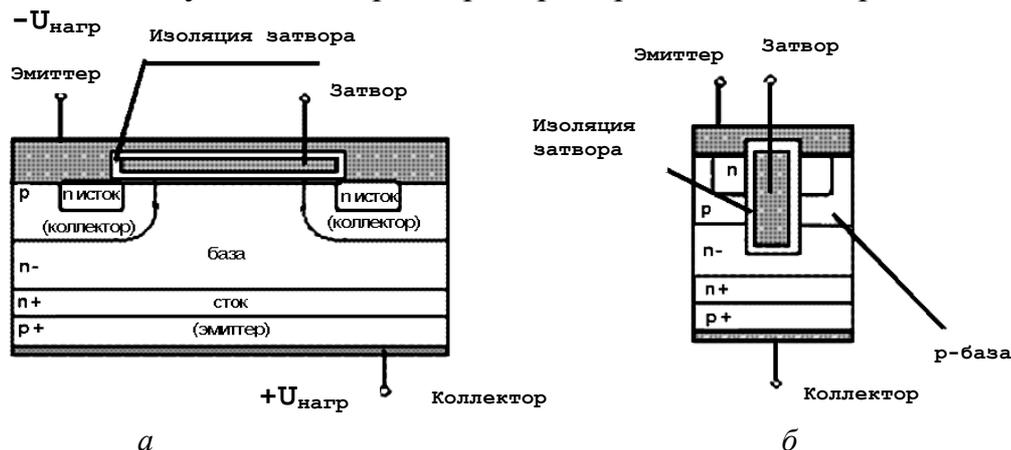


Рис. 8.20. Схемы соединения транзисторов различных типов проводимости

Схематичный разрез структуры IGBT показан на рис. 8.21, *а*. Биполярный транзистор образован слоями p^+ (эмиттер), n (база), p (коллектор); полевой – слоями n (исток), n^+ (сток) и металлической пластиной (затвор). Слои p^+ и p имеют внешние выводы, включаемые в силовую цепь. Затвор имеет вывод, включаемый в цепь управления. На рис. 8.21, *б* изображена структура IGBT IV поколения, выполненного по технологии «утопленного» канала (*trench-gate technology*), позволяющей исключить сопротивление между n -базами и уменьшить размеры прибора в несколько раз.



Процесс включения IGBT можно разделить на два этапа. При отсутствии сигнала на затворе внутренний переход эмиттер – база (p^+n^+) оказывается прямосмещенным, а коллектор – база ($p\ n^-$) – обратносмещенным. Транзистор заперт и ток не протекает.

После подачи положительного напряжения между затвором и истоком происходит открытие полевого транзистора (формируется n -канал между истоком и стоком через коллектор и базу). Движение зарядов из области n в область p приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору. Таким образом, полевой транзистор управляет работой биполярного.

Для IGBT с номинальным напряжением в диапазоне 600 – 1200 В в полностью включенном состоянии прямое падение напряжения, так же как и для биполярных транзисторов, находится в диапазоне 1,5 – 3,5 В. Это значительно меньше, чем характерное падение напряжения на силовых MOSFET в проводящем состоянии с такими же номинальными напряжениями.

С другой стороны, MOSFET с номинальными напряжениями 200 В и меньше имеют более низкое значение напряжения во включенном состоянии, чем IGBT, и остаются непревзойденными в этом отношении в области низких рабочих напряжений и коммутируемых токов до 50 А.

По быстродействию IGBT уступают MOSFET, но значительно превосходят биполярные. Типичные значения времени рассасывания накопленного заряда и спада тока при выключении IGBT находятся в диапазонах 0,2 – 0,4 и 0,2 – 1,5 мкс соответственно.

Область безопасной работы IGBT позволяет успешно обеспечить его надежную работу без применения дополнительных цепей формирования траектории переключения при частотах от 10 до 20 кГц для модулей с номинальными токами в несколько сотен ампер. Такими качествами не обладают биполярные транзисторы, даже соединенные по схеме Дарлингтона.

Так же как дискретные MOSFET вытеснили биполярные в ключевых источниках питания с напряжением до 500 В, так и дискретные IGBT вытесняют биполярные в источниках с более высокими напряжениями (до 3500 В).

IGBT-модули

В настоящее время транзисторы IGBT выпускаются, как правило, в виде модулей в прямоугольных корпусах с односторонним прижимом и охлаждением («Mitsubishi», «Siemens», «Semikron» и др.) и таблеточном исполнении с двухсторонним охлаждением («Toshiba Semiconductor Group»). Модули с односторонним охлаждением выполняются в прочном пластмассовом корпусе с паяными контактами и изолированным основанием. Все электрические контакты находятся в верхней части корпуса. Отвод тепла осуществляется через основание. Типовая конструкция модуля в прямоугольном корпусе показана на рис. 8.22.

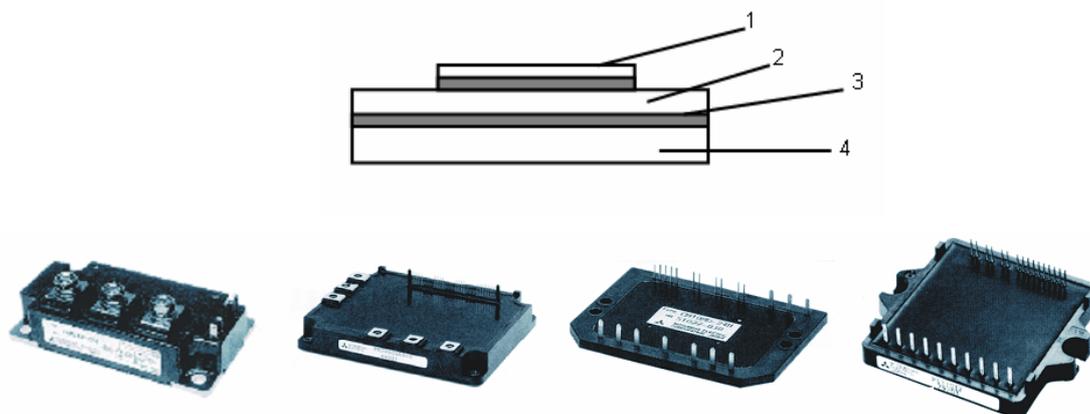


Рис. 8.22. Типовая конструкция и внешний вид IGBT-модулей:

1 – кристалл; 2 – слой керамики; 3 – спайка; 4 – нижнее тепловыводящее основание

Ток управления IGBT мал, поэтому цепь управления – драйвер конструктивно компактна. Наиболее целесообразно располагать цепи драйвера в непосредственной близости от силового ключа. В модулях IGBT драйверы непосредственно включены в их структуру. «Интеллектуальные»

транзисторные модули (ИТМ), выполненные на IGBT, также содержат «интеллектуальные» устройства защиты от токов короткого замыкания, системы диагностирования, обеспечивающие защиту от исчезновения управляющего сигнала, одновременной проводимости в противоположных плечах силовой схемы, исчезновения напряжения источника питания и других аварийных явлений. В структуре ИТМ на IGBT предусматривается в ряде случаев система управления с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и однокристальная ЭВМ. Во многих модулях имеется схема активного фильтра для коррекции коэффициента мощности и уменьшения содержания высших гармонических колебаний в питающей сети.

IGBT-модуль по внутренней электрической схеме может представлять собой единичный IGBT, двойной модуль (*half-bridge*), где два IGBT соединены последовательно (полумост), прерыватель (*chopper*), в котором единичный IGBT последовательно соединен с диодом, однофазный или трехфазный мост. Во всех случаях, кроме прерывателя, модуль содержит параллельно каждому IGBT встроенный обратный диод. Наиболее распространенные схемы соединений IGBT-модулей приведены на рис. 8.23.

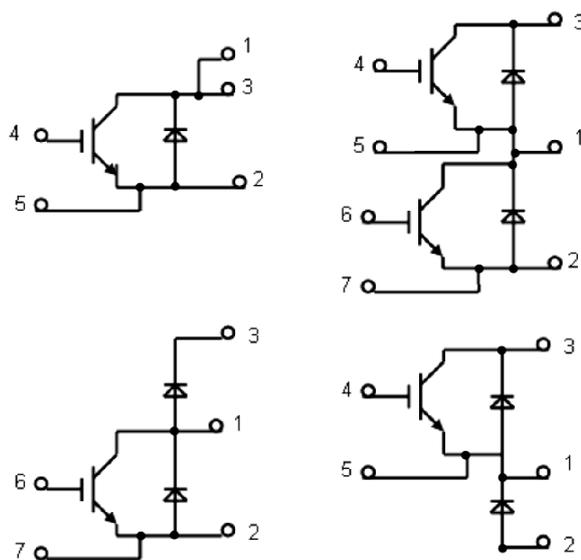


Рис. 8.23. Схемы IGBT-модулей

Основные области применения IGBT-модулей

Современные IGBT-модули находят сегодня широкое применение при создании неуправляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов для питания двигателей постоянного и переменного тока средней мощности (рис. 8.24), преобразователей индукционного нагрева, сварочных аппаратов, источников бесперебойного питания, бытовой и студийной техники.

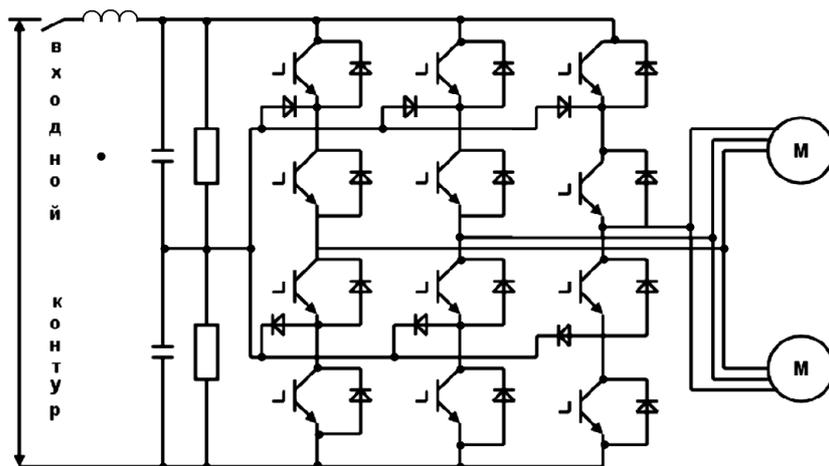


Рис. 8.24. Схема тягового привода системы ONIX 3000 на IGBT-транзисторах электровоза АМ96 для системы электроснабжения 3 кВ

Впервые тяговый преобразователь на транзисторах IGBT (четырёх-квadrантные регуляторы, импульсные инверторы и тормозной регулятор) применен в Европе на серийном электропоезде переменного тока промышленной частоты Heathrow Express (HEX).

Заключение

На сегодняшний день IGBT как класс приборов силовой электроники занимает и будет занимать доминирующее положение для диапазона мощностей от единиц киловатт до единиц мегаватт. Дальнейшее развитие IGBT связано с требованиями рынка и будет идти по пути:

- повышения диапазона предельных коммутируемых токов и напряжений (единицы килоампер, 5 – 7 кВ);
- повышения быстродействия;
- повышения стойкости к перегрузкам и аварийным режимам;
- снижения прямого падения напряжения;
- разработки новых структур с плотностями токов, приближающимися к тиристорным;
- развития «интеллектуальных» IGBT (с встроенными функциями диагностики и защит) и модулей на их основе;
- создания новых высоконадежных корпусов;
- повышения частоты и снижения потерь SiC с быстровосстанавливающимися защитными диодами;
- применения прямого водяного охлаждения для исключения соединения основание – охладитель.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о типах тиристорov. Чем они отличаются и для каких целей используются?
2. В чем достоинства тиристорov по сравнению с ключами на биполярных и полевых транзисторах?
3. В чем отличие запираемых и незапираемых тиристорov?
4. Приведите ВАХ и основные параметры различных типов тиристорov.
5. Приведите УГО тиристорov.
6. Расскажите о механизме работы триодного тиристора на примере его ВАХ и структуры.
7. Приведите схему снятия ВАХ управляемого триодного тиристора.
8. В чем принцип работы однопереходного транзистора? Для каких целей его используют?
9. Приведите схему соединения биполярного и полевого транзисторов в структуре IGBT.
10. На примере структуры расскажите о работе транзисторов данного типа.
11. Приведите достоинства и недостатки IGBT-транзисторов по сравнению с тиристорами, биполярными и полевыми транзисторами.
12. Соберите в программе EWB схемы на рис 8.20 и убедитесь в их работоспособности.
13. Почему внутренняя структура биполярного транзистора в IGBT отличается и по типу проводимости и по расположению областей?

Тема 9. Оптоэлектронные приборы

Термины: *источники излучения (излучатели), приемники излучения (фотоприемники) и оптроны (оптопары), приборы когерентной (с лазерами) и некогерентной (со светоизлучающими диодами) оптоэлектроники, сила света и мощность светового потока, спектр излучения, фоточувствительность, динамический диапазон, внутренний фотоэффект, темновое сопротивление, интегральная чувствительность, фотодиодный и фотогальванический режим, «плавающая» база, ПЗС (CCD), оптопара, оптрон, ГРИ, ППИ, ВЛИ, ЖК(LCD).*

9.1. Общая характеристика оптоэлектронных приборов

9.2. Излучатели

9.3. Приемники оптического излучения

9.4. Понятие о приборах с зарядовой связью. Многоэлементные приемники изображения

9.5. Оптроны и оптоэлектронные ИМС

9.6. Индикаторы

9.1. Общая характеристика оптоэлектронных приборов

Оптоэлектроника – это раздел электроники, связанный главным образом с изучением эффектов взаимодействия между электромагнитными волнами оптического диапазона и электронами вещества (преимущественно твердых тел) и охватывающий проблемы создания оптоэлектронных приборов (в основном методами микроэлектронной технологии), в которых эти эффекты используются для генерации, передачи, обработки, хранения и отображения информации.

Для решения перечисленных задач в оптоэлектронных приборах используются информационные сигналы в оптической и электрической формах, но определяющими являются оптические сигналы – именно этим достигается то качественно новое, что отличает оптоэлектронику.

Оптоэлектронными называют **приборы**, чувствительные (преобразующие в иную физическую величину) к электромагнитному излучению в видимой, инфракрасной и (или) ультрафиолетовой областях, а также приборы, производящие или использующие такое излучение.

В конкретном оптоэлектронном приборе наличие всех трех составляющих данного выше определения не является обязательным, но перечисленные отличительные признаки могут быть воплощены в большей или меньшей степени. Это позволяет разделить опто- и фотоэлектронные приборы (фотоэлектронные умножители, ионно-лучевые приборы).

На практике широко используются *источники излучения* (излучатели), *приемники излучения* (фотоприемники) и *оптроны* (оптопары).

Как отдельные приборы, так и сложные оптоэлектронные системы создаются из отдельных элементов. Основными оптоэлектронными элементами являются:

- источники когерентного оптического излучения (полупроводниковый лазер);
- источники некогерентного оптического излучения (светоизлучающий диод);
- активные и пассивные оптические среды;
- приемники оптического излучения (фотодиод);
- оптические элементы (линза);
- волоконно-оптические элементы (волоконно-оптический жгут);
- интегрально-оптические элементы (интегрально-оптическое зеркало).

Широко используются оптроны, в которых применяются пары светодиод – фотодиод, светодиод – фототранзистор, светодиод – фототиристор.

По функциональному назначению в классе оптоэлектронных приборов, кроме миниатюрных источников излучения и одно- и многоэлементных приемников излучения, следует выделить такие приборы, как светодиод и лазер.

9.2. Излучатели

Излучатель – источник, световой поток или яркость которого является функцией электрического сигнала, поступающего на его вход. По виду используемого излучателя выделяют приборы *когерентной* (с лазерами) и *некогерентной* (со светоизлучающими диодами) оптоэлектроники. **На электрических принципиальных схемах позиционное обозначение единичных светоизлучательных приборов (индикаторов) рекомендуется начинать с букв HL. Допускается обозначения приборов буквами, принятыми для обозначений в пределах функциональных групп (резисторов – R, диодов – VD, транзисторов – VT).**

9.2.1. Излучающий диод (светодиод)

Светоизлучающими диодами называют полупроводниковые диоды, в которых осуществляется непосредственное преобразование электрической энергии в энергию светового излучения. Они работают при прямом напряжении, в них при рекомбинации выделяется энергия в виде квантов электромагнитной энергии, равных ширине запрещенной зоны. Для получения видимого излучения нужны полупроводники с широкой запрещенной зоной (более 1,8 эВ). Поэтому для изготовления светодиодов используют такие полупроводниковые соединения, как фосфид галлия (дает красное свечение), карбид кремния (желтое свечение) и ряд других. Вторым элементом в маркировке используют букву L. Светоизлучающие диоды применяют в качестве индикаторов. Широкое применение находят буквенно-цифровые индикаторы в виде матриц, содержащих несколько светодиодных структур, расположенных так, что при соответствующей комбинации светящихся элементов получается изображение цифр или букв.

Принцип действия. При прямом включении основные носители заряда переходят через p-n-переход и там рекомбинируют. Рекомбинация связана с выделением энергии. Для большинства полупроводниковых материалов эта энергия тепловая. Только для некоторых типов на основе арсенида галлия ширина запрещенной зоны ΔW достаточно велика, и длина волны лежит в видимой части спектра.

$$\lambda = \frac{h}{\Delta W}.$$

При обратном включении через р-п-переход переходят неосновные носители заряда в область, где они становятся основными. Рекомбинация и свечение светодиода отсутствуют. Основные характеристики:

1. Яркостная характеристика – это мощностная зависимость излучения от прямого тока: $P_U = f(I_{np.})$ (рис. 9.1).

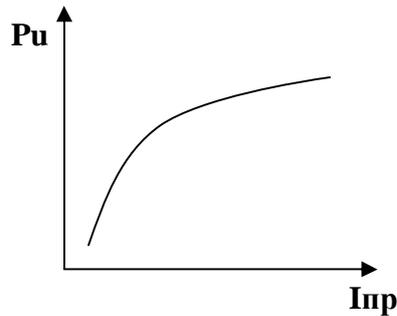


Рис. 9.1. Яркостная характеристика

2. Спектральная характеристика – это зависимость мощности излучения от длины волны: $P_U = f(\lambda)$ (рис 9.2, а).

3. Диаграмма направленности (рис 9.2, б).

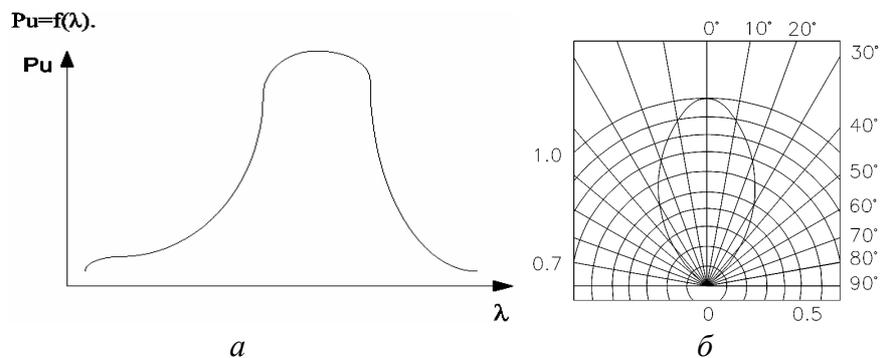


Рис. 9.2. Спектральная характеристика (а), диаграмма направленности (б)

Основные параметры: яркость свечения при максимальном прямом токе; полная мощность излучения $P_{U.max}$. Для излучающих диодов, работающих в видимом диапазоне (длина волны от 0,38 до 0,78 мкм, частота около, но меньше 1015 Гц), широко используются следующие характеристики:

- зависимость яркости излучения L от тока диода i (яркостная характеристика);
- зависимость силы света I_v от тока диода i .

Изобразим яркостную характеристику для светоизлучающего диода типа АЛ102А (рис. 9.4). Цвет свечения этого диода – красный.

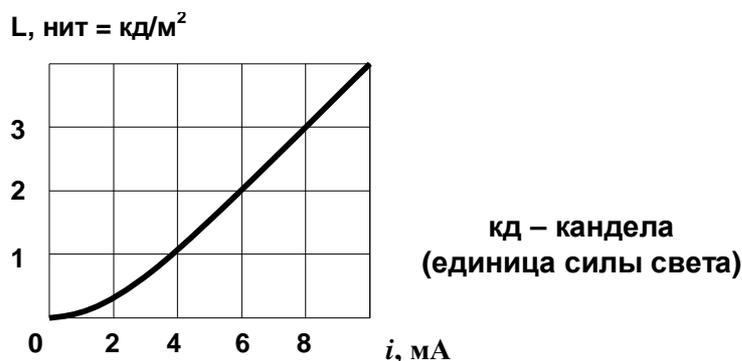


Рис. 9.4. Яркостная характеристика светоизлучающего диода типа АЛ102А

Изобразим график зависимости силы света от тока для светоизлучающего диода типа АЛ316А (рис. 9.5) (цвет свечения – красный).

Изобразим зону возможных положений (рис. 9.6) графика зависимости мощности излучения от тока для излучающего диода типа АЛ119А, работающего в инфракрасном диапазоне (длина волны 0,93...0,96 мкм).

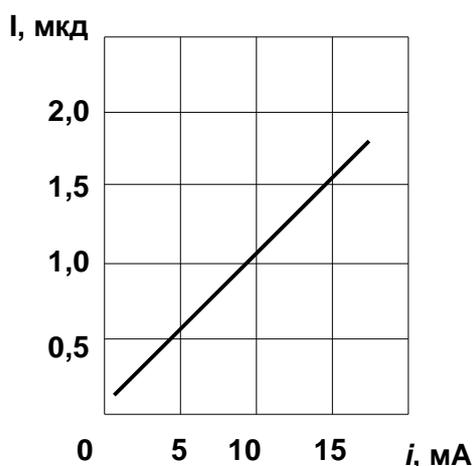


Рис. 9.5. Зависимость силы света от прямого тока АЛ302

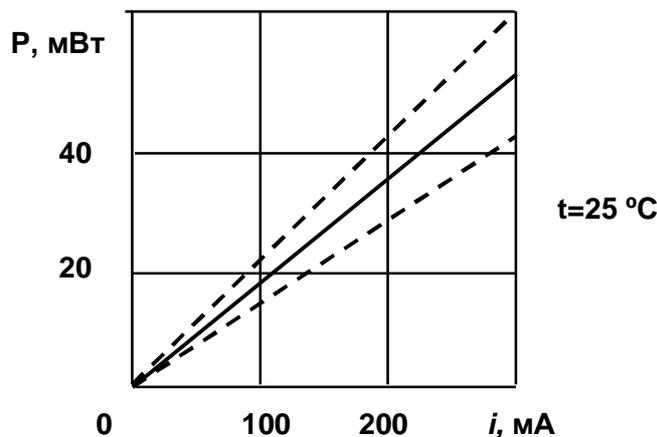


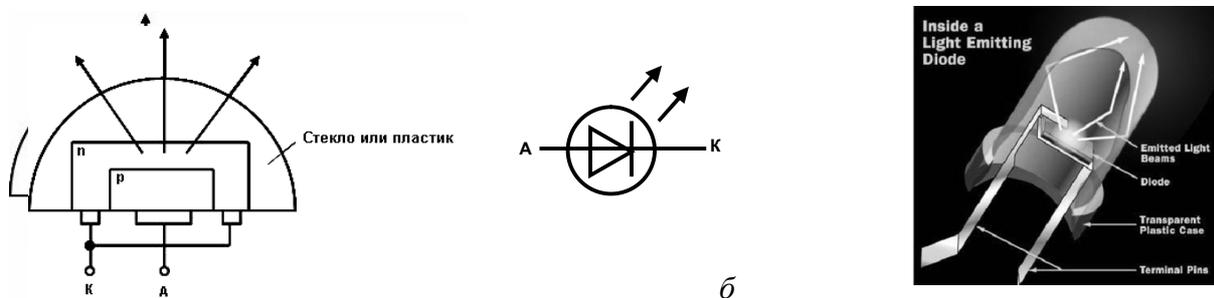
Рис. 9.6. Зависимость мощности излучения от прямого тока

Приведем для диода типа АЛ119А некоторые его параметры:

- время нарастания импульса излучения – не более 1000 нс;
- время спада импульса излучения – не более 1500 нс;
- постоянное прямое напряжение при $i = 300$ мА – не более 3 В;
- постоянный максимально допустимый прямой ток при $t < +85$ °С – 200 мА;
- температура окружающей среды –60...+85 °С.

Для информации о возможных значениях коэффициента полезного действия отметим, что излучающие диоды типа 3Л115А, АЛ115А, работающие в инфракрасном диапазоне (длина волны около 0,95 мкм, ширина спектра не более 0,05 мкм), имеют коэффициент полезного действия не менее 10 %. Практические разработки ученых в последние годы привели к созданию сверхмощных светодиодов на органических структурах (OLED) с перекрытием всего видимого спектра излучения и КПД до 55 и 70 %.

Устройство. Схематическое изображение структуры излучающего диода представлено на рис. 9.7, а, его условное графическое обозначение – на рис. 9.7, б, фрагменты datasheet производителя – на рис. 9.7, в.

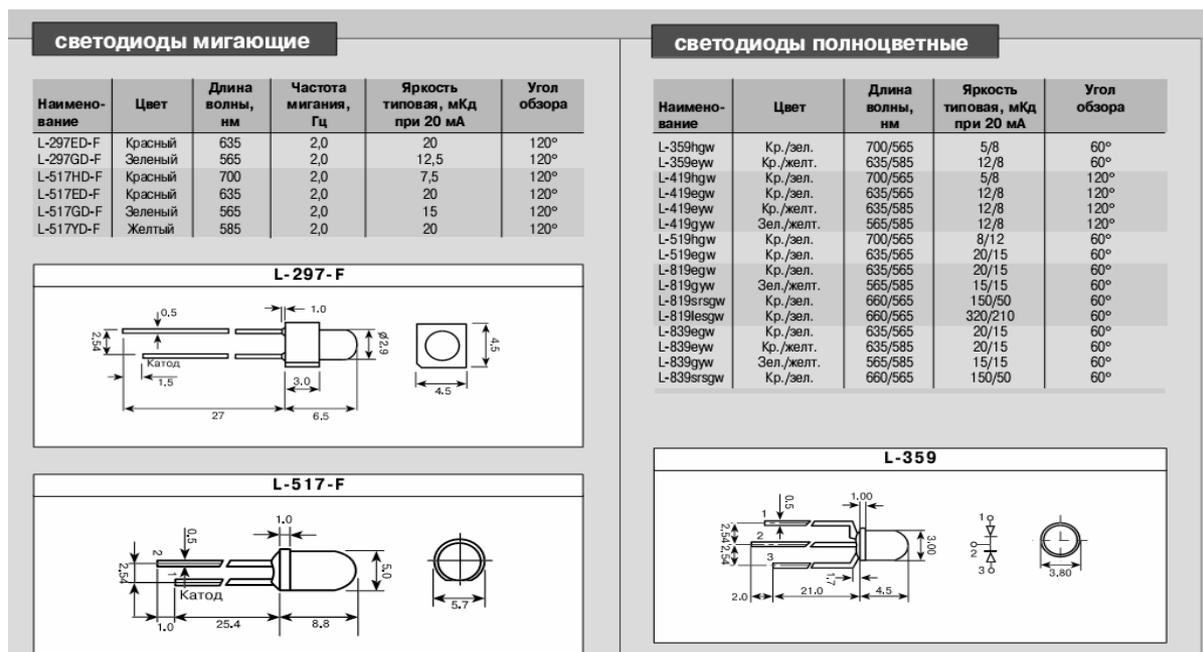


СВЕТОДИОДЫ ОДНОЦВЕТНЫЕ				
Наименование	Цвет	Длина волны, нм	Яркость типовая, мкД при 20 мА	Угол обзора
L-204				
L-204HD	Красный	700	3	70°
L-204GD	Зеленый	565	6	70°
L-204YD	Желтый	585	6	70°
L-204ED	Красный	635	8	70°
L-204SRD	Красный	660	50	70°
L-312				
L-312ED	Красный	635	8	135°
L-312GD	Зеленый	565	6	135°
L-312YD	Желтый	585	6	135°

СВЕТОДИОДНЫЕ МАТРИЦЫ				
Наименование	Цвет	Длина волны, нм	Яркость тип. (10мА), мкД	
A/C-2570e	Красный	635	2800	
A/C-3580sr	Красный	660	8000	
A/C-3580eg	Кр./зел.	635/565	3000/2800	
A/C-3880g	Зеленый	565	2800	
A/C-3880sr	Красный	660	8000	
A/C-5570eg	Кр./зел.	635/565	3600/3400	
A/C-5580g	Зеленый	565	3400	
A/C-5580sr	Красный	660	8000	
A/C-5880g	Зеленый	565	3400	
A/C-5880sr	Красный	660	8000	
A/C-5880y	Желтый	585	1600	
A/C-5880eg	Кр./зел.	635/565	3600/3400	
C-9443e	Красный	635	9000	
C-9443sr	Красный	660	16000	
C-9442esg	Кр./зел.	635/570	11000/11000	
C-9440rgb	Кр./зел./Голубой	660/570/430	60000/25000/18000	

A — общий анод
C — общий катод

Рис. 9.7. Кострукция и характеристики светодиодов (см. также с. 162)



6

Рис. 9.7. Окончание

Излучение возникает при протекании прямого тока диода в результате рекомбинации электронов и дырок в области р-п-перехода и в областях, прилегающих к указанной области. При рекомбинации излучаются фотоны.

В настоящее время источники излучения обозначаются как частный случай индикаторов.

9.2.2. Лазеры

Лазером называется оптический квантовый генератор (ОКГ) или, иначе говоря, генератор света высокой направленности, монохроматичности и когерентности. Слово «лазер» образовано от английской аббревиатуры «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», т.е. «усиление света путем вынужденной эмиссии излучения». Лазером часто называют и оптический квантовый усилитель (ОКУ), который используется для увеличения мощности выходного излучения ОКГ.

В основе работы лазера лежит принцип создания так называемой *инверсии населенностей* уровней атомов и молекул вещества. Этот принцип является основным условием, определяющим способность той или иной среды к лазерной генерации. Далеко не каждое вещество может быть использовано в качестве лазерной среды, т.е. источника монохроматического, когерентного излучения. Для создания инверсии населенностей применяют различные способы энергетической «накачки» рабочей среды. Наиболее распространенными являются способы оптической, рентгеновской и электронно-лучевой накачки, накачки высоковольтным разрядом, диодной

накачки и инъекции электронов. Существуют еще химические и газодинамические лазеры, в которых возбуждение среды возникает в результате химической реакции или преобразования внутренней энергии в световую. Лазерная рабочая среда помещается в оптический резонатор, внутри которого вынужденное излучение набирает энергию за счет многократных проходов между зеркалами резонатора. Характеристикой любого резонатора является его добротность: чем она выше, тем большую энергию имеет выходящее из него излучение. Лазеры могут работать в режиме свободной генерации или в режиме с управлением (модуляцией) добротностью. В настоящее время часто используются термины «излучение» и «пучок», соответствующие первоначальным понятиям «свет» и «луч», так как сейчас наряду с лазерами видимого оптического диапазона существуют лазеры инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов.

Основными понятиями, относящимися к лазерам, являются: длина волны излучения; тип лазерного источника – непрерывный или импульсный; мощность и энергия; качество лазерного излучения.

Лазеры инфракрасного (ИК) диапазона 0,75...1500 мкм – это диодные лазеры (рис 9.8), лазеры на кристаллах граната и сапфира, легированные неодимом, иттрием и галлием, лазеры на красителях, а также лазеры на стеклах и волоконные лазеры.

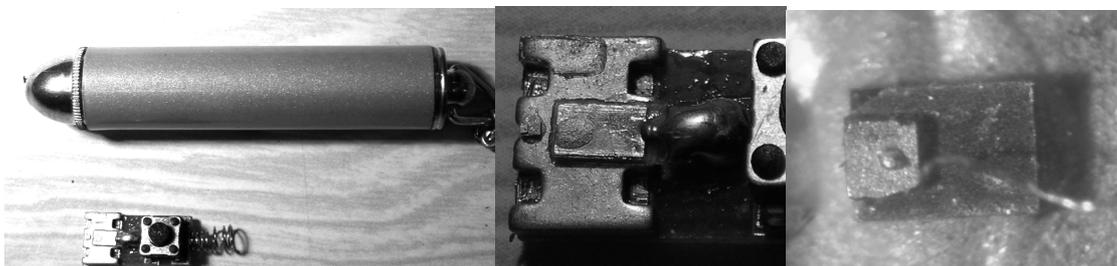


Рис 9.8. Размеры и конструкция простейшего полупроводникового лазерного диода

Лазеры видимого диапазона (400...750 нм) составляют наиболее многочисленный и разнообразный класс оптических квантовых усилителей. Это газовые (гелий-кадмиевый, гелий-неоновый, аргоновый и криптоновый, лазеры на парах различных металлов), твердотельные (рубиновый), полупроводниковые лазеры, жидкостные лазеры на красителях и некоторые химические лазеры. Особую популярность в последнее время приобрели компактные «зеленые» лазеры с диодной накачкой, которые, по всей вероятности, вскоре заменят громоздкие и энергоемкие аргоновые лазеры, требующие водяного охлаждения.

Два наиболее распространенных типа ультрафиолетовых (УФ) лазеров (с длиной волны излучения до 400 нм) – это эксимерные лазеры и

твердотельные лазеры в режиме генерации гармоник. Самым коротковолновым лазером, работающим в вакуумном ультрафиолете, является лазер на молекулярном фторе с длиной волны генерации 157 нм. Существуют эксимерные лазеры с длинами волн 193, 248, 308 и 351 нм.

Многие типы лазеров могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах, а некоторые – только в импульсном или только непрерывном. Импульсные лазеры, работающие на одной и той же длине волны, могут отличаться частотой генерации и длительностью импульса. Для лазеров, работающих в непрерывном режиме генерации, принято говорить о мощности выходного излучения, а для импульсных лазеров – об энергии в импульсе.

Понятие «качество пучка» включает в себя довольно широкий спектр характеристик выходного лазерного излучения. Это степень пространственной и временной когерентности, поляризация, однородность и наличие «горячих точек», а также уровень шумов и стабильность частоты и мощности во времени.

9.3. Приемники оптического излучения

9.3.1. Общая характеристика

Приемник оптического излучения (фотоприемник) представляет собой прибор, в котором под действием оптического излучения происходят изменения, позволяющие обнаружить это излучение и измерить его характеристики. **Позиционное обозначение фотоприемников рекомендуется начинать с букв VL.**

К *фотоприемникам дискретных сигналов* предъявляются следующие требования:

1. Высокая чувствительность на заданной фиксированной длине волны (для «неоптоэлектронных» фотоприемников требования к спектральной чувствительности более сложные (например, равномерность в заданном диапазоне и др.).

2. Большой КПД энергетического преобразования.

3. Высокое быстродействие.

Требования к *фотоприемникам световых образов* заметно отличаются от перечисленных выше:

1. Высокая пространственная разрешающая способность (большое число элементов).

2. Широкий спектр.

3. Широкий динамический диапазон (диапазон волн, в котором работает фотоприемник).

4. Минимальный уровень шумов.

Итак, кратко две основные группы оптоэлектронных фотоприемников характеризуются следующим образом:

– *дискретные* (одноэлементные) фотоприемники с малой апертурой (малой площадью активной поверхности), высокой монохроматической чувствительностью в заданной части спектра (в основном 0,4...1,55 мкм), с высоким быстродействием, предназначенные для приема коротких оптических импульсов;

– *многоэлементные* фотоприемники с высокой разрешающей способностью, высокой фоточувствительностью и низким уровнем шумов в широкой спектральной области (главным образом в видимом диапазоне), предназначенные для восприятия световых образов.

9.3.2. Фоторезисторы

Фоторезистором называют полупроводниковый резистор, сопротивление которого чувствительно к электромагнитному излучению в оптическом диапазоне спектра. Маркировка начинается с букв СФ.

Дадим схематическое изображение структуры фоторезистора (рис. 9.9, а) и его условное графическое обозначение (см. рис. 9.9, б).

Поток фотонов, падающих на полупроводник, вызывает появление пар электрон – дырка, увеличивающих проводимость (уменьшающих сопротивление). Это явление называют *внутренним фотоэффектом* (эффектом фотопроводимости).

Фоторезисторы часто характеризуются зависимостью тока i от освещенности E (измеряется в люксах, лк) при заданном напряжении на резисторе. Это *люкс-амперная характеристика*.

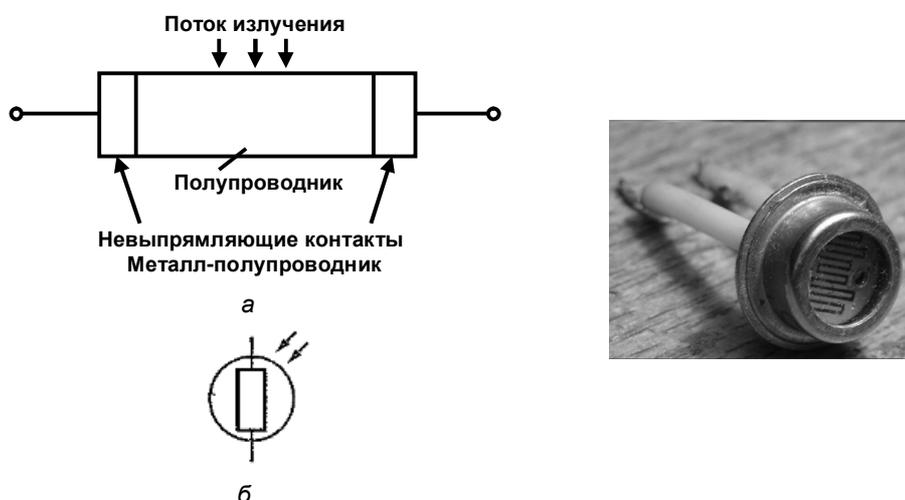


Рис. 9.9. Структура (а), УГО (б) и внешний вид полупроводникового фоторезистора

Изобразим такую характеристику для фоторезистора типа ФСК-Г7, который работает в видимой части спектра (рис. 9.10).

Часто используют следующие параметры фоторезисторов:

- номинальное темновое (при отсутствии светового потока) сопротивление (для ФСК-Г7 это сопротивление равно 5 МОм);
- интегральная чувствительность (чувствительность называют интегральной, так как ее определяют при освещении фоторезистора светом сложного спектрального состава).

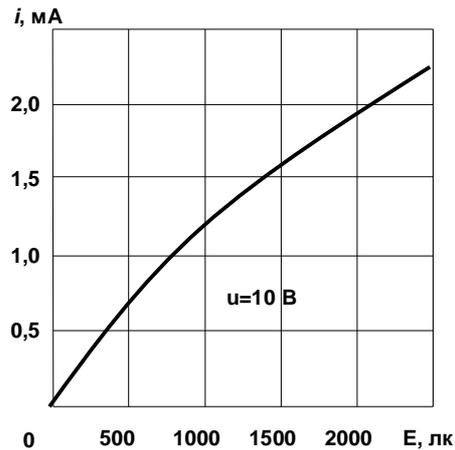


Рис. 9.10. Люкс-амперная характеристика фоторезистора типа ФСК-Г

Интегральная чувствительность (токовая чувствительность к световому потоку) S определяется выражением:

$$S = i_{\phi} / \Phi,$$

где i_{ϕ} – фототок (это разность между током при освещении и током при отсутствии освещения); Φ – световой поток (измеряется в люменах, лм).

Для фоторезистора ФСК-Г7 $S = 0,7$ А/лм.

9.3.3. Фотодиоды

Фотодиод – фоточувствительный полупроводниковый диод с р-п-переходом (между двумя типами полупроводника или между полупроводником и металлом) без внутреннего усиления. Второй элемент в маркировке – буква Ф.

Устройство и основные физические процессы. Изобразим упрощенную структуру фотодиода (рис. 9.11, а), его условное графическое обозначение (см. рис. 9.11, б) и фрагменты datasheet производителя (см. рис. 9.11, в).

Физические процессы, протекающие в фотодиодах, носят обратный характер по отношению к процессам, протекающим в светодиодах. Основным физическим явлением в фотодиоде является генерация пар электрон – дырка в области р-п-перехода и в прилегающих к нему областях под действием излучения.

Электрическое поле р-п-перехода разделяет электроны и дырки. Неосновные носители электричества, для которых поле является ускоряющим, выводятся этим полем за переход. Основные носители задерживаются полем в своей области проводимости.

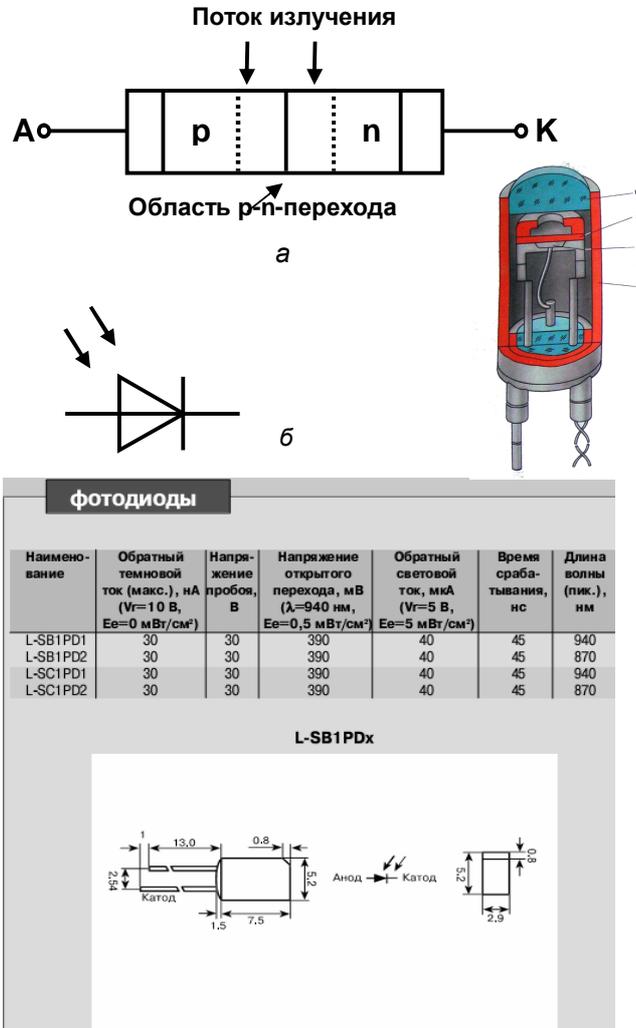


Рис. 9.11. Конструкция, УГО и параметры полупроводникового фотодиода

Генерация пар электрон – дырка приводит к увеличению обратного тока диода при наличии обратного напряжения и к появлению напряжения $U_{ак}$ между анодом и катодом при разомкнутой цепи. Причем в соответствии со сделанным замечанием о разделении электронов и дырок $U_{ак} > 0$ (дырки переходят к аноду, а электроны – к катоду).

Принцип действия. При облучении полупроводника световым потоком Φ возрастает фотогенерация собственных носителей зарядов (см. рис. 9.11), что приводит к увеличению количества как основных, так и неосновных носителей зарядов.

Однако фотогенерация в значительной степени будет влиять на обратный ток, так как неосновных носителей зарядов значительно меньше, чем основных.

Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов: фотодиодном (режим фотопреобразователя) или фотогальваническом (фотогенераторный, вентильный режим).

В *фотодиодном* режиме на диод подают обратное напряжение. При изменении светового потока изменяются ток в цепи и напряжение на диоде. Режим фотопреобразователя соответствует соотношениям $u < 0$ и $i < 0$. В этом режиме фотодиод потребляет энергию ($u \cdot i > 0$) от некоторого обязательно имеющегося в цепи внешнего источника напряжения (рис. 9.12). Графический анализ этого режима выполняется при использовании линии нагрузки, как и для обычного диода. При этом характеристики обычно условно изображают в первом квадранте.

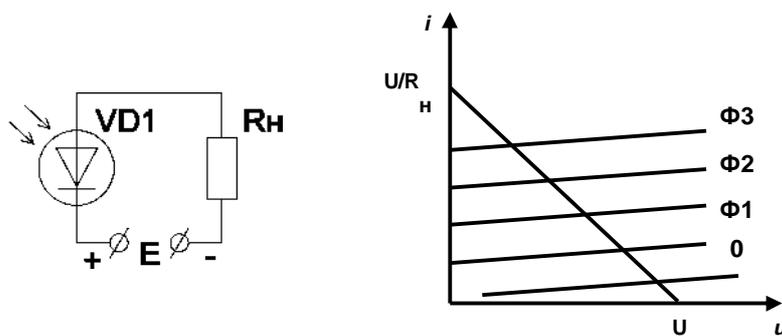


Рис. 9.12. Включение в фотодиодном режиме

В *фотогальваническом режиме* внешний источник напряжения в цепи отсутствует. По точкам пересечения вольт-амперных характеристик с осью напряжения (рис 9.13) можно определить фото-ЭДС при разных световых потоках. У кремниевых фотодиодов она составляет около 0,5 – 0,55 В.

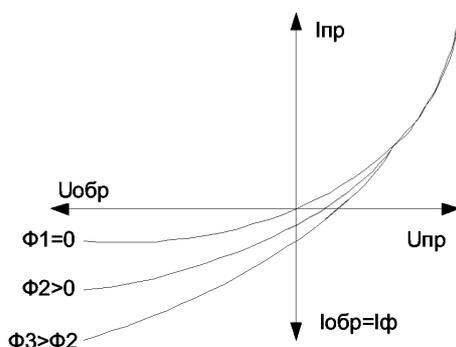


Рис. 9.13. ВАХ фотодиода

Режим фотогенератора имеет место при $u > 0$ и $i < 0$. При этом диод отдает энергию во внешнюю цепь ($u \cdot i < 0$). В этом режиме работают солнечные элементы. В настоящее время коэффициент полезного действия солнечных элементов достигает 20 %. Пока энергия, вырабатываемая солнечными элементами, примерно в 50 раз дороже энергии, получаемой из угля, нефти или урана, но ожидается, что стоимость энергии, получаемой с помощью солнечных батарей, будет снижаться.

Фотодиоды, работающие в фотогальваническом режиме, обычно называют полупроводниковыми фотоэлементами. Их используют для прямого преобразования световой энергии в электрическую. Оптимальным режимом для фотоэлементов является такой режим, когда в нагрузку передается наибольшая мощность. В этом случае напряжение на нагрузке составляет 0,35 – 0,4 В, а плотность тока – 15 – 20 мА/см² при средней освещенности солнечным светом.

Характеристики и параметры. Фотодиоды удобно характеризовать семейством вольт-амперных характеристик, соответствующих различным световым потокам или различным освещенностям.

Обратимся к вольт-амперным характеристикам (ВАХ) фотодиода (см. рис. 9.13).

Пусть вначале световой поток равен нулю, тогда ВАХ фотодиода фактически повторяет ВАХ обычного диода. Если световой поток не равен нулю, то фотоны, проникая в область р-п-перехода, вызывают генерацию пар электрон – дырка. Под действием электрического поля р-п-перехода носители заряда движутся к электродам (дырки – к электроду слоя р, электроны – к электроду слоя n). В результате между электродами возникает напряжение, которое возрастает при увеличении светового потока. При положительном напряжении анод – катод ток диода может быть отрицательным (четвертый квадрант характеристики). При этом прибор не потребляет, а вырабатывает энергию. Для фотодиодов $I_{обр}$ – это фототок. Зависимость фототока I_ϕ от величины светового потока $I_\phi = f(\Phi)$ – на рис. 9.14.

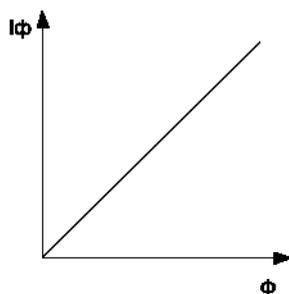


Рис. 9.14. Зависимость фототока от величины светового потока

Спектральная характеристика – это зависимость фототока от длины волны светового излучения: $I_{\phi} = f(\lambda)$.

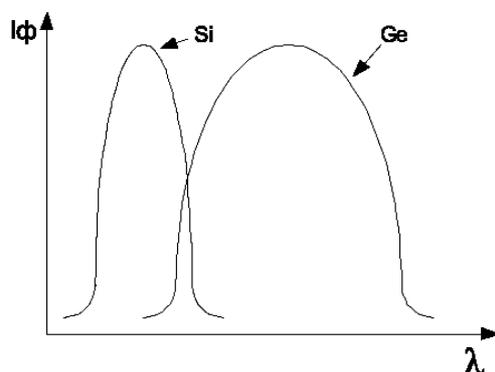


Рис. 9.15. Спектральная характеристика фотодиодов

Темновой ток I_m – ток через фотодиод при отсутствии светового потока и при заданном рабочем напряжении.

Интегральная чувствительность S – это отношение фототока к световому потоку:

$$S = \frac{I_{\phi}}{\Phi}.$$

Рабочее напряжение $U_{\text{раб.}}$ – это обратное напряжение, подаваемое на фотодиод, при котором все параметры фотодиода будут оптимальными.

Фотодиоды являются более быстродействующими приборами по сравнению с фоторезисторами. Они работают на частотах 10⁷ – 10¹⁰ Гц. Фотодиод часто используется в оптопарах светодиод – фотодиод. В этом случае различные характеристики фотодиода соответствуют различным токам светодиода (который при этом создает различные световые потоки).

9.3.4. Фототранзисторы

Фототранзистором называется фотогальванический приемник светового излучения, фоточувствительный элемент которого представляет собой структуру транзистора, обеспечивающую внутреннее усиление (рис. 9.16), причем база транзистора может электрически не соединяться с внешними цепями, сам фототранзистор может иметь лишь два вывода из корпуса. Такое использование называется включением с «плавающей» базой.

В корпусе прибора предусмотрено прозрачное окно, через которое световой поток попадает на одну из областей транзистора. При освещении базы в ней происходит фотогенерация носителей зарядов. Неосновные носители заряда уходят в коллектор через закрытый коллекторный переход, а основные скапливаются в базе, повышая тем самым отпирающее действие

эмиттерного перехода. Ток эмиттера, а, следовательно, и ток коллектора возрастают. Значит, управление коллекторным током фототранзистора осуществляется током базы транзистора.

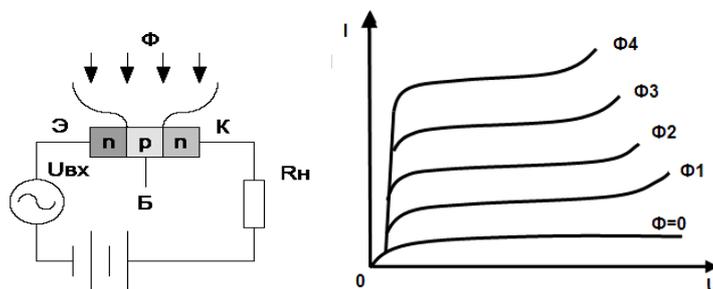


Рис. 9.16. Конструкция, включение и ВАХ фототранзистора

Напряжение питания подводят так, чтобы коллекторный переход был закрыт, а эмиттерный – открыт. База может быть отключенной (схема с «плавающей» базой). Вольт-амперные характеристики фототранзистора показаны на рис. 9.16, внешний вид и схемы включения – на рис 9.17.

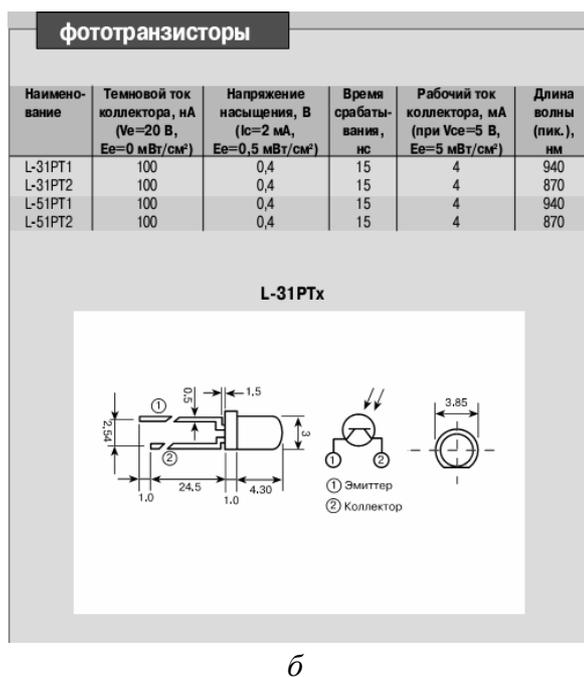
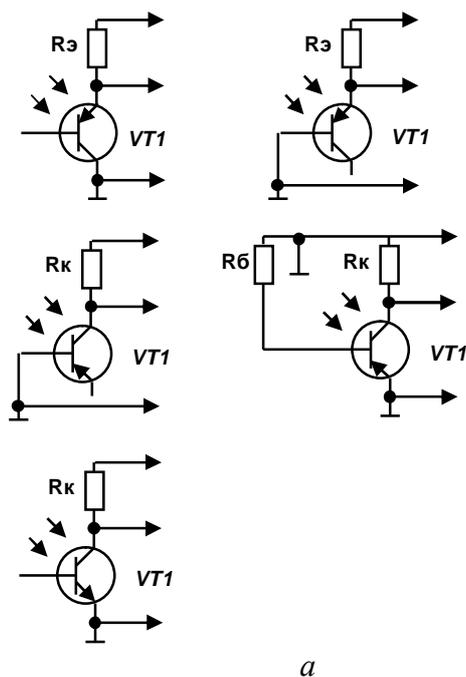


Рис. 9.17. Схемы включения и параметры фототранзисторов

Однопереходный фототранзистор и его характеристики при различных уровнях освещенности представлены на рис. 9.18.

Однопереходный фототранзистор в простейшем варианте представляет собой стержень из полупроводникового материала с металлическими контактами на противоположных концах (выводы Б1 и Б2) и выводом эмиттера Э.

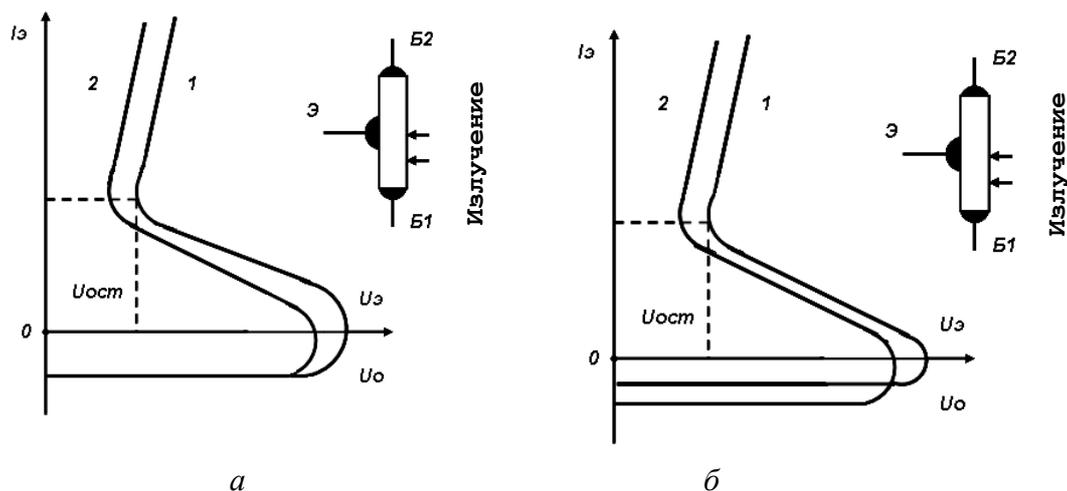


Рис 9.18. Однопереходный фототранзистор и его характеристики при различных уровнях освещенности

Вольт-амперные характеристики прибора имеют S-образный вид с перегибами в точках $U_{осм}$ и U_o ; параметром является освещенность: кривая 1 соответствует большей освещенности, 2 – меньшей (см. рис. 9.18).

При облучении нижней части базы концентрация носителей заряда в ней растет и напряжение срыва (U_o) уменьшается (см. рис. 9.18, а). Генерируемые под воздействием света неосновные носители ускоряются электрическим полем в направлении базы Б1, и обратный ток эмиттера не изменяется.

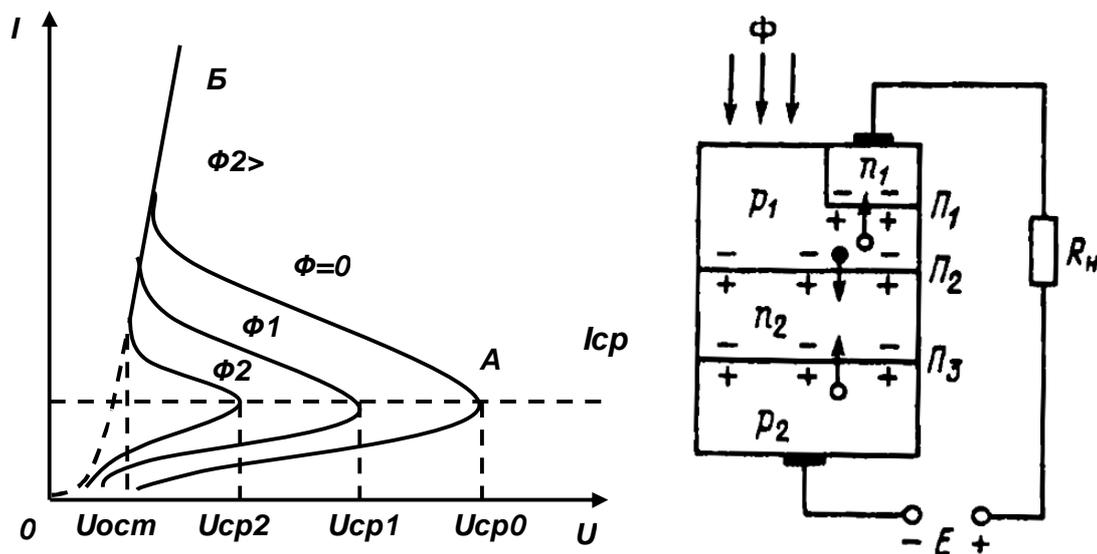
При облучении части базы, расположенной напротив эмиттера при обратном его включении, часть неравновесных неосновных носителей переходит к контакту базы Б1, а часть попадает в область объемного заряда p-n-перехода и увеличивает его обратный ток (см. рис. 9.18, б).

9.3.5. Фототиристоры

Фототиристор – фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения, имеющий структуру тиристора, которая обеспечивает переключающие свойства прибора. Маркировка силовых фототиристорov содержит буквы ТФ. Прибор представляет собой четырехслойную структуру с двумя p-n-переходами, один из которых смещен в прямом, а другой – в обратном направлении. При таком включении переходов фототиристор можно представить в виде двух последовательно включенных транзисторов p-n-p и n-p-n с положительной обратной связью через общий коллектор. На рис. 9.19 – вольт-амперные характеристики фототиристора. Сильная положительная обратная связь является причиной появления на ВАХ фототиристора участка с отрицательным динамическим сопротивлением.

Тиристор может находиться в одном из двух устойчивых состояний, соответствующих положению рабочей точки либо ниже прямой I_{cp} . (фототиристор закрыт), либо выше ее (фототиристор открыт). Переход из одного устойчивого состояния в другое происходит скачком (на отрицательном участке АБ состояние прибора неустойчиво), когда напряжение на управляющем электроде или освещенность превышают некоторое пороговое значение. При этом переходе сопротивление фототиристора и ток через него изменяются в $10^6 \dots 10^7$ раз; примерно от 10^8 Ом (ток около 10^{-6} А) в закрытом состоянии до 10^{-1} Ом. Таким образом, фототиристор имеет очень высокий коэффициент усиления по току и по мощности.

Свет в фототиристоре поглощается обеими базами, т.е. с ростом освещенности увеличиваются токи эмиттеров. С ростом освещенности напряжение срыва уменьшается.



9.19. ВАХ и схема включения фототиристора

9.4. Понятие о приборах с зарядовой связью. Многоэлементные приемники изображения

Для начала отметим, что ПЗС относятся к изделиям функциональной электроники, то есть их нельзя представить как совокупность транзисторов или же конденсаторов.

Для начала представим себе МОП-ПЗС (приборы с зарядовой связью; в английской аббревиатуре – CCD, charge-coupled devices). Приборы с зарядовой связью представляют собой совокупность МДП-структур (металл – диэлектрик – полупроводник).

На рис. 9.20 приведена схема, поясняющая устройство и основные физические принципы работы ПЗС. Приборы с зарядовой связью представляют собой линейку или матрицу последовательно расположенных МДП-структур. Величина зазора между соседними МДП-структурами невелика и составляет 1...2 мкм. ПЗС-элементы служат для преобразования оптического излучения в электрические сигналы и передачи информации от одного элемента электронной схемы к другому.

Рассмотрим принцип работы ПЗС. При подаче обедняющего импульса напряжения V_{G1} на затвор 1-го элемента у поверхности полупроводника образуется неравновесный слой обеднения. Для электронов в полупроводнике p -типа это соответствует формированию под затвором 1-го элемента потенциальной ямы. Известно, что неравновесное состояние сохраняется в период времени t , соизмеримый со временем генерационно-рекомбинационных процессов $\tau_{ген.}$. Поэтому все остальные процессы в ПЗС-элементах должны проходить за периоды времени меньше $\tau_{ген.}$. Пусть в момент времени $t_1 \gg \tau_{ген.}$ под затвор 1-го элемента инжектирован каким-

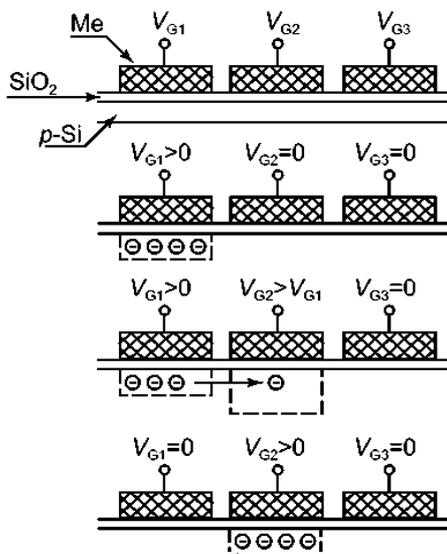


Рис. 9.20. Устройство и принцип работы приборов с зарядовой связью

либо образом информационный заряд электронов (см. рис. 9.20, б). Теперь в момент времени $t_2 > t_1$, но $t_2 \ll \tau_{ген.}$ на затвор 2-го ПЗС-элемента подадим напряжение $V_{G2} > V_{G1}$, способствующее формированию более глубокой потенциальной ямы для электронов под затвором 2-го элемента. Вследствие диффузии и дрейфа возникнет поток электронов из участка под первым элементом в участок под вторым элементом, как показано на рис. 9.20, в. Когда весь информационный заряд перетечет в потенциальную яму 2-го ПЗС-элемента, напряжение на затворе V_{G1} снимается, а на затворе V_{G2} уменьшается до значения, равного V_{G1} (см. рис. 9.19, г).

Произошла передача информационного заряда. Затем цикл повторяется и заряд передается дальше в район 3-го ПЗС-элемента. Для того, чтобы приборы с зарядовой связью эффективно функционировали, необходимо, чтобы время передачи $t_{пер.}$ от одного элемента к другому было много

меньше времени генерационно-рекомбинационных процессов ($t_{пер.} \ll \tau_{ген.}$). Не должно быть потерь информационного заряда в ОПЗ вследствие захвата на поверхностные состояния, в связи с чем требуются МДП-структуры с низкой плотностью поверхностных состояний ($N_{ss} \approx 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$). Как правило, ПЗС выпускаются в интегральном исполнении. В маркировке ИМС ПЗС используют буквы:

- ЦЛ – линейные;
- ЦМ – матричные;
- ЦП – прочие.

9.4.1. Аналоговые ПЗС

Число носителей, накапливаемых в зарядовом пакете, может изменяться в широких пределах. Его минимальная величина определяется шумом переноса, возникающим из-за захвата носителей ловушками на границе полупроводник – диэлектрик. Эти носители через неопределенное время могут высвободиться, и возникают флуктуации числа переносимых носителей. Шумы переноса часто оценивают средним квадратичным значением флуктуации, которое в лучших образцах составляет около 30 носителей.

Максимальная плотность носителей под затвором достигает 10^4 на 1 мкм^2 площади электрода. Типичная площадь ячейки ПЗС примерно 100 мкм^2 , поэтому максимальное число носителей в зарядовом пакете приближается к 10^6 . Таким образом, ПЗС могут осуществлять передачу в виде зарядовых пакетов аналоговых сигналов в динамическом диапазоне U_{max}/U_{min} порядка $10^4 \dots 10^3$. По мере приближения к максимальной величине наступает замедление роста зарядового пакета, а затем насыщение. С этим связано возникновение нелинейных искажений, которые при передаче сигналов большой величины могут достигнуть нескольких процентов. Тем не менее, структура ПЗС является уникальным устройством, способным запомнить и передать с определенной задержкой во времени довольно большой объем аналоговой информации. Главным достоинством ПЗС-структуры является возможность работы с аналоговыми и дискретными сигналами, что позволило создавать приборы от линий задержек и фильтров до элементов памяти, процессоров и фотопреобразователей изображения.

9.4.2. ПЗС-преобразователи изображения

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) относятся к классу твердотельных полупроводниковых приемников. Первыми приемниками такого типа были фотодиоды, и уже на заре своего появления они позволили сделать гигантский скачок в области регистрации световых потоков и изображе-

ний. Достаточно упомянуть в качестве примера удачную регистрацию с помощью фотодиода явления солнечного затмения, наблюдавшегося берлинскими учеными в Египте в 1911 г.

С тех пор прошло много времени, фотодиоды совершенствовались, но их основной недостаток – одноканальность все же не позволил им найти широкого применения. С конца 30-х годов среди светоприемников начали появляться телевизионные трубки, завоевавшие к концу 70-х лидирующее положение в этой области.

Было разработано сравнительно много приборов различных типов: ортиконы, изоконы, секоны, видиконы, плюмбиконы (в телевизионном вещании трубки с обратным пучком), кремниконы и суперкремниконы, диссекторы (специализированные трубки с повышенной квантовой эффективностью) и т.д.

Все они имели ряд серьезных недостатков: большие размеры, низкую квантовую эффективность (на уровне 5 – 10 %), малый динамический диапазон и т.д.

Революционное изменение ситуации произошло с появлением твердотельных полупроводниковых приемников нового поколения. Квантовая эффективность современных полупроводниковых приемников излучения достигает 95 – 98 %, т.е. практически каждый падающий на прибор фотон регистрируется системой со 100 %-ной вероятностью.

В 1970 г. были созданы первые приборы с зарядовой связью, в которых технология твердотельных приемников проявилась особенно успешно.

Вначале ПЗС применялись как более эффективные многоканальные заменители фотодиодов, матриц фотодиодов. С наибольшим успехом ПЗС-матрицы регистрировали слабые световые потоки в таких отраслях, как микробиофизика, химическая физика, ядерная физика, астрофизика.

С 1975 г. ПЗС начали активно внедряться в качестве телевизионных светоприемников. А в 1989 г. ПЗС-детекторы применялись уже почти в 97 % всех телевизионных приемников. Для сравнения, десятью годами ранее ПЗС были представлены всего двумя процентами.

Долгое время широкому применению ПЗС-приемников в телевизионной технике препятствовали недостатки в технологиях изготовления светочувствительных элементов – кристаллических основ необходимого размера. Светоприемная область была неоднородна по квантовому выходу, наблюдалась заметная геометрическая нестабильность (плавающее низкое

разрешение), присутствовали разного рода шумы как на малых масштабах (от пиксела к пикселу), так и на больших пространственных масштабах (на шкалах 10 – 100 пиксел).

Только с развитием и совершенствованием технологии создания ПЗС и с существенным скачком в развитии сопутствующих электронных средств и, прежде всего, с увеличением мощностей и быстродействия АЦП стало возможным более широкое применение ПЗС.

Сегодня телекамеры на основе ПЗС-матриц можно встретить в самых разных областях производства, в различных сферах услуг, сервиса, в системах охраны, в быту. Появление миниатюрных телекамер с применением ПЗС-матриц с размерами пиксела в несколько микрон дали возможность применять их в микрохирургии, микробиологии, микровидеооптике, что привело к созданию специальной микровидеотехники (рис. 9.21).

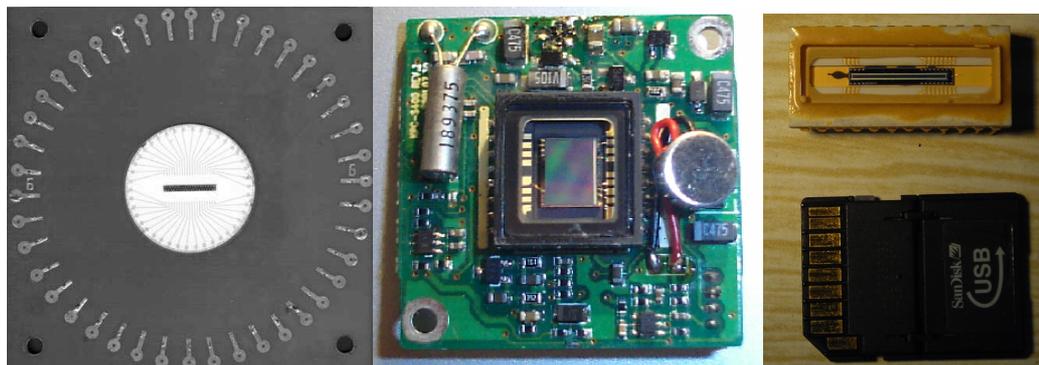


Рис. 9.21. Фото одной из первых советских ПЗС-матриц (размер светочувствительной области 20x2 пиксела) (слева), современной цветной PAL видеокамеры со звуком и разрешением 640x480 (в центре) и линейно-матричного ПЗС-преобразователя для факсов А1122(справа)

9.5. Оптроны и оптоэлектронные ИМС

Оптопарой называют оптоэлектронный прибор, в котором конструктивно объединены в общем корпусе излучатель на входе и фотоприемник на выходе, взаимодействующие друг с другом оптически и электрически.

Оптопары широко используются в микроэлектронной и электротехнической аппаратуре для обеспечения электрической развязки при передаче информационных сигналов, бесконтактной коммутации сильноточных и высоковольтных цепей и создания перестраиваемых фотоприемников в устройствах контроля и регулирования.

Оптопара содержит излучатель на входе и фотоприемник на выходе (рис. 9.22, *а*), взаимодействующие друг с другом оптически и электрически. Связи между компонентами оптопары могут быть прямыми или обратными, положительными или отрицательными, одна из связей (электрическая или оптическая) может отсутствовать.

Иногда оптопару отождествляют с оптроном, однако последний термин является более широким. Между элементами оптрона может быть осуществлена как оптическая, так и электрическая связь (прямая или обратная, положительная или отрицательная). Вход и выход оптрона также могут быть как электрическими, так и оптическими. В настоящее время широкое распространение получили лишь оптроны с прямой оптической связью, т.е. оптопары.

Основные функциональные разновидности этих приборов представлены на рис. 9.22, *б, в*. Оптопара с прямой оптической и обратной электрической связью (см. рис. 9.22, *б*) используется как элемент развязки, т.е. оптрон с оптическим входом и выходом, и представляет собой преобразователь световых сигналов. Это может быть простое усиление (ослабление) интенсивности света, преобразование спектра или направления поляризации, преобразование некогерентного излучения в когерентное и т.п.

Если в таком оптроне фотоприемник и излучатель многоэлементные, то он может выполнять функцию преобразователя изображений. В оптроне с электрической и оптической связями (см. рис. 9.22, *в*) при определенных условиях может осуществляться частичная или полная регенерация (восстановление) входного сигнала за счет обратной связи, в силу чего на вольт-амперной характеристике появляется падающий участок или несколько участков – такой прибор получил название регенеративного оптрона. В регенеративном оптроне могут реализоваться любые комбинации видов входных и выходных сигналов (электрических или оптических).

Важным элементом оптопары является оптический канал между излучателем и фотоприемником. Существуют три его разновидности. Прежде всего это *простой* светопровод, предназначенный для передачи энергии излучения на фотоприемник; обычно он выполняется в виде прозрачной среды. Возможно и такое конструктивное решение, при котором в зазоре между излучателем и приемником имеется доступ извне; в этом случае мы имеем оптопару с *открытым оптическим каналом*. Наконец, прозрачная среда может быть выполнена из материала, светопропускание которого изменяется при внешних воздействиях; такой прибор называют оптопарой с *управляемым оптическим каналом*.

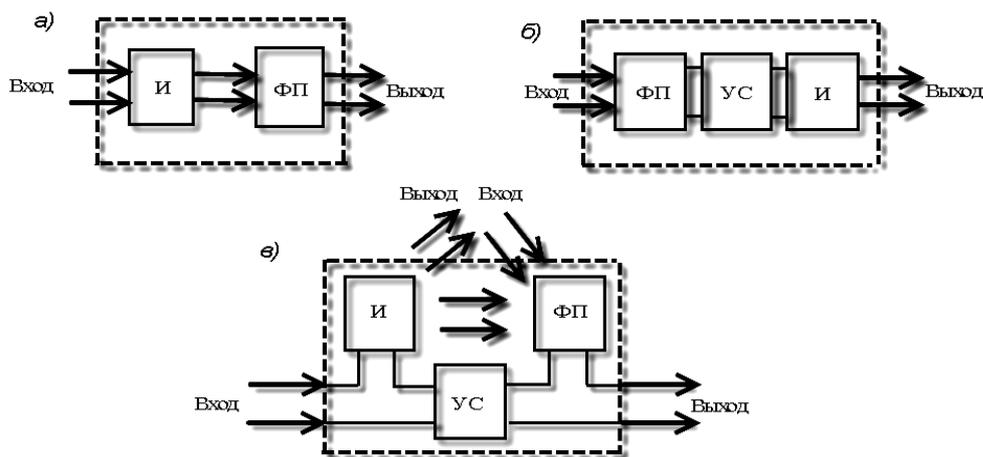


Рис. 9.22. Электрические и оптические связи в оптронах:
 а – оптопара для электрической развязки (с внутренней фотонной связью);
 б – оптрон с оптическими входом и выходом (с внутренней гальванической связью);
 в – регенеративный оптрон; И – излучатель, ФП – фотоприемник, УС – усилитель

Светоизлучателем служит излучающий диод, фотоприемником может служить фоторезистор, фотодиод, фототранзистор, поэтому оптроны называют резисторными, транзисторными, диодными, симисторными, диносторными. Основная задача оптрона – обеспечить передачу информации без электрической связи между входом и выходом.

Маркировка оптронов (табл. 9.1) расшифровывается так:

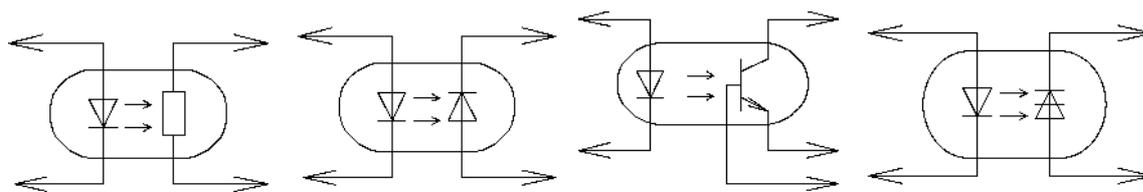
- 1 группа – материал полупроводника. Буква «А» означает арсенид галлия.
- 2 группа. Буква «О» означает, что мы имеем дело с оптроном.
- 3 группа. Тип оптрона по виду фотоприемника. «Д» – диодный оптрон, «У» – тиристорный.
- 4 группа – группа по электрическим параметрам.
- 5 группа – модификация прибора в четвертой группе.

Таблица 9.1

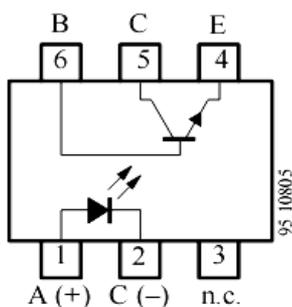
Маркировка оптронов

А	О	Д	103	А
1	2	3	4	5

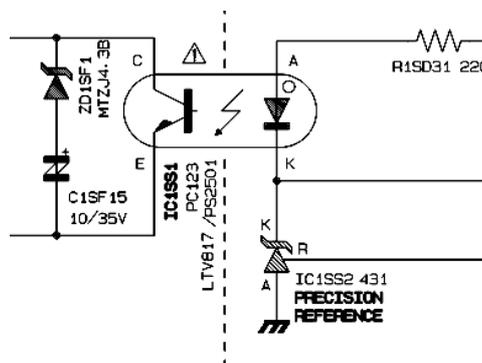
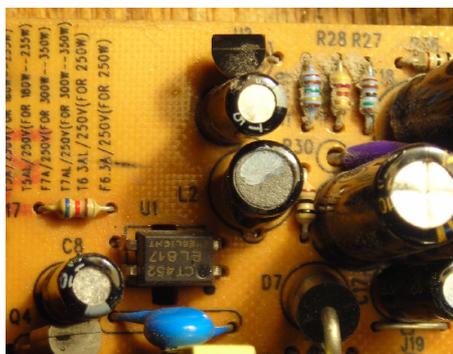
УГО оптронов, внешний вид и цоколевка изображены на рис. 9.23, а и б, применение оптрона в источнике питания – на рис. 9.23, в. **Позиционное обозначение на схемах начинается с VV либо DA (как элемент аналоговых ИМС), на зарубежных схемах – IC или U.**



a



б



в

Рис. 9.23. УГО и внешний вид некоторых оптронов

Оптоэлектронные датчики – приборы, преобразующие внешние физические воздействия – температуру, давление, влажность, ускорение, магнитное поле и другие – в электрические сигналы. Действие этих приборов основано на различных принципах. К датчикам относятся формирователи сигналов изображения и оптопары с открытым оптическим каналом. Особенно интенсивное развитие этого направления связано с появлением волоконно-оптических датчиков, в которых внешние воздействия изменяют характеристики оптического сигнала, распространяющегося по волокну.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) – устройства и системы, содержащие гибкий волоконно-оптический световод (в виде кабеля), сочлененный с излучателем на одном (передающем) конце и с фотоприемником на другом (приемном).

Физическую основу ВОЛС определяют процессы распространения оптических сигналов по волоконному световоду, а также светогенерационные и фотоэлектрические явления в излучателе и приемнике.

Перечислим основные достоинства оптоэлектронных приборов (ОЭП):

- Высокая пропускная способность оптического канала. Частота колебаний на три – пять порядков выше, чем в освоенном радиотехническом диапазоне. Это значит, что во столько же раз возрастает и пропускная способность оптического канала передачи информации.

- Идеальная электрическая развязка входа и выхода. Использование в качестве носителя информации электрически нейтральных фотонов обуславливает бесконтактность оптической связи. Отсюда следуют идеальная электрическая развязка входа и выхода; однонаправленность потока информации и отсутствие обратной реакции приемника на источник; помехозащищенность оптических каналов связи; скрытность передачи информации по оптическому каналу связи.

Как недостатки можно выделить следующие особенности ОЭП:

- Малый коэффициент полезного действия. Коэффициент полезного действия преобразований вида E (освещенность) $> L$ (яркость) и $L > E$ в лучших современных приборах (лазеры, светодиоды, р-і-n-фотодиоды), как правило, не превышает 10...20 % (только в последнее время 50 – 70 %). Поэтому если в устройстве осуществляются такие преобразования лишь дважды (на входе и на выходе), как, например, в оптопарах или волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), то общий КПД падает до единиц процентов. Введение каждого дополнительного акта преобразования информационных сигналов из одной формы в другую ведет к уменьшению КПД еще на порядок или более. Малое значение КПД вызывает рост энергопотребления, что недопустимо из-за ограниченных возможностей источников питания; затрудняет миниатюризацию, поскольку практически не удается отвести выделяющуюся теплоту; снижает эффективность и надежность большинства оптоэлектронных приборов.

- Наличие разнородных материалов, применяемых в оптоэлектронных приборах и системах, обуславливает: малый общий КПД устройства из-за поглощения излучения в пассивных областях структур, отражения и рассеяния на оптических границах; снижение надежности из-за различия температурных коэффициентов расширения материалов; сложность общей герметизации устройства; технологическую сложность и высокую стоимость.

9.6. Индикаторы

Индикаторы – электрически управляемые приборы для систем визуального отображения информации. Они находят широчайшее применение, начиная от электронных часов и микрокалькуляторов, табло и приборных щитов и заканчивая дисплеями в системе «человек – ЭВМ». Физическую основу приборов индикаторного типа составляют разные виды электролюминесценции (для приборов с активным светящимся растром) и электрооптические явления (для приборов с пассивным светоотражающим растром). В соответствии с классификацией изделий некогерентной оптоэлектроники ОЭП разделяются: по виду оптоэлектронного преобразования сигналов (принцип преобразования «электричество – свет» реализуется в излучающих приборах), уровню интеграции, функциональному применению и конструктивному исполнению. Каждая из выделенных групп ОЭП, по-видимому, будет в дальнейшем пополняться новыми приборами и устройствами.

К основным типам индикаторов относятся: полупроводниковые индикаторы (ППИ), вакуумные люминесцентные индикаторы (ВЛИ), газоразрядные индикаторы (ГРИ) и жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ).

Простейшими ППИ являются светодиоды. Помимо них выпускаются цифровые и буквенно-цифровые, одно- и многозарядные, шкальные и матричные ППИ. Они характеризуются высокой яркостью, большим сроком службы, низким рабочим напряжением, имеют малую инерционность и очень стойки к механическим воздействиям.

ВЛИ представляет собой вакуумный триод, содержащий прямоугольный катод, сетку и несколько анодов, покрытых люминофором и расположенных в одной плоскости. При подаче напряжения накала катод испускает электроны, которые под действием электрических полей сетки и анодов устремляются к анодам, и люминофор анодов начинает светиться.

Индикаторы этого типа обладают большой яркостью и долговечностью, незначительной потребляемой мощностью.

Газоразрядные индикаторы до появления ВЛИ и ППИ были основными приборами техники индикации. И сейчас они широко применяются из-за высокой яркости, малой потребляемой мощности и высокого быстродействия. Но значительные рабочие напряжения (сотни вольт) не позволяют подключить ГРИ непосредственно к микросхемам.

Практически все ГРИ представляют собой газоразрядные диоды, содержащие один или несколько катодов и анод. При увеличении разности потенциалов между анодом и некоторым катодом ток через такой диод резко возрастает, а газ начинает светиться.

ЖКИ имеют небольшие размеры, питаются от источника с низким напряжением, потребляют очень малую мощность (не более 100 мкВт) и обеспечивают хорошую четкость знаков при самом различном наружном освещении.

Позиционное обозначение символьных индикаторов начинается с букв HG.

9.6.1. Буквенно-цифровые индикаторы. Буквенно-цифровые индикаторы предназначены для отображения информации в виде цифр, букв и различных символов. Различают следующие виды буквенно-цифровых индикаторов:

- накаливаемые;
- газоразрядные;
- светодиодные;
- вакуумные электролюминесцентные;
- жидкокристаллические.

Накаливаемые и газоразрядные индикаторы в настоящее время практически не применяются. Светодиодные индикаторы бывают двух видов: семисегментные и матричные. Семисегментные светодиодные индикаторы предназначены для отображения информации в виде цифр и включают в свой состав восемь светодиодов, семь из которых имеют форму сегментов, а один, восьмой, – точка. Каждый из сегментов обозначают буквой латинского алфавита.

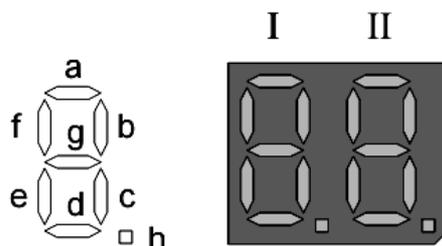


Рис. 9.24. Расположение и обозначение сегментов в семисегментном индикаторе

Схема посегментного включения индикатора с общим анодом приведена на рис. 9.25.

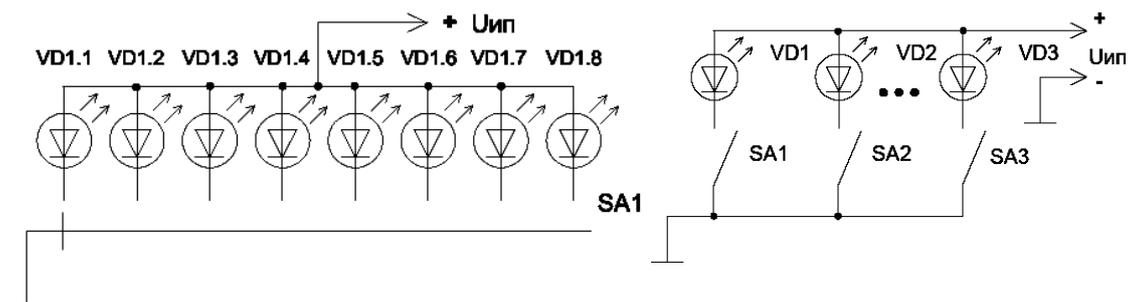


Рис. 9.25. Схема посегментного включения индикатора с общим анодом

Семисегментные индикаторы выпускаются двух видов – с объединенным анодом или с объединенным катодом.

Внешний вид светодиодных индикаторов типа АЛС приведен на рис. 9.26.

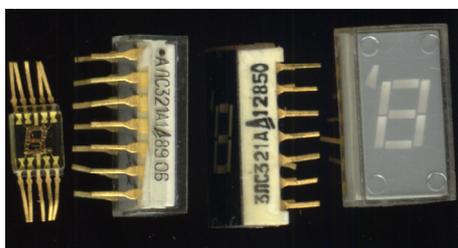


Рис. 9.26. Внешний вид светодиодных индикаторов типа АЛС

9.6.2. Матричные индикаторы. Светодиодные матричные индикаторы имеют в своем составе большое количество единичных светодиодов (рис. 9.27).

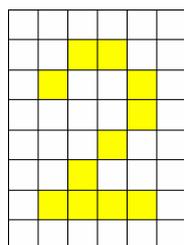


Рис. 9.27. Формирование знака в матричном индикаторе

Путем подключения тех или иных светодиодов в матрицу можно сформировать любую цифру, букву, знак или символ. Достоинства светодиодных индикаторов:

- малое питающее напряжение;
- сравнительно малый потребляемый ток;
- четкая конфигурация цифр.

Недостаток – недостаточная четкость и небольшой угол обзора.

9.6.3. Вакуумные электролюминесцентные индикаторы. Принцип действия основан на том, что аноды в виде металлизированных сегментов, покрытых люминофором, будут светиться при попадании на них электронного потока (рис. 9.28).

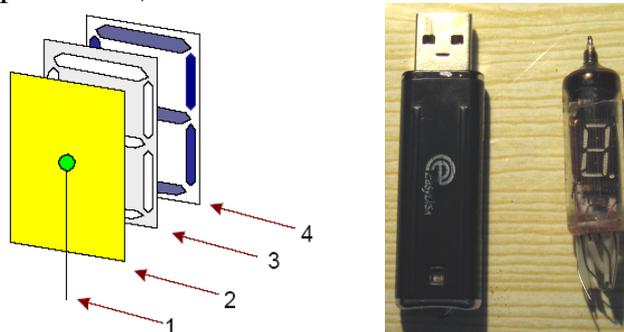


Рис. 9.28. Конструкция и размеры вакуумного люминесцентного индикатора

В состав такого индикатора (см. рис. 9.28) входят:

1. катод для создания термоэлектронной эмиссии;
2. ускоряющая сетка;
3. маска (может отсутствовать);
4. аноды.

Катод создает электронный поток, который ускоряется сеткой и через маску попадает на те аноды, к которым подведено напряжение, вызывая свечение люминофора. Маска представляет собой металлическую фольгу с прорезями по конфигурации анодов и предназначена для более четкого обозначения контуров цифр.

Достоинства: наибольшая яркость свечения из всех типов индикаторов. Недостаток: большой потребляемый ток, сравнительно высокие питающие напряжения, и как все электровакуумные приборы, боятся вибраций.

9.6.4. Жидкокристаллические индикаторы. Жидкими кристаллами называют материал в виде длинных цепочек с очень высокой подвижностью. За счет этого в обычном состоянии эти молекулы располагаются хаотично и жидкий кристалл пропускает свет не поляризуя его (рис. 9.29). Если поместить жидкий кристалл в электрическое поле, то молекулы ориентируются относительно линии напряженности поля и свет, проходя через жидкость, поляризуется (см. рис. 9.29).

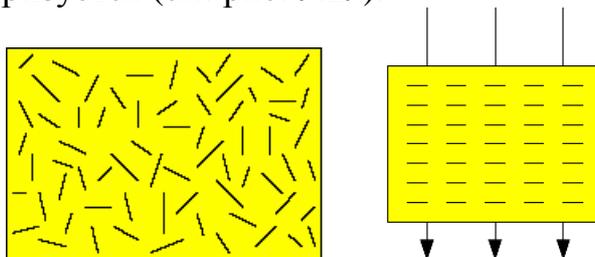


Рис. 9.29. Работа простейшего жидкокристаллического индикатора

Конструкция и внешний вид монохромного ЖК-индикатора приведены на рис. 9.30.

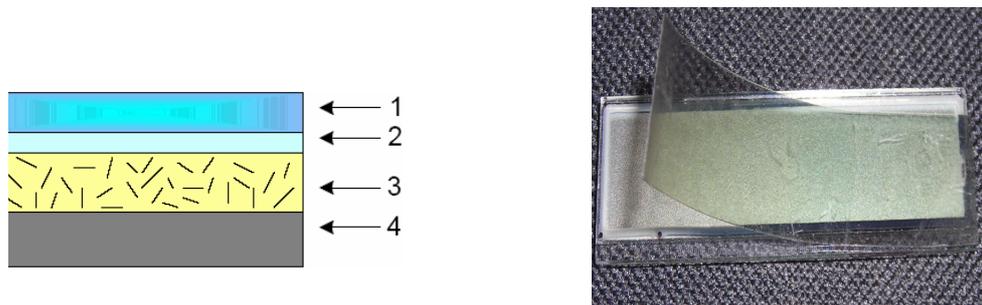


Рис. 9.30. Конструкция и внешний вид монохромного ЖК-индикатора (снята поляризационная пленка): 1 – поляризованное стекло; 2 – прозрачный электрод; 3 – жидкий кристалл; 4 – непрозрачный электрод (отражатель)

Прозрачный электрод выполняется в виде сегментов, букв или символов и в зависимости от того, между каким из прозрачных электродов и непрозрачным электродом создается электрическое поле в этом месте, свет, поляризованный верхним слоем стекла, либо пройдет через слой жидких кристаллов и отразится, либо практически полностью задержится, что будет выглядеть как темный участок.

На рис. 9.31 показано применение ЖК (LCD) экранов.



Рис. 9.31. Применение ЖК (LCD) экранов

Достоинства: малое питающее напряжение, чрезвычайно малый потребляемый ток. Недостаток: можно использовать только при внешнем освещении либо с подсветкой, высокая инерционность и температурная чувствительность.

Контрольные вопросы

1. Что такое оптоэлектроника?
2. Приведите основные элементы оптоэлектроники и оптоэлектронных систем.
3. Что означает когерентный и некогерентный источник излучения?
4. Какие особенности структуры светоизлучающего диода отличают его от выпрямительных?
5. Можно ли использовать светодиоды для выпрямления напряжений?
6. Какими характеристиками описываются источники излучения?
7. В чем принцип работы полупроводникового лазерного диода?
8. Что называют приемником оптического излучения, какие требования к нему предъявляют?
9. В чем суть внутреннего и внешнего фотоэффектов?
10. Что такое интегральная чувствительность?
11. Чем отличается фотодиодный и фотогальванический режимы?
12. Что такое режим «плавающая» база?
13. В чем принцип работы ПЗС-структур? Для каких целей используют ПЗС-приборы?
14. Что такое оптопара и оптрон? Чем они отличаются?
15. Перечислите достоинства и недостатки оптоэлектронных приборов.
16. Какие разновидности индикаторов вы знаете, приведите их сравнительные характеристики.

Список использованных литературных источников

1. Москатов, Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
2. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
3. Валенко, В. С. Электроника и микросхемотехника : учеб. пособие / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Минск : Беларусь, 2000. – 320 с. : ил.
4. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах : справочник / В. В. Бачурин [и др.] ; под ред. В. П. Дьяконова. – М. : Радио и связь, 1994. – 280 с. : ил.
5. Шелестов, И. П. Радиолюбителям : полезные схемы. Кн. 5 / И. П. Шелестов – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 240 с. : ил.
6. Гуртов, А. В. Твердотельная электроника : учеб. пособие / А. В. Гуртов. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2004. – 312 с.

РАЗДЕЛ 6. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Методические указания

В ходе работы над разделом изучить определения и классификацию усилительных устройств, их типовые структурные схемы и параметры. При рассмотрении вопросов теории обратной связи обратить внимание на то, как влияют различные виды обратной связи (ОС) на качественные характеристики усилительных устройств. Рассматривая основы схемотехники усилителей, изучить разновидности цепей питания (смещения рабочей точки) усилительных элементов и режимов их работы. Научиться проводить базовые расчеты типовых схем усилительных каскадов, графоаналитические расчеты. При изучении вопросов, касающихся усилителей постоянного тока, обратить внимание на схемотехническое совершенствование этой группы усилителей, их практическое использование на примере операционных усилителей (ОУ).

Содержание раздела

Аналоговые устройства [1, с. 135 – 145; 3, с. 245 – 248]. Общие сведения об усилителях электрических сигналов. Функциональное назначение усилителей. Основные характеристики усилителей, их параметры. Коэффициент усиления (коэффициент передачи), линейные и нелинейные искажения, динамический диапазон и шумовые характеристики. Методы анализа усилительных устройств. Особенности импульсных усилителей.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют электронным усилителем и как классифицируют усилители?
2. Приведите основные технические параметры усилителей.
3. Какие особенности характеристик у импульсных усилителей вам известны?

Усилительные каскады с RC-связями на биполярных и полевых транзисторах [1, с. 183 – 220; 3 с. 248 – 260; 3, с. 275 – 291]

Схемы включения и режимы работы. Обеспечение режима по постоянному току в усилителе на биполярных и полевых транзисторах.

Методы термостабилизации режима рабочей точки. Однокаскадные транзисторные усилители с RC-связями. Схемотехнические решения и эквивалентные схемы усилительных каскадов по переменному току. Коэффициенты усиления по напряжению, току, мощности. Входные и выходные импедансы, коэффициент нелинейных искажений. Частотные свойства однокаскадных усилителей с RC-связями.

Схемы усилителей на ПТ. Обеспечение режима по постоянному току в усилителях на транзисторах с р-п-переходом и МДП-транзисторах. Стабилизация рабочей точки. Эквивалентные схемы для переменного тока. Коэффициент усиления, входные и выходные импедансы. Частотные характеристики и нелинейные искажения.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите схемы смещения рабочей точки у биполярных и полевых транзисторов.
2. Сравните по качественным параметрам различные схемы смещения, например, по входному сопротивлению, коэффициенту усиления, температурной стабильности.
3. Как измерить коэффициенты нелинейных искажений?

Обратные связи в усилителях [1, с. 157 – 184; 3, с. 260 – 368]

Виды обратных связей и их влияние на основные параметры усилителей. Устойчивость усилителей с обратными связями. Режимы работы усилительных каскадов.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите примеры структурных схем усилителей с обратной связью известных вам разновидностей по способу получения и введения сигнала ОС.
2. Что такое устойчивость усилителя, как она характеризуется?
3. Расскажите о разновидностях усилительных каскадов и режимов работы усилительных элементов. В каких случаях их применяют?

Оконечные каскады усиления [1, с. 263 – 272]

Однотактные и двухтактные трансформаторные и бестрансформаторные усилительные каскады. Режимы работы. Коэффициент усиления и коэффициент полезного действия для режимов А и В. Нелинейные искажения, режим АВ. Схемные методы повышения коэффициента полезного действия. Усилители на комплементарных транзисторах. Предельные режимы работы и максимальная выходная мощность. Интегральные усилители мощности.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите схемы и сравните характеристики и параметры различных режимов работы оконечных каскадов. Сравните их между собой.
2. Какой из режимов работы имеет наибольший КПД?
3. Какой из режимов работы имеет наименьший коэффициент нелинейных искажений (КНИ)?

Усилители постоянного тока [1, с. 221 – 237; 3, с. 288 – 291]

Схемные решения, согласование уровней напряжений в УПТ. Температурная нестабильность. Дифференциальные усилительные каскады на биполярных и полевых транзисторах. Коэффициенты усиления и входные сопротивления для синфазного и дифференциального сигналов. Методы уменьшения дрейфа характеристик и увеличения динамического диапазона. Симметричный и несимметричный выходы дифференциальных усилителей. Нелинейные искажения.

Вопросы для самопроверки

1. Расскажите об особенностях схемотехники усилителей постоянного тока (УПТ).
2. Какими способами совершенствуют УПТ?
3. Что такое симметричный и несимметричный вход и выход дифференциального усилителя?

Операционные усилители [1, с. 238 – 245; 1, с. 273 – 328; 3, с. 292 – 328]

Основные определения и параметры. Структура ОУ. Особенности дифференциальных каскадов интегральных усилителей, динамическая нагрузка, источники стабильного тока. Схемы и методы согласования уровней, выходные каскады ОУ.

Области применения ОУ. Способы подачи питающих напряжений, компенсация напряжения смещения и разности входных токов.

Инвертирующий и неинвертирующий усилители, их коэффициенты усиления, входные и выходные сопротивления. Дифференциальное включение ОУ. Интеграторы и дифференциаторы, логарифмирующие и антилогарифмирующие схемы на ОУ.

Суммирование и вычитание сигналов на ОУ. Управляющие источники тока и напряжения.

Компараторы напряжения на ОУ. Интегральные компараторы. Применение компараторов.

Вопросы для самопроверки

1. Расскажите об основных структурных элементах ОУ.
2. Приведите параметры современных ОУ и их ориентировочное численное значение.
3. Что означает термин «динамическая нагрузка»?
4. Расскажите о применении компараторов и приведите типовую схему компаратора на ОУ.

Рекомендуемая литература

1. Электронные приборы / А. Л. Булычев [и др.]. – М. : ЛайтЛтд, 2000. – 416 с. : ил.
2. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 1991. – 622 с. : ил.
3. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352с. : ил.

Тема 10. Электронные усилители. Классификация и основные технические показатели усилителей

Термины: *усилители, классификация, динамический диапазон, входное и выходное сопротивление, полоса частот, коэффициент гармоник, ФЧХ, АЧХ, коэффициент частотных искажений, линейные и нелинейные искажения, межкаскадные связи.*

10.1. Классификация усилителей

10.2. Основные технические показатели усилителей

10.3. Характеристики усилителей

10.4. Межкаскадные связи в усилителях

10.1. Классификация усилителей

Усилителем электрических сигналов называется устройство, позволяющее при наличии на его входе сигнала с некоторым уровнем мощности получить в нагрузке усилителя тот же сигнал, но с большим уровнем мощности.

Увеличение мощности выходного сигнала усилителя обеспечивается источником питания, из которого черпается энергия для создания увеличенной мощности выходного сигнала. Энергия источника питания преобразуется в энергию полезного сигнала при помощи активных элементов (ламп, транзисторов и т.п.). Для связи активных элементов с источником входного сигнала и нагрузкой усилителя, а также для придания усилителю нужных частотных свойств применяют пассивные элементы электрических цепей: резисторы, индуктивности, емкости.

Усилитель имеет два входных и два выходных зажима и представляет собой электрический четырехполюсник.

Основной классификацией усилителей является классификация по диапазону усиливаемых частот:

1. Усилители низкой частоты (УНЧ) – диапазон усиливаемых частот от 10 Гц до 100 кГц (рис. 10.1).

2. Усилители высокой частоты (УВЧ) – диапазон усиливаемых частот от 100 кГц до 100 МГц (см. рис. 10.1).

3. Усилители постоянного тока (УПТ). Они могут усиливать постоянный ток. Диапазон усиливаемых частот от 0 Гц до 100 Гц (см. рис. 10.1).

4. Импульсные усилители (ИУ) – широкополосные импульсные и видеоусилители. Частотный диапазон усиливаемых частот от 100 Гц до 100 МГц.

5. Избирательные, или резонансные усилители – это усилители, работающие в узком диапазоне частот.

При проведении классификации будем учитывать:

- характер входного сигнала;
- назначение усилителя;
- вид используемых активных элементов.

По второму признаку усилители можно разделить на усилители непрерывных сигналов и усилители импульсных сигналов (импульсные усилители). К первой (второй) группе относятся устройства для усиления сигналов, изменяющихся настолько медленно (быстро), что с процессом их установления в усилителе можно (нельзя) не считаться.

По третьему признаку усилители можно разделить на усилители напряжения, усилители тока и усилители мощности в зависимости от основной задачи: воспроизведение сигнала на более высоком уровне напряжения, тока или мощности.

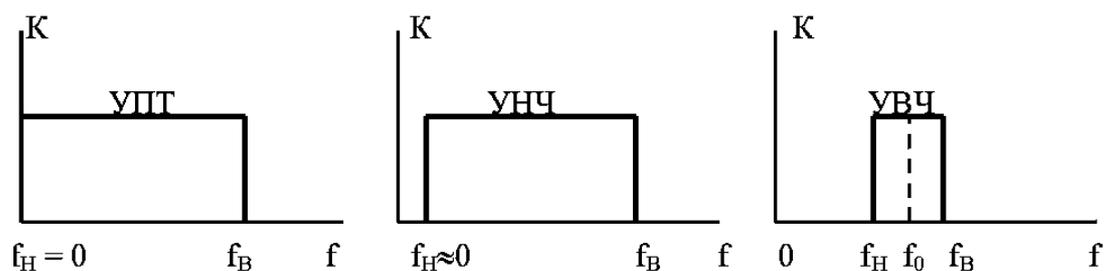


Рис. 10.1. Полосы рабочих частот усилителей УПТ (а), УНЧ (б), УВЧ (в)

Во всех случаях происходит усиление мощности сигнала, но обычно под усилителями мощности понимают выходные каскады усилителя.

Четвертый признак характеризует усилитель по виду примененных в нем активных усилительных элементов, и в соответствии с этим усилители делятся на ламповые, транзисторные, магнитные, диэлектрические и т.д.

Активные элементы усилителей. В практических схемах усилителей наиболее широко используются ламповые и транзисторные усилительные элементы. Благодаря высокому входному сопротивлению участка сетка – катод лампа управляется напряжением источника входного сигнала, практически не забирая от него тока, а, следовательно, и мощности. Поэтому ламповый активный элемент позволяет получить очень большое усиление мощности сигнала. Помимо этого применение ламп обеспечивает усиление сигналов с широким спектром и хорошую линейность таких усилителей.

Недостатки ламповых усилителей: ограниченный срок службы, низкий КПД по анодной цепи, чувствительность к вибрациям, наличие цепи накала. Во многих случаях эти недостатки не играют существенной роли, поэтому усилители на электронных лампах все еще находят применение.

Транзисторы выгодно отличают от ламп малые размеры, превосходные частотные свойства, хорошая виброустойчивость, практически неограниченный срок службы.

Недостатки транзисторных усилителей: сравнительно малое входное сопротивление, температурная нестабильность параметров. Однако эти недостатки успешно преодолеваются промышленностью, поэтому транзисторы во все возрастающем количестве замещают лампы.

10.2. Основные технические показатели усилителей

1. Коэффициент усиления.

$$K_n = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Если коэффициент усиления недостаточен, применяются многокаскадные усилители (рис. 10.2).

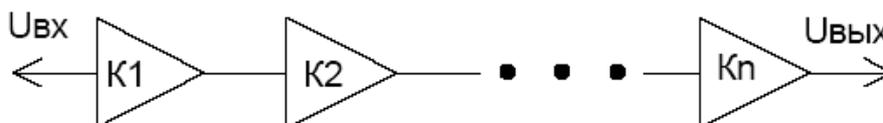


Рис. 10.2. Структура многокаскадного усилителя

В многокаскадных усилителях общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления каждого каскада.

Коэффициент усиления измеряется в логарифмических единицах – децибелах:

$$K(\text{дБ}) = 20 \lg K.$$

Децибелы применяют не только для сравнения двух величин. Они удобны и для оценок конкретных значений мощностей. При этом за условный нулевой уровень электрического сигнала принята мощность $P = 1$ мВт, выделяемая на активном сопротивлении $R = 600$ Ом, в сфере кабельного телевидения и радиовещательных сетях используется абсолютная единица, называемая децибел-милливольт (дБмВ), когда 0 дБмВ соответствует напряжению 1 мВ, действующее на сопротивлении $R = 75$ Ом.

Широкое применение децибелов, особенно в акустике, объясняется свойством органов слуха (а также зрения) реагировать на раздражение в логарифмической зависимости. Например, если усилитель низких частот (УНЧ) развивает на выходе 10 Вт, то для того чтобы ухо ощутило вдвое большую громкость, понадобится почти десятикратное увеличение выходной мощности усилителя. 1 дБ улавливается ухом как едва заметное изменение громкости. Динамический диапазон человеческой речи составляет приблизительно 25 дБ, т.е. мощность громкого крика в 300 раз больше самого тихого шепота: $K(\text{дБ}) = 10 \lg 300 = 24,771$ дБ.

2. *Входное и выходное сопротивление.* Эквивалентная схема усилителя представлена на рис. 10.3.

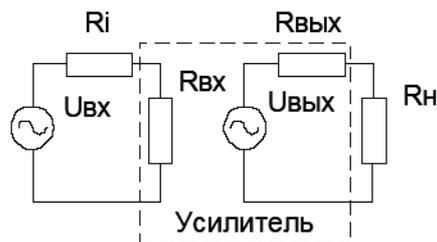


Рис. 10.3. Эквивалентная схема усилителя (в том числе многокаскадного)

Задача передачи максимальной энергии от источника сигнала на вход усилителя, а также с выхода усилителя на нагрузку называется согласованием. Для оптимального согласования входное сопротивление усилителя должно быть как можно больше, т.е. значительно больше внутреннего сопротивления источника сигнала, а выходное сопротивление – значительно меньше сопротивления нагрузки. Вопросы согласования возникают и в многокаскадных усилителях. Если два усилительных каскада не согласованы между собой по входному и выходному сопротивлению, то между ними ставится эмиттерный повторитель, имеющий очень большое входное и малое выходное сопротивление.

3. *Выходная мощность и кпд усилителя.* Выходная мощность может быть определена по формуле:

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_{\text{н}}}$$

Значительно увеличить выходную мощность усилителя нельзя, т.к. при большом выходном напряжении появляются искажения усиливаемого сигнала за счет нелинейности характеристик усилительных элементов. Поэтому вводится понятие номинальной выходной мощности. Это наибольшая выходная мощность при заданном коэффициенте искажений; кпд усилителя можно определить по следующей формуле:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых.}}}{P_{\text{ист.}}} \cdot 100\% ,$$

где $P_{\text{ист.}}$ – мощность, потребляемая от источника питания.

4. *Уровень собственных шумов* состоит из следующих составляющих:

- Тепловые шумы при нагревании сопротивлений, емкостей.
- Шумы усилительных элементов.
- Шум за счет пульсаций источника питания.

5. *Диапазон усиливаемых частот* (полоса пропускания усилителя). Это полоса частот, в которой выходное напряжение (коэффициент усиления) уменьшается не более чем до 0,7 своей максимальной (заданной) величины (3 Дб).

6. *Искажения усилителя* возникают за счет нелинейности характеристик транзисторов. Искажения происходят за счет появления в спектре сигнала высших гармонических составляющих и характеризуются коэффициентом нелинейных искажений (или коэффициентом гармоник).

$$K_2 = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% .$$

Именно на основании численной величины K_2 производится классификация усилителей по качественному критерию. Так, у профессиональных усилителей этот параметр не превышает сотых долей процента, а у низкосортных бытовых – десятки процентов. К сожалению, коэффициент гармоник не является постоянной численной величиной, его приводят в паспортных данных лишь для номинальной мощности, и он имеет тенденцию к увеличению с ростом уровня выходной мощности.

10.3. Характеристики усилителей

1. *Амплитудная характеристика* – это зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного сигнала (рис. 10.4): $U_{вых.} = f(U_{вх.})$.

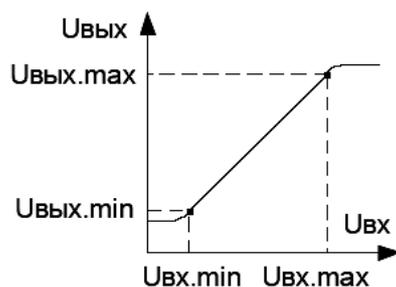


Рис. 10.4. Амплитудная характеристика

2. *Динамический диапазон*:

$$D = 20 \cdot \lg \frac{U_{ex.max}}{U_{ex.min}} \text{ (дБ)} .$$

3. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) представляет собой зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты при постоянной амплитуде входного сигнала.

$$U_{\text{вых.}} = f(F) \text{ при } U_{\text{вх.}} = \text{const.}$$

Часто АЧХ представляют в виде зависимости $K_n = f(F)$ при $U_{\text{вх.}} = \text{const}$ (рис. 10.5).

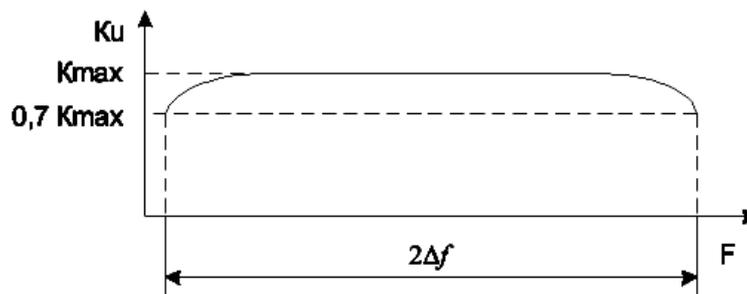


Рис. 10.5. Амплитудно-частотная характеристика

4. Зависимость коэффициента усиления от частоты характеризуется коэффициентом частотных искажений. Коэффициент частотных искажений для низких частот (рис. 10.6) определяется соотношением:

$$M_{\text{нч}} = \frac{K_{\text{у.ср.}}}{K_{\text{у.н.}}}$$

Коэффициент частотных искажений для высоких частот (см. рис. 10.6) определяется соотношением:

$$M_{\text{вч}} = \frac{K_{\text{у.ср.}}}{K_{\text{у.в.}}}$$

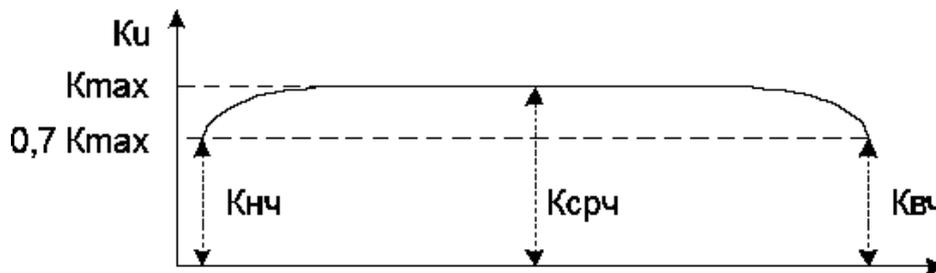


Рис. 10.6. Определение коэффициента частотных искажений по АЧХ

5. В радиотехнике часто применяют *нормированные АЧХ* (рис. 10.7). Нормированная АЧХ представляет собой следующую зависимость:

$$\frac{K_U}{K_{U.\max}} = f(F) \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const}.$$



Рис. 10.7. Нормированная АЧХ

6. *Фазовая характеристика* – это зависимость разности фаз между входными и выходными сигналами от частоты, $\varphi = f(F)$ (рис. 10.8).

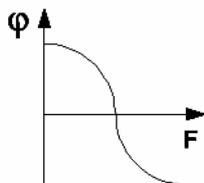


Рис. 10.8. Фазочастотная характеристика (ФЧХ)

Линейные искажения

Линейные искажения возникают в двух случаях:

1) когда отдельные гармонические составляющие входного сигнала усиливаются неодинаково;

2) когда фазовые сдвиги, которые приобретают гармонические составляющие сигнала, пройдя через усилитель, изменяют их взаимный сдвиг во времени.

Чтобы усилитель в полосе рабочих частот не вносил линейных искажений, его АЧХ должна быть прямоугольной, а ФЧХ – линейной (рис. 10.9, а, б).

При наличии линейных искажений форма сигнала на выходе усилителя может отличаться от его формы на входе, но при этом новых частот в спектре выходного сигнала не возникает.

На рис. 10.9 цифрой 1 отмечены характеристики усилителя, не вносящего линейных искажений при усилении сигнала, а цифрой 2 – характеристики усилителя, вносящего искажения вследствие действия этих обоих факторов.

Чаще всего фазовые искажения не нормируются и линейные искажения оценивают коэффициентами M_B и M_H . Обычно $M_B = 0,10 \dots 1$ и $M_H = 0,9 \dots 1,1$.

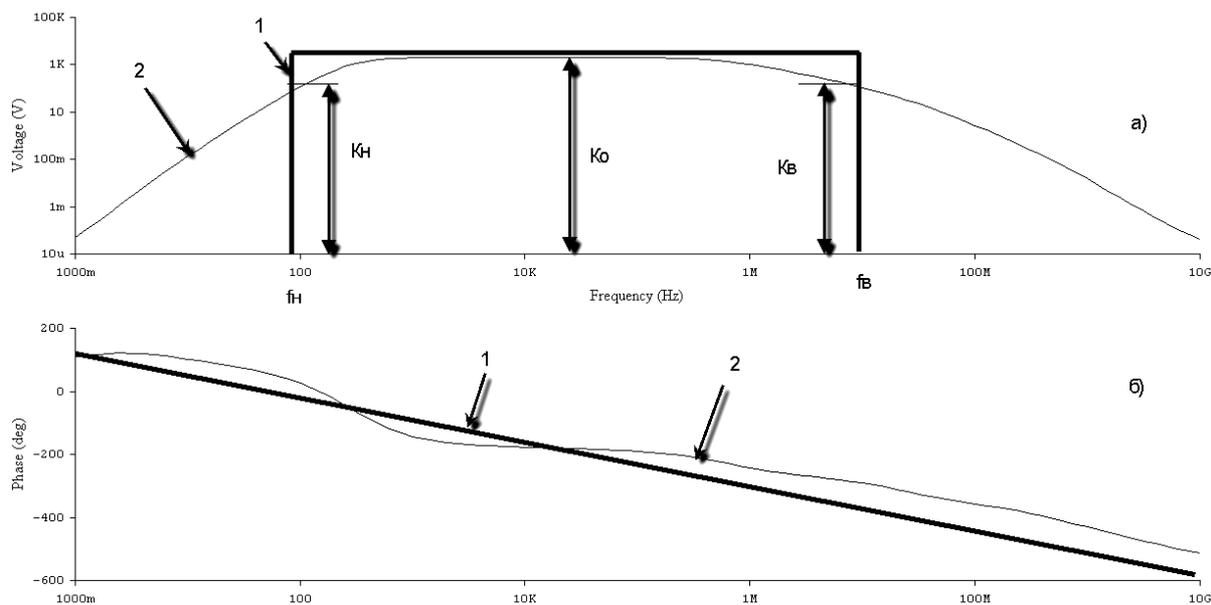


Рис. 10.9. Идеальные (1) и реальные (2) АЧХ (а) и ФЧХ (б) усилителя

Однако при использовании усилителей для обработки телевизионных сигналов во избежание неправильной передачи яркости и цвета изображения нужно учитывать линейные искажения, возникающие из-за влияния нелинейности ФЧХ усилителей.

Нелинейные искажения

Причиной нелинейных искажений является прохождение сигнала через элементы, имеющие нелинейную вольт-амперную характеристику, например, лампу, транзистор, трансформатор, в результате чего искажается форма колебаний и изменяется их спектральный состав. Расчет величины нелинейных искажений сводится к определению амплитуды основной I_1 и высших гармонических составляющих I_2 , I_3 и оценивается коэффициентом гармоник.

Нормы на допустимые величины нелинейных искажений определяются назначением усилителя и имеют порядок 0,5 – 3,0 %. Для многокаскадного усилителя

$$K_2 \leq K_{21} + K_{22} + \dots$$

10.4. Межкаскадные связи в усилителях

10.4.1. Виды межкаскадных связей. Для увеличения коэффициента усиления могут применяться многокаскадные усилители. В этом случае между каскадами, а также между входом усилителя и источником сигнала или же между выходом усилителя и нагрузкой могут существовать следующие виды межкаскадных связей:

1. Резисторно-емкостная связь (рис. 10.10).

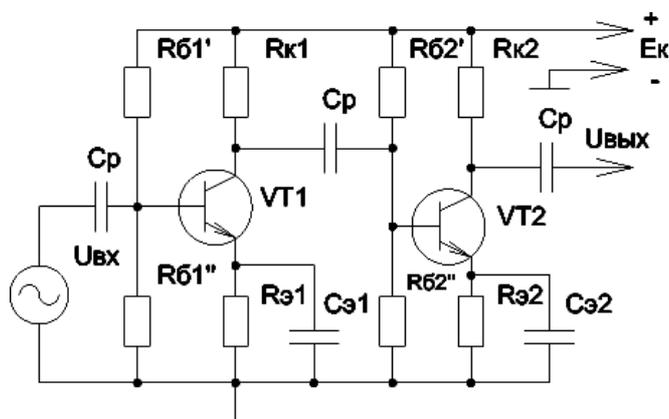


Рис. 10.10. Схема двухкаскадного усилителя с резисторно-емкостной межкаскадной связью

Резисторно-емкостная связь является наиболее широко распространенной в усилителях переменного напряжения.

2. Трансформаторная связь (рис. 10.11).

Трансформаторная связь позволяет осуществить оптимальное согласование между каскадами путем подбора коэффициента трансформации трансформатора.

Недостатки:

- Сравнительно большие габариты и вес трансформаторов.
- Большие частотные искажения, так как сопротивления обмоток трансформатора зависят от частоты ($X_L = \omega L$), поэтому трансформаторная связь применяется на низких частотах и в узком диапазоне.

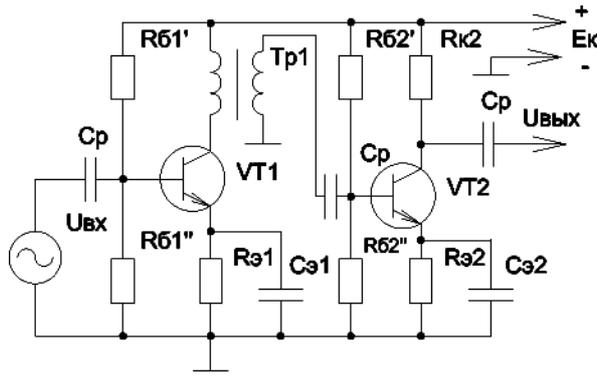


Рис. 10.11. Схема двухкаскадного усилителя с трансформаторной межкаскадной связью

3. Гальваническая (непосредственная) связь (рис. 10.12).

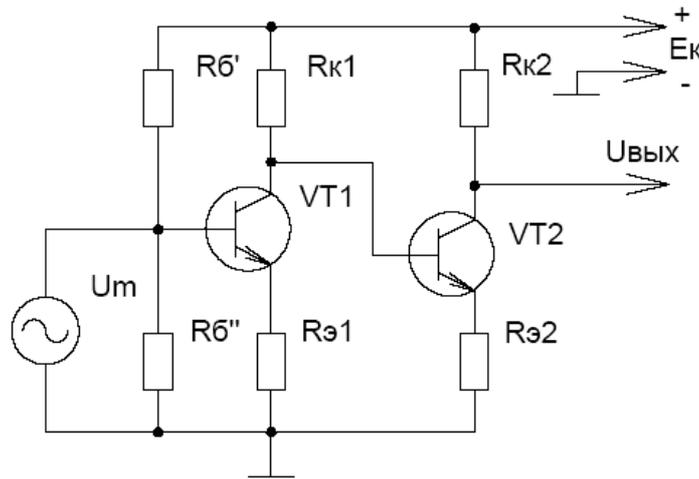


Рис. 10.12. Схема двухкаскадного усилителя с гальванической межкаскадной связью

Гальваническая связь применяется в усилителях постоянного тока.

10.4.2. Эквивалентная схема усилительного каскада с резисторно-емкостными связями

$R_{\bar{\sigma}}$ – это $R_{\bar{\sigma}}'$ и $R_{\bar{\sigma}}''$, включенные параллельно, т.к. $R_{\bar{\sigma}}'$ можно считать подключенным на корпус через малое сопротивление E_k (общий провод).

$$R_{\bar{\sigma}} = \frac{R_{\bar{\sigma}}' \cdot R_{\bar{\sigma}}''}{R_{\bar{\sigma}}' + R_{\bar{\sigma}}''};$$

$$C_0 = C_{вх.сл.} + C_M,$$

где $C_{вх.сл.}$ – это емкость следующего каскада, а C_M – емкость монтажа.

На рис. 10.13 приведена принципиальная схема усилительного каскада и его схема замещения. Здесь r_b , $r_э$, r_k – объемное сопротивление областей базы, эмиттера и коллектора транзистора (подробнее в материалах для практических работ).

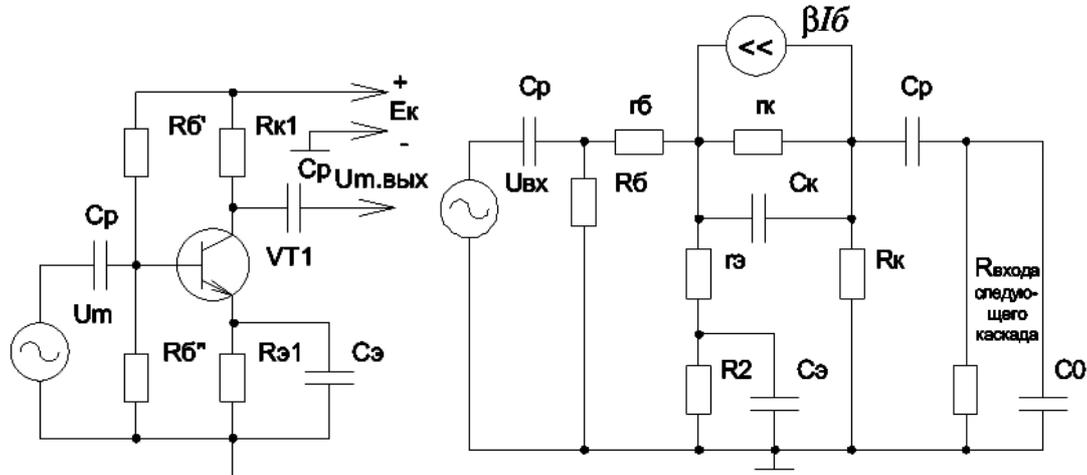


Рис. 10.13. Принципиальная схема усилительного каскада (слева) и его схема замещения (справа)

10.4.3. Анализ эквивалентной схемы на низких, средних и высоких частотах

Проанализируем эквивалентную схему на низких, средних и высоких частотах. На низких частотах емкостное сопротивление параллельно включенных C_k и C_o будет иметь очень большую величину и на работу схемы влиять не будет. $C_э$ имеет большую величину, следовательно, емкостное сопротивление ее будет очень мало. Уже на низких частотах эта емкость шунтирует сопротивление $R_э$ и, значит, на низкой частоте схема усилительного каскада (см. рис. 10.13) будет иметь вид, изображенный на рис. 10.14.

Разделительные конденсаторы включены последовательно. На низких частотах (НЧ) сопротивление их будет велико, что приводит к уменьшению коэффициента усиления.

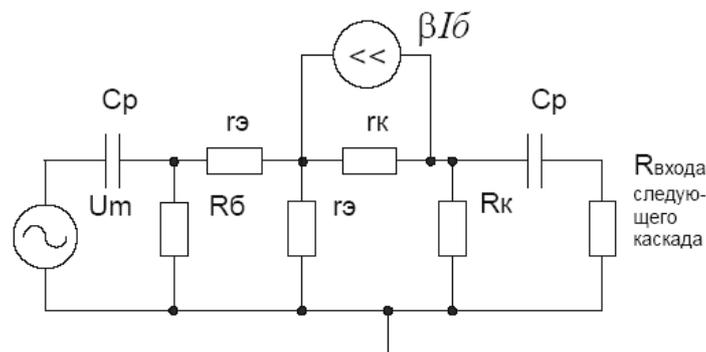


Рис. 10.14. Эквивалентная схема каскада для низких частот

На средних частотах сопротивление разделительных конденсаторов C_p уменьшается до такой величины, что их влияние можно не учитывать. А сопротивления емкостей C_k и C_o уменьшаются не настолько, чтобы оказывать шунтирующее действие, и поэтому на средних частотах их также можно не учитывать, поэтому эквивалентная схема каскада (см. рис. 10.13) будет иметь вид, приведенный на рис. 10.15. Так как на средних частотах ни барьерная емкость коллекторного перехода C_k , ни C_o не оказывают влияния на работу усилителя, то коэффициент усиления будет наибольшим.

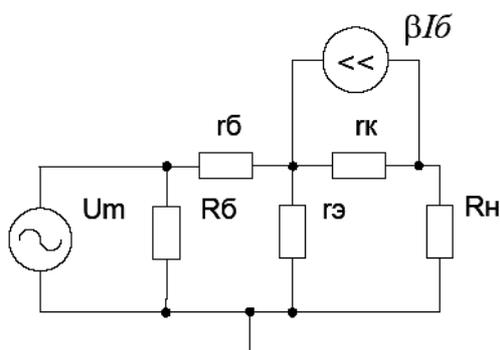


Рис. 10.15. Эквивалентная схема каскада для средних частот

На высоких частотах (ВЧ) разделительные конденсаторы имеют очень малое сопротивление и, так как они включены последовательно, то не оказывают влияния на работу схемы усилителя, а емкости C_k и C_o , включенные параллельно, шунтируют коллекторный переход транзистора и выход усилителя своим малым сопротивлением, что приводит к уменьшению коэффициента усиления. Эквивалентная схема каскада (см. рис. 10.13) на высокой частоте изображена на рис. 10.16.

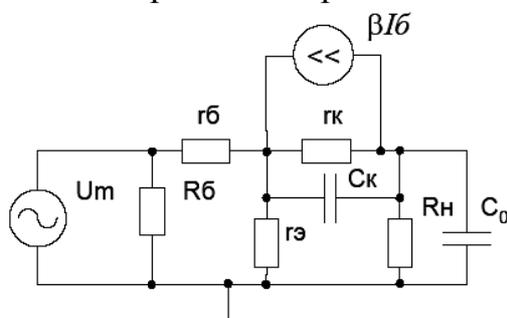


Рис. 10.16. Эквивалентная схема каскада для высоких частот

На рис. 10.17 показано, как влияет на коэффициент усиления усилителя изменение частоты.

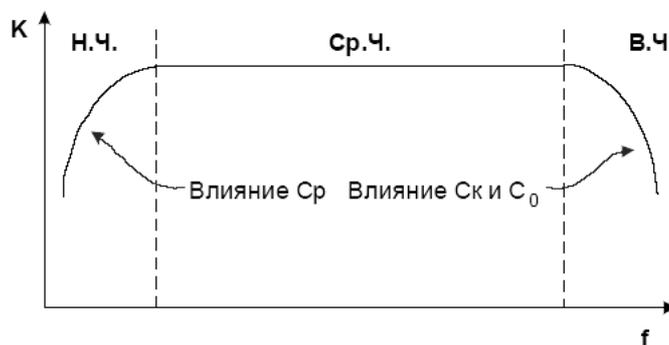


Рис. 10.17. Влияние элементов эквивалентной схемы на АЧХ каскада

Контрольные вопросы

1. За счет чего происходит усиления электрических сигналов в усилителях?
2. Дайте определение усилителя и расскажите о принципах классификации.
3. В чем отличие усилителей мощности, тока и напряжения?
4. Рассчитайте амплитуду выходного напряжения трехкаскадного усилителя, если на вход подается напряжение 1 мВ, а каждый каскад имеет коэффициент усиления 10 дБ.
5. Что такое «режим согласованной нагрузки»? Как должны соотноситься входные и выходные сопротивления усилителя с внутренними сопротивлениями источника и нагрузки?
6. Что такое номинальная выходная мощность усилителя? Какие еще виды мощности вам известны?
7. Что такое коэффициент гармоник, от чего он зависит?
8. Какие параметры усилителя можно определить по АЧХ?
9. Каким должен быть коэффициент частотных искажений у идеального усилителя?
10. Какие виды искажений в усилителях вам известны, чем они обусловлены?
11. Какие виды межкаскадных связей вам известны, сравните их между собой.
12. В чем отличие эквивалентных схем усилительного каскада на разных частотах для схемы с общим эмиттером?

Тема 11. Обратная связь в усилителях

Термины: *обратная связь (ОС), паразитная ОС, местная и общая ОС, ООС и ПОС, частотозависимая ОС, коэффициент передачи для цепи ОС и усилителя с петлей ОС, глубина ОС, устойчивость усилителя, самовозбуждение, регуляторы тембра.*

11.1. Виды обратной связи

11.2. Влияние ООС на основные показатели усилителя

11.3. Устойчивость работы многокаскадных усилителей

11.4. Регулировки в усилителях

11.1. Виды обратной связи

Обратной связью в усилителе (в целом) или же в отдельно взятом каскаде называется такая связь между входом и выходом, при которой часть энергии усиленного сигнала с выхода передается на вход.

В усилителе принципиально всегда существует *внутренняя паразитная обратная связь*, обусловленная физическими процессами, протекающими в усилительном элементе вследствие его неидеальности (наличие межэлектродных емкостей и т.д.). Внешние реактивные элементы – емкости и индуктивности – также способствуют возникновению паразитной ОС в усилителях. Внешняя и внутренняя паразитные ОС приводят к ухудшению различных параметров и нарушению работы усилителя. Однако часто с помощью специально введенной обратной связи удастся существенно улучшить параметры и характеристики усилителя. Простейший принцип введения «полезной» обратной связи был рассмотрен при анализе усилительного каскада по схеме ОЭ с термостабилизацией.

Таким образом, по способу своего возникновения обратная связь может быть внутренней, паразитной и искусственной.

Внутренняя ОС возникает за счет внутренних свойств элементов схемы. Паразитная ОС возникает за счет паразитных емкостей и индуктивностей. Внутреннюю паразитную обратную связь стараются возможно сильнее уменьшить.

Искусственная ОС вводится специально для улучшения основных характеристик усилителя. По признаку петлевого усиления различают положительную ОС (ПОС) и отрицательную (ООС). При ПОС сигнал на вход усилителя через цепь ОС поступает в фазе со входным сигналом. При ООС сигнал, проходя цепь ОС, будет подаваться в противофазе с входным сиг-

налом. В усилителях, в основном, применяется ООС; ПОС применяется в генераторах.

В структурную схему устройства с обратной связью (рис. 11.1) входит собственно усилитель с частотным коэффициентом передачи K и цепь (петля, кольцо) ОС с коэффициентом передачи β . В общем случае параметры K и β , а также напряжения $U_{вх}$ и $U_{вых}$ и напряжение обратной связи $U_{ос}$ – величины комплексные, что позволяет учесть возможный фазовый сдвиг, возникший в усилителе и цепи ОС из-за наличия реактивных элементов.

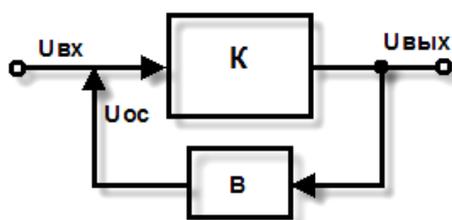


Рис. 11.1. Структурная схема усилителя с цепью ОС

Как правило, усилители с ОС функционируют в *рабочей полосе частот*, где влияние паразитных ОС несущественно и ими можно пренебречь. В этом случае вместо частотного коэффициента передачи $K(\omega)$ используют коэффициент усиления по напряжению. Этот параметр, как и коэффициент передачи петли ОС $\beta(\omega)$, характеризуется уже *вещественными значениями* K и β (в теории усилителей с ОС коэффициент усиления усилителя традиционно обозначают буквой K , а не K_u). Токи и напряжения в рабочей полосе частот усилителя будут также являться вещественными величинами.

В схемах усилителей применяются или могут самопроизвольно возникать различные виды ОС.

На рис. рис. 11.2 приведены структурные схемы усилителей с наиболее распространенными (классическими) видами ОС.

В зависимости от метода получения сигнала ОС различают *обратную связь по напряжению*, когда сигнал ОС пропорционален выходному напряжению, и *обратную связь по току*, если сигнал ОС пропорционален выходному току (сигнал ОС снимается с резистора R_c). Возможна и *комбинированная обратная связь*, когда сигнал ОС пропорционален и напряжению, и току выходной цепи.

По способу введения сигнала ОС во входную цепь усилителя различают *последовательную обратную связь* при включении цепи ОС последовательно с источником усиливаемого сигнала и *параллельную обратную связь*, если цепь ОС включена параллельно усилителю. Используется также и *комбинированная обратная связь*, обусловленная как последовательной, так и параллельной ОС.

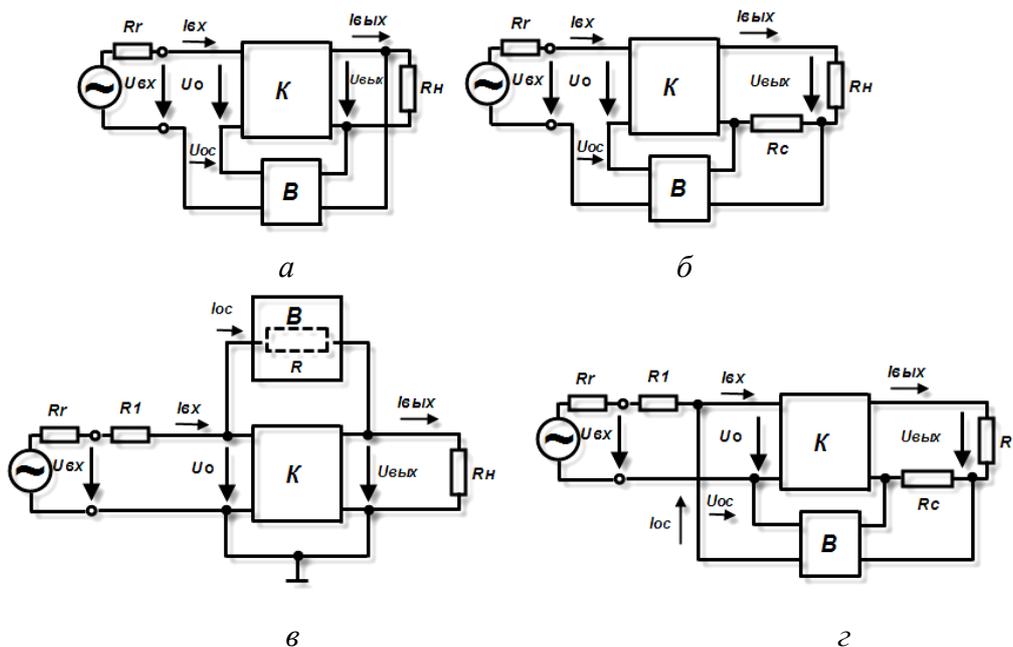


Рис. 11.2. Виды обратных связей в усилителях:

а – последовательная по напряжению; *б* – последовательная по току;
в – параллельная по напряжению; *г* – параллельная по току

β – коэффициент передачи цепи ОС.

$$\beta = \frac{U_{\text{вых.ос}}}{U_{\text{вх.ос}}} \quad (11.1)$$

Поскольку в усилителях цепь ОС состоит, в основном, из пассивных элементов, то β обычно меньше 1. В зависимости от того, будет ли изменяться β от частоты, различают частотозависимую и частотонезависимую ОС.

11.2. Влияние ООС на основные показатели усилителя

Рассмотрим влияние ООС на работу усилителя на примере последовательной ОС по напряжению. Структурная схема усилителя, охваченного петлей ОС, приведена на рис. 11.3.

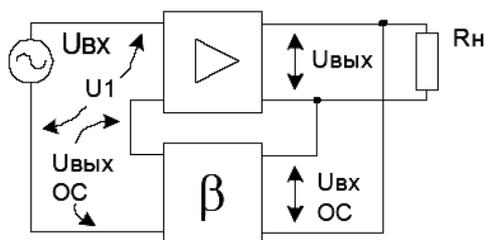


Рис. 11.3. Структурная схема усилителя, охваченного петлей ОС

$K = \frac{U_{\text{вых.}}}{U_{\text{вх.}}}$ – коэффициент усиления усилителя без обратной связи.

$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{вых.}}}{U_1}$ – коэффициент усиления усилителя с ОС.

$$\beta = \frac{U_{\text{вых.ос}}}{U_{\text{вх.ос}}} = \frac{U_{\text{вых.ос}}}{U_{\text{вых.}}}; \quad (11.2)$$

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{вых.}}}{U_1} = \frac{U_{\text{вых.}}}{U_{\text{вых.ос}} + U_{\text{вх.}}}. \quad (11.3)$$

Из формулы (11.2) видно, что $U_{\text{вых.ос}}$ будет равняться β , умноженному на $U_{\text{вых.}}$. Тогда формула (11.3) примет вид:

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{вых.}}}{U_{\text{вх.}} + \beta \cdot U_{\text{вых.}}}. \quad (11.4)$$

В знаменателе последней формулы вынесем $U_{\text{вх.}}$ за скобку:

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{вых.}}}{U_{\text{вх.}} \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{U_{\text{вых.}}}{U_{\text{вх.}}} \right)}; \quad (11.5)$$

так как $\frac{U_{\text{вых.}}}{U_{\text{вх.}}} = K$, запишем:

$$K_{\text{ос}} = \frac{K}{1 + \beta \cdot K}. \quad (11.6)$$

Величина $(1 + \beta K)$ называется *глубиной обратной связи*.

Вывод: последняя формула показывает, что ООС уменьшает коэффициент усиления усилителя.

Для положительной ОС:

$$K_{noc} = \frac{K}{1 - \beta \cdot K}. \quad (11.7)$$

Кроме того, что введение ООС уменьшает коэффициент усиления усилителя, все остальные технические показатели улучшаются. Увеличивается полоса пропускания, уменьшаются нелинейные и частотные искажения, несколько возрастает входное сопротивление.

Зависимость коэффициента усиления от фактора обратной связи $K\beta$ приведена на рис. 11.4.

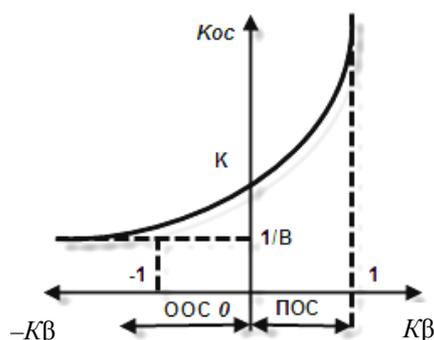


Рис. 11.4. Зависимость коэффициента усиления от фактора обратной связи

11.3. Устойчивость работы многокаскадных усилителей

Многокаскадный усилитель содержит большое число различных деталей, объединенных электрической схемой и конструктивным выполнением в некоторое единое устройство. Для компактности устройства его размеры и объем стремятся сделать возможно меньшими. Небольшие расстояния между деталями вызывают появление между ними заметных емкостных и индуктивных связей. В результате часть энергии усиленных колебаний с выходных элементов схемы передается на детали, находящиеся на электрической схеме в предыдущих каскадах усилителя. При неудачной компоновке отдельных узлов и деталей свойства усилителя могут настолько измениться, что правильно рассчитанный усилитель не будет отвечать поставленным техническим требованиям и даже может самовозбуждаться.

Задачей конструктора является выбор такого решения, при котором все возможные паразитные связи сведены до приемлемого минимума. Строгая количественная оценка паразитных связей затруднена их большим числом, взаимным переплетением, а иногда и невозможностью их точной локализации. Опытным путем выработан ряд мер, правил и рекомендаций, соблюдение которых позволяет надежно бороться с паразитными связями. Однако при самом разумном конструктивном выполнении усилителя со-

храняется еще один вид паразитной обратной связи, часто играющей основную роль в изменении свойств усилителя. Этим видом связи является обратная связь, возникающая в усилителе при питании его каскадов от одного общего источника питания. Для ее ослабления широко используют развязывающие фильтры, но это приводит к дополнительному расходу энергии в усилителе и увеличению его габаритов.

В целом, в схему усилителей вводят комбинацию локальных (местных для каскадов) и общих (для всего усилителя) цепей обратной связи с учетом расчетных и экспериментальных данных.

11.4. Регулировки в усилителях

Усилители электрических сигналов во многих случаях работают в широком динамическом диапазоне входных и выходных сигналов, поэтому они снабжаются регуляторами усиления, позволяющими получить нужную амплитуду выходного сигнала независимо от амплитуды входного сигнала.

Для изменения соотношения амплитуд частотных составляющих на выходе усилителя независимо от соотношения этих амплитуд на его входе усилители снабжаются регуляторами тембра. Регуляторы усиления и тембра могут производить соответствующие изменения плавно или скачками. Ступенчатая регулировка применяется сравнительно редко. Отношение коэффициентов усиления при крайних положениях регуляторов называют глубиной регулировки и выражают в децибелах.

Регуляторы усиления желательно ставить либо во входной цепи, либо в первых предварительных каскадах усилителя, предохраняя его от перегрузок. На рис. 11.5 приведена схема потенциометрического регулятора (резистор R1). Его достоинствами являются постоянство режима транзистора, на который подается регулируемый сигнал, и сравнительно высокая глубина регулировки (30...40 дБ). Недостатком регулятора является наличие большой разделительной емкости, так как в противном случае на низких частотах при сильном ослаблении входного сигнала получаются большие частотные искажения. На высших частотах частотные искажения максимальны также при сильном ослаблении входного сигнала. Это происходит из-за влияния входной емкости транзистора.

Регулирование частотных характеристик усилителей производят цепочкой, сопротивление которой изменяется в зависимости от частоты сигнала. В транзисторных усилителях из-за низкого входного сопротивле-

ния очень трудно регулировать тембр, поэтому регуляторы следует ставить между входом обычного каскада и входом эмиттерного повторителя.

На рис. 11.5 цепь, состоящая из C4, R5, C5, служит для регулировки высоких частот, а цепь R7, C6, C7 – для регулировки низких частот. Если не нужно регулировать частотную характеристику в широких пределах, то можно применять и более простые схемы регуляторов тембра.

На рис 11.6. приведена схема для исследования влияния видов ОС.

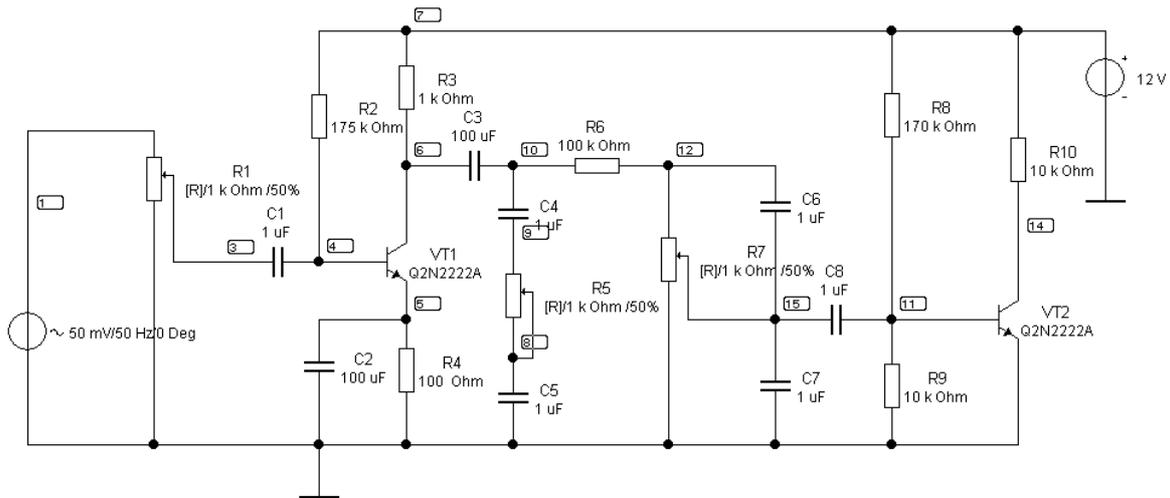


Рис. 11.5. Регулировка усиления и тембра в усилителе низкой частоты

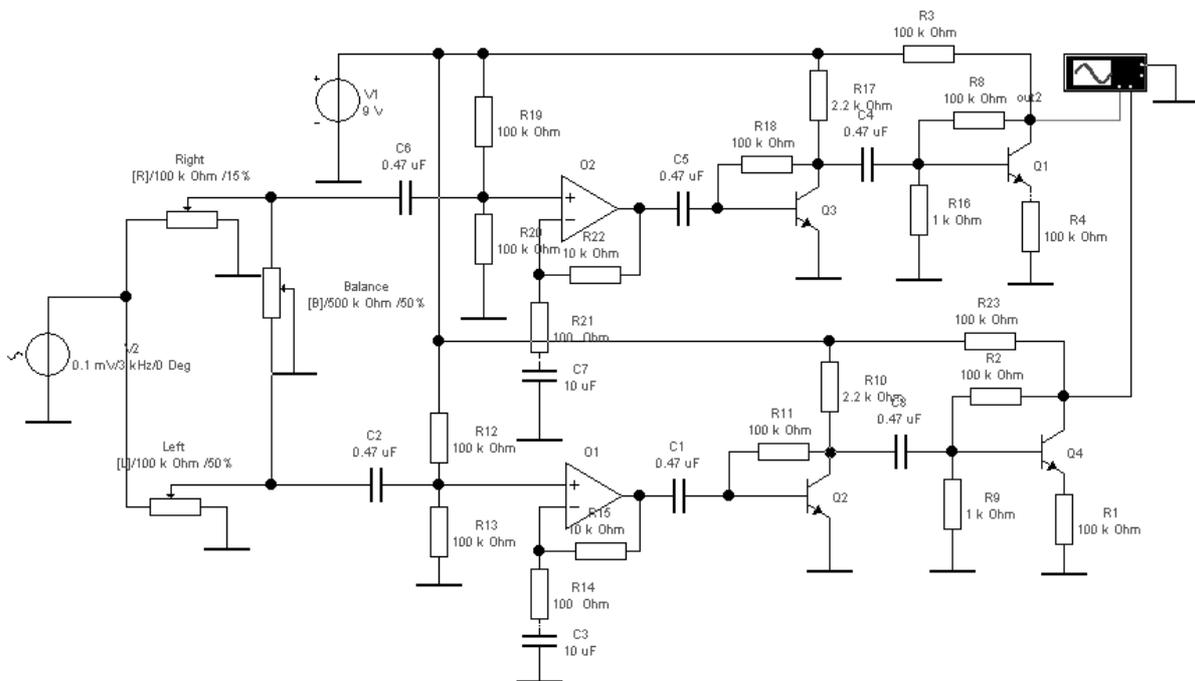


Рис 11.6. Схема для исследования влияния видов ОС

Контрольные вопросы

1. Что называют обратной связью и какие ее виды вам известны?
2. Какие параметры принято обозначать K и β ?
3. Приведите примеры различных структур ОС по способу получения и введения.
4. Приведите структуру комбинированной обратной связи по току.
5. Приведите выражение для расчета параметра β .
6. Что означает термин «глубина обратной связи»?
7. Приведите выражение для расчета коэффициента усиления для случаев ООС и ПОС.
8. Как влияют ПОС и ООС на характеристики усилителей?
9. Какие конструкционные и схемотехнические методы рекомендуется применять при разработке усилителей?
10. В схеме на рис. 11.5 проведите путем моделирования (Parameter sweep) исследования частотных характеристик передачи (AC frequency) при изменении сопротивлений R_5 и R_7 для выходной точки 14.
11. В схеме на рис. 11.6 проведите путем моделирования (Parameter sweep) исследования характеристик усиления и полосы пропускания (AC frequency) при изменении сопротивлений R_{21} и R_{22} для выходной точки 9. Сделайте вывод о видах ОС.

Тема 12. Усилители постоянного тока с непосредственными связями.

Дифференциальные и операционные усилители

Термины: *УПТ, непосредственная связь, дрейф нуля, дифференциальный каскад, синфазные сигналы, симметричный и несимметричный выход, операционные усилители, частотная коррекция, баланс нуля, инвертирующий и неинвертирующий входы, параметры, усилительные и интерфейсные, точностные параметры, динамические параметры, суммирующее, интегрирующее и дифференцирующее включение ОУ, активный фильтр, ФНЧ, ФВЧ.*

- 12.1. Усилители постоянного тока с непосредственными связями
- 12.2. Дифференциальный каскад УПТ
- 12.3. Операционные усилители. Классификация и основные параметры операционных усилителей (ОУ)
- 12.4. Схемы включения и использования ОУ

12.1. Усилители постоянного тока (УПТ) с непосредственными связями

УПТ с непосредственными связями называют усилителем прямого усиления (рис. 12.1, *a*).

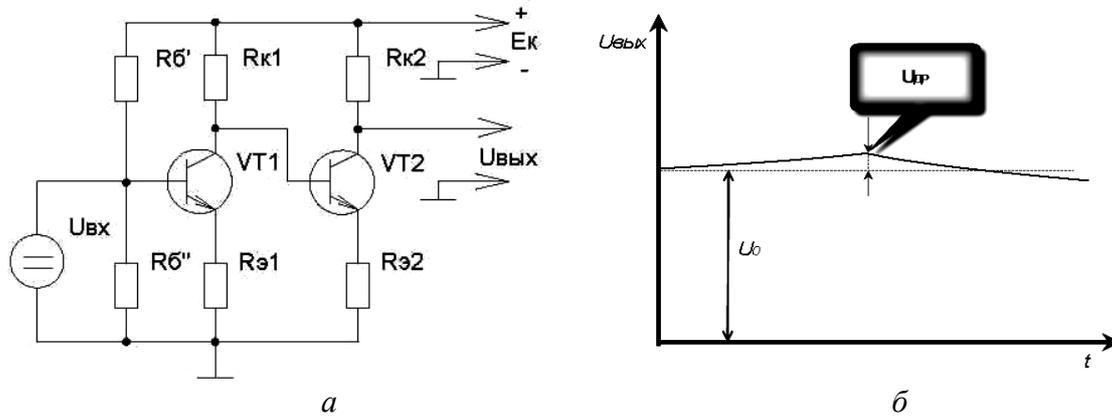


Рис. 12.1. Схема классического усилителя постоянного тока (*a*);
пояснение к дрейфу нуля (*б*)

Одной из особенностей УПТ с непосредственными связями является то, что на вход последующего каскада поступает не только усиливаемый сигнал, но и постоянная составляющая коллекторного напряжения предыдущего каскада. Поэтому напряжение между базой и эмиттером последующего каскада будет больше, чем напряжение, соответствующее выбранному положению рабочей точки. Чтобы избежать этого, сопротивление в цепи эмиттера каждого последующего каскада выбирается большим, чем в предыдущем каскаде, с тем, чтобы обеспечить соответствие выбранному положению рабочей точки. Вторая особенность – дрейф нуля.

Дрейфом нуля называется медленное изменение выходного напряжения, не зависящее от напряжения на входе, а происходящее за счет внутренних процессов в схеме усилителя. Дрейф нуля часто оценивается величиной дрейфа, приведенного ко входу.

$$U_{др.вх.} = \frac{U_{др.вых.}}{K},$$

где K – коэффициент усиления усилителя; $U_{др.вых.}$ – максимальное изменение выходного напряжения при закороченном входе за установленное время наблюдения (рис. 12.1, *б*).

Значительно лучше с точки зрения дрейфа нуля работают дифференциальные каскады усиления.

12.2. Дифференциальный каскад УПТ

Дифференциальным каскадом УПТ называется усилитель разности напряжений (рис. 12.2). $R_{k1} = R_{k2} = R_k$.

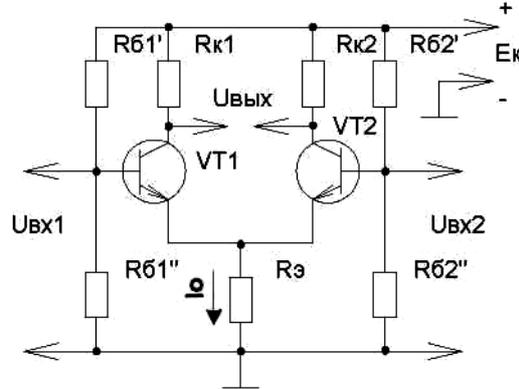


Рис. 12.2. Схема дифференциального каскада

Транзисторы VT1 и VT2 подбираются одинаковыми по коэффициенту усиления. Резисторы R_{k1} и R_{k2} также подбираются одинаковыми по величине своего сопротивления. Представим, что на оба входа подаем одинаковое напряжение $U_{вх.1} = U_{вх.2}$. В этом случае токи через транзисторы VT1 и VT2 будут одинаковыми. Суммарный ток через R3 обозначим через I_o . Тогда

$$I_{k1} = I_{k2} = \frac{I_o}{2};$$

$$U_{вых.} = U_{k1} - U_{k2};$$

$$U_{k1} = E_k - I_{k1} \cdot R_{k1};$$

$$U_{k1} = E_k - \frac{I_o}{2} R_k;$$

$$U_{k2} = E_k - \frac{I_o}{2} R_{k2};$$

$$U_{вых.} = (E_k - \frac{I_o}{2} R_{k1}) - (E_k - \frac{I_o}{2} R_{k2}) = 0.$$

Представим, что $U_{вх.1} > U_{вх.2}$. На первый вход подадим более положительное напряжение, чем на второй вход. В этом случае транзистор VT1 откроется в большей степени, чем транзистор VT2. Ток через транзистор VT1 увеличится на определенную величину ΔI_o , а ток через VT2 уменьшится на такую же величину ΔI_o , поскольку суммарный ток постоянен и равен I_o .

$$U_{k1} = E_k - \left(\frac{I_o}{2} + \Delta I_o \right) R_{k1};$$

$$U_{k2} = E_k - \left(\frac{I_o}{2} - \Delta I_o \right) R_{k2};$$

$$U_{вых.} = (E_k - \Delta I_o R_k) - (E_k + \Delta I_o R_k) = -2\Delta I_o R_k;$$

Основной особенностью дифференциальных каскадов является то, что дрейф нуля будет значительно меньше, чем в УПТ прямого усиления. Это объясняется тем, что выходной ток, протекая через общее эмиттерное сопротивление, создает на нем падение напряжения, приложенное относительно эмиттерного перехода для входного напряжения. Увеличение тока через одно плечо (напряжение на коллекторе падает) вызовет запирающее действие транзистора второго плеча (входные напряжения в данный момент неизменны) и рост напряжения на его коллекторе, так как $U_{бэ} = U_{вх.} - U_{RЭ}$.

Выход усилительного каскада между коллекторами называют симметричным. Для того чтобы, используя полезные свойства температурной стабильности, усиливать внешние (например, аналоговые) сигналы, используется напряжение между выходом одного из коллекторов транзисторов и общим проводом (несимметричный выход). В таком случае, если на один вход будем подавать переменное напряжение (на втором лишь неизменное постоянное), то на выходе получится инвертированное по фазе напряжение, поэтому такой вход называется инвертирующим входом. Вторым входом дифференциального усилителя называется неинвертирующий вход, так как сигнал, подаваемый на него (выход по-прежнему с коллектора другого плеча), останется неинвертированным.

12.3. Операционные усилители (ОУ). Классификация и основные параметры операционных усилителей

Операционным усилителем называется устройство с дифференциальным входным каскадом, предназначенное для выполнения математических операций с аналоговыми сигналами, имеющее исключительно высокий коэффициент усиления, очень большое входное и малое выходное сопротивление и выполненное в микросхемотехническом исполнении.

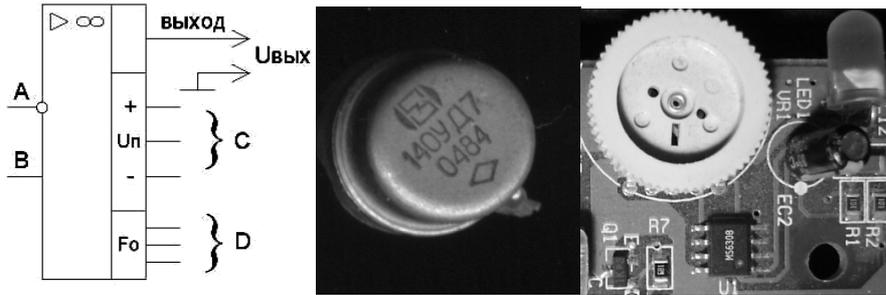
Операционный усилитель включает в свой состав один или несколько дифференциальных каскадов УПТ, генератор стабильного тока для питания этих каскадов и выходные эмиттерные повторители для увеличения входного и уменьшения выходного сопротивления (рис. 12.3). Пример маркировки ОУ: К553УД2.

Вход А – инвертирующий вход.

Вход В – неинвертирующий вход.

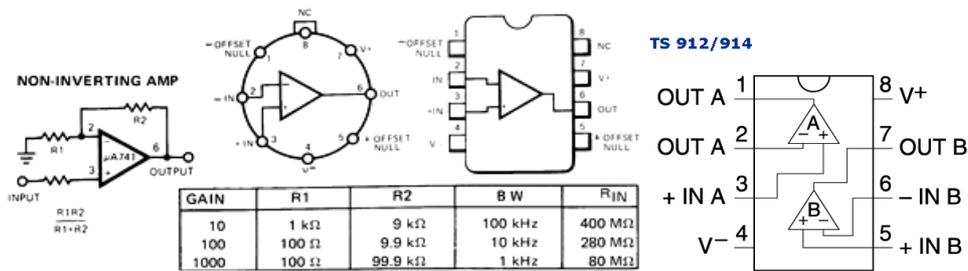
Входы С – для подключения двуполярного ИП.

Входы D – выводы для подключения цепей коррекции (в данном случае F означает частотную коррекцию, некоторые ОУ используют внешнюю коррекцию постоянного нуля на выходе, в таком случае говорят о балансе нуля и обозначают U_0 или N_c).



а

μA/LM 741



б

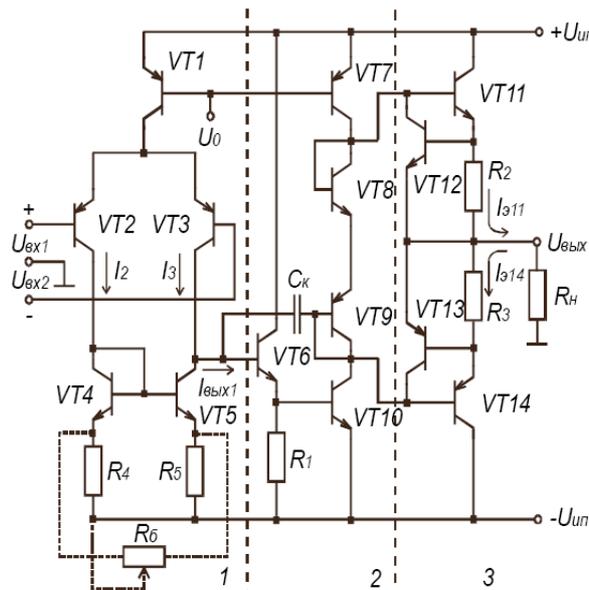


Рис. 12.3. УГО и внешний вид некоторых ОУ (а); цоколевка выводов (б); электрическая принципиальная схема ОУ марки 140УД7 (в)

ОУ подразделяются по следующим признакам:

- ОУ общего применения.
- Мощные ОУ.
- ОУ с управляемыми параметрами.
- Быстродействующие ОУ.

В технических условиях и руководствах по применению ОУ приводятся минимальные, типовые и максимальные значения параметров ОУ, необходимые для расчета допусков схем, использующих ОУ. Эти значения образуют метрику низкочастотных параметров ОУ, которая содержит следующие группы параметров:

1. *Усилительные и интерфейсные (без обратной связи) параметры.*

1.1. Коэффициент усиления без обратной связи μ называется *собственным* (полным) *коэффициентом усиления по напряжению*.

1.2. Входное сопротивление между инвертирующим и неинвертирующим дифференциальными входами r_{∂} . Сопротивление ОУ по отношению ко входному сигналу.

1.3. Собственное синфазное входное сопротивление параллельно соединенных входов ДУ по отношению к корпусу r_c . Величина r_c тем больше, чем лучше ослабляется синфазный сигнал. Современные ОУ имеют $r_c \gg r_d$, что позволяет во входной цепи эквивалентной схемы ОУ оставить лишь r_d – собственное дифференциальное входное сопротивление.

1.4. Выходное сопротивление $r_{вых}$.

1.5. Входная емкость по каждому входу $C_{вх}$.

1.6. Переходная характеристика. Сигнал на выходе ОУ при подаче на его вход ступеньки напряжения. Время нарастания и величина выброса выходного напряжения даются для стандартного изменения входного напряжения.

1.7. Передаточная характеристика, АЧХ, ФЧХ.

2. *Точностные параметры.*

2.1. Входное напряжение сдвига $U_{сдв}$. Небольшие нежелательные напряжения, возникающие внутри усилителя, являются причиной появления на выходе ОУ некоторого ненулевого напряжения при нулевом напряжении на обоих входах и следствием неточного согласования напряжений эмиттер – база входных транзисторов и наличия пусть небольших (доли микроампера), но все же существующих входных токов смещения. При этом ток смещения даже в отсутствие входного сигнала вызывает падение напряжения на параллельном соединении входного сопротивления ОУ и резистора в цепи обратной связи.

2.2. Средний температурный коэффициент смещения нуля, мкВ/град.

2.3. Входной ток смещения $I_{см}$. Ток на входах ОУ, необходимый транзисторам входного дифференциального каскада.

2.4. Входной ток сдвига $I_{сдв}$. Это есть разность токов смещения, необходимых для двух входных транзисторов ОУ, появляющаяся за счет неидентичности входных транзисторов дифференциального каскада ОУ.

Входной ток сдвига меняется почти так же, как входное напряжение, и поэтому является переменной величиной, которая лежит в диапазоне от нескольких единиц до нескольких сот nanoампер.

2.5. Коэффициент ослабления синфазного сигнала КОСС, который определяется отношением собственного дифференциального коэффициента усиления ОУ (без обратной связи) к коэффициенту передачи синфазного сигнала ОУ K_c : $КОСС = \mu/K_c$. Характеризует способность ОУ ослаблять (не усиливать) сигналы, приложенные к обоим входам одновременно, с одинаковыми амплитудами и фазами.

2.6. Коэффициент влияния нестабильности источника питания на выходное напряжение. Показывает изменение выходного напряжения при изменении напряжений питания на 1 В.

3. Динамические параметры.

Максимальные входные напряжения для синфазного $\pm U_c$ и дифференциального $\pm U_d$ входов.

Максимальное выходное напряжение.

Скорость нарастания выходного напряжения $dU_{вых.}/dt$ (рис. 12.4).

$$K_n = \frac{\Delta U_{вых.}}{\Delta t}, \text{ В/мкс.}$$

Временные характеристики. Время установления выходного напряжения в ответ на ступенчатое изменение напряжения входного сигнала и время восстановления ОУ после перегрузки – не столько параметры, сколько характеристики динамического поведения ОУ в некоторой простой операционной схеме в режиме большого сигнала.

Хотя время установления и время восстановления после перегрузки и относятся к конкретной схеме, их можно использовать для оценки поведения ОУ в сходных ситуациях, там, где решающим критерием является быстрая и точная реакция на быстро изменяющиеся сигналы.

Время установления t_y ОУ в данной схеме – время, которое требуется для установления выходного напряжения в пределах заданной погрешности в ответ на скачкообразный входной сигнал (обычно в пределах 0,9 от установившегося $U_{вых.}$).

Время восстановления t_g ОУ в данной схеме – время, необходимое для установления выходного напряжения в пределах заданной погрешности в ответ на снятие скачком определенного входного перевозбуждения. (обычно в пределах $0,1 U_{вых.}$ установившегося).

4. Энергетические параметры.

Ток потребления, ток покоя, потребляемый ОУ.

Выходное напряжение $U_{вых.}$

Потребляемая мощность от источников питания (без нагрузки).

Рабочий диапазон питающих напряжений $\pm U_n$.

В технической литературе встречается устаревшее УГО ОУ, изображенное на рис. 12.4.

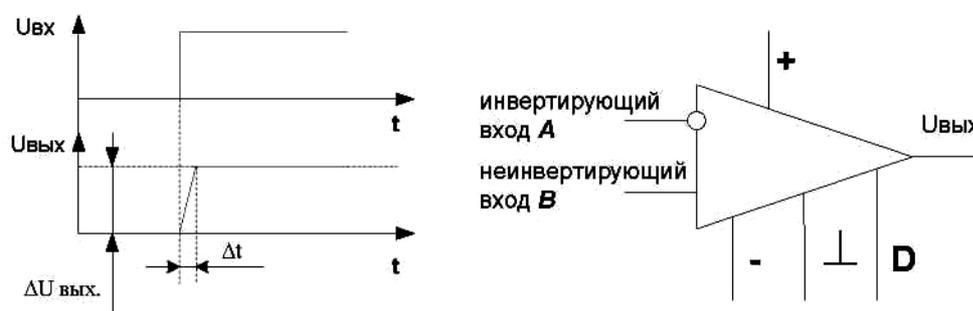


Рис. 12.4. Пояснения к определению временных характеристик ОУ (слева); вариант изображения ОУ на схемах (справа)

Так как ОУ имеет очень большой коэффициент усиления и достаточно сложную схему, то при работе на определенных частотах возможно появление нежелательных фазовых сдвигов, приводящих к образованию положительных ОС и, как следствие, к самовозбуждению усилителя. Для устранения этих возможностей применяются цепи коррекции, представляющие различные RC-цепочки. Цепи коррекции могут быть как внешними, то есть при помощи навесных элементов, так и внутренними, то есть внутри корпуса микросхемы. Причем цепи коррекции разрабатываются на этапе проектирования ОУ и являются индивидуальными для каждого конкретного типа ОУ.

12.4. Схемы включения ОУ

Поскольку на входе ОУ стоит дифференциальный каскад усиления, имеющий инвертирующий и неинвертирующий входы, то различают два основных вида включения – инвертирующее и неинвертирующее. Кроме этого, ОУ за счет высокого коэффициента усиления должен быть охвачен глубокой ООС для обеспечения устойчивости его работы. Инвертирующая схема включения ОУ изображена на рис. 12.5.

$$K = \frac{R_{oc} + R_1}{R_1}; R_{oc} \gg R_1; K \approx \frac{R_{oc}}{R_1}$$

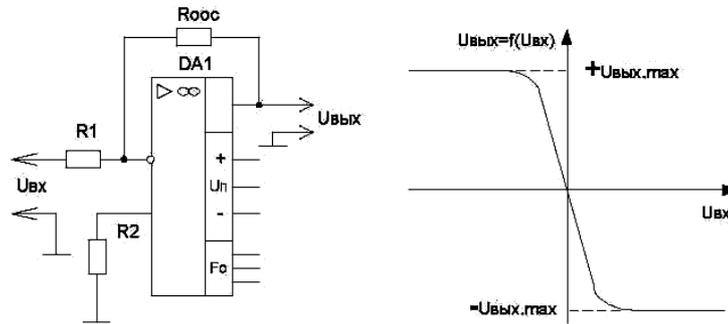


Рис. 12.5. Схема и характеристика инвертирующего ОУ

Неинвертирующая схема включения ОУ изображена на рис. 12.6.

$$K \approx \frac{R_{oc}}{R_1}$$

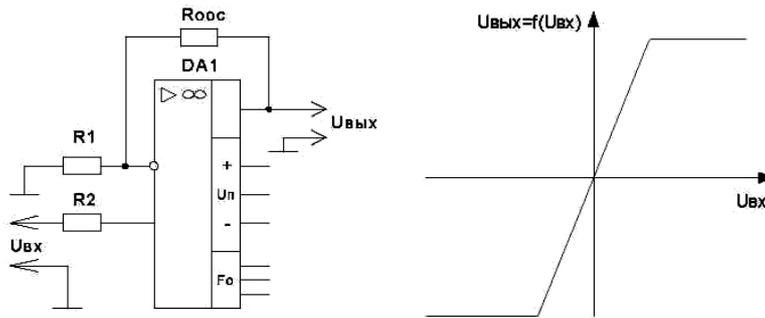


Рис. 12.6. Схема и характеристика неинвертирующего ОУ

Так как ОУ предназначены для проведения математических операций с аналоговыми сигналами, то различают суммирующее, интегрирующее и дифференцирующее включение ОУ. Схема суммирующего включения ОУ изображена на рис. 12.7.

$$U_{вых.} = K(U_{вх.1} + U_{вх.2} + U_{вх.3}).$$

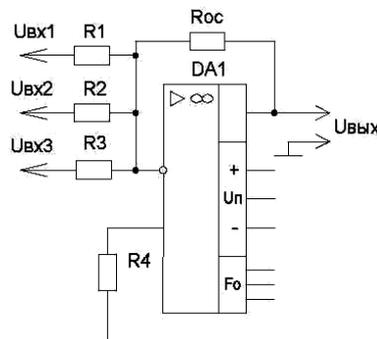


Рис. 12.7. Схема сумматора на ОУ

Схема интегрирующего включения ОУ изображена на рис. 12.8.

$$U_{\text{вых.}} = K \int_0^t U_{\text{вх.}}(t) dt .$$

Схема дифференцирующего включения ОУ изображена на рис. 12.9.

$$U_{\text{вых.}} = K \frac{dU_{\text{вх.}}}{dt} .$$

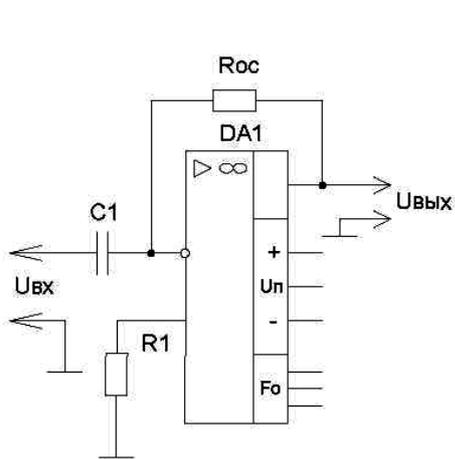


Рис 12.8. Схема интегрирующего включения ОУ

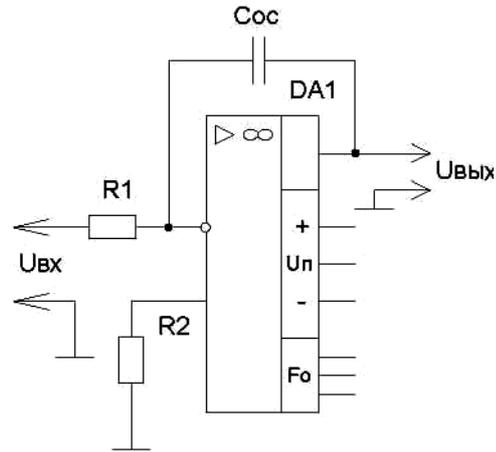


Рис. 12.9. Схема дифференцирующего включения ОУ

Поскольку ОУ с управляемыми параметрами имеют очень малую номенклатуру, то применяют управление при помощи различных внешних цепей таким параметром, как коэффициент усиления, причем он может управляться как аналоговым сигналом, так и цифровым кодом (рис. 12.10).

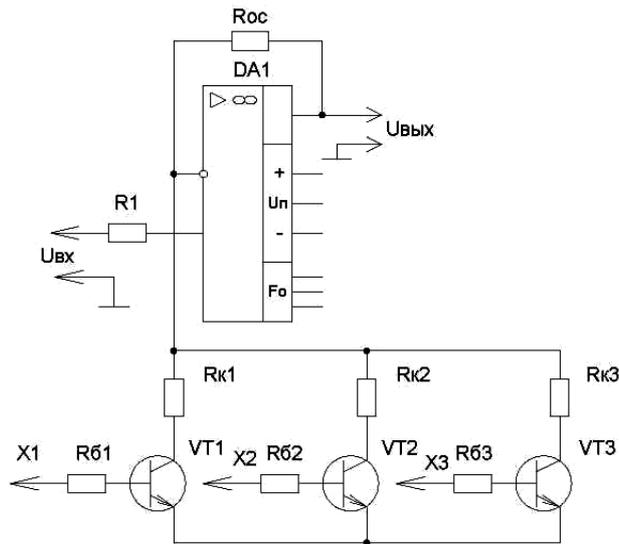


Рис. 12.10. Вариант ступенчатой регулировки коэффициента усиления ОУ

При подаче на один из входов логической единицы соответствующий транзисторный ключ открывается и в цепь инвертирующего входа оказывается включенной коллекторная нагрузка данного ключа.

$$K \approx \frac{R_{oc}}{R_{kn}}$$

Изменяя цифровой код на входах ключей, можно к инвертирующему входу подключить целый ряд коллекторных нагрузок, включенных в параллель, и соответственно изменять коэффициент усиления схемы.

Управление коэффициентом усиления при помощи аналогового сигнала можно осуществлять с помощью полевого транзистора (рис. 12.11).

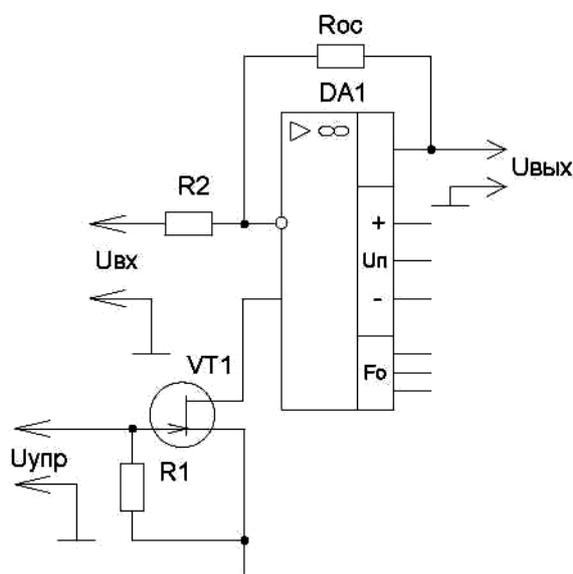


Рис. 12.11. Вариант плавной регулировки коэффициента усиления ОУ

В данной схеме роль сопротивления, подключенного к инвертирующему входу, выполняет канал полевого транзистора VT1. Изменяя управляющее напряжение, можно менять ширину канала, следовательно, и его сопротивление, что будет приводить к изменению коэффициента усиления.

Широкое применение ОУ нашли в активных фильтрах. Активные фильтры используются для формирования частотной характеристики заданного типа. Активные фильтры представляют собой ОУ, в обратную связь которого включены частотозависимые элементы. Они подразделяются на фильтры низкой частоты, фильтры ВЧ, полосовые фильтры, режекторные (заградительные) фильтры. Для решения конкретных задач в настоящее время разработано множество разнообразных активных фильтров.

Наиболее распространенными являются фильтры Чебышева, Баттерворда и Бесселя. В зависимости от количества частотозависимых цепочек RC активные фильтры бывают фильтрами первого, второго, третьего и т.д. порядка. На рис. 12.12 приведена схема фильтра низкой частоты (ФНЧ).

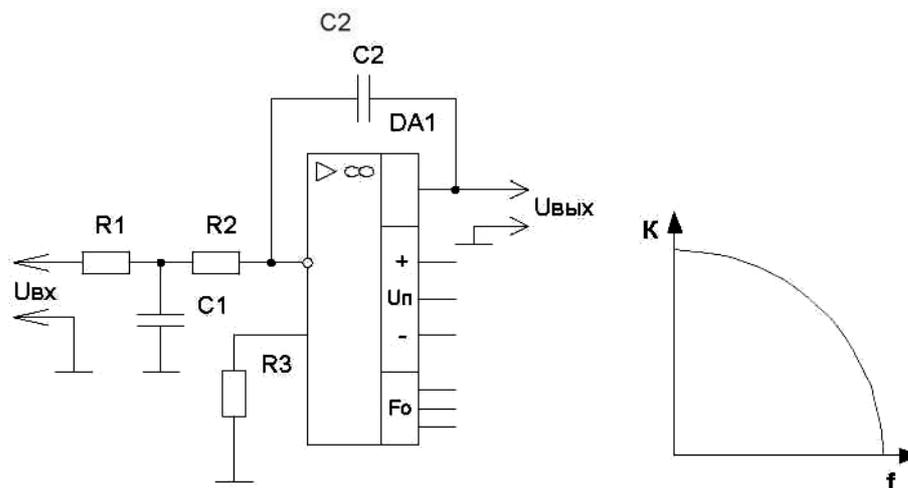


Рис. 12.12. Схема использования ОУ для ФНЧ и его АЧХ

На рис. 12.13 приведена схема фильтра высокой частоты (ФВЧ).

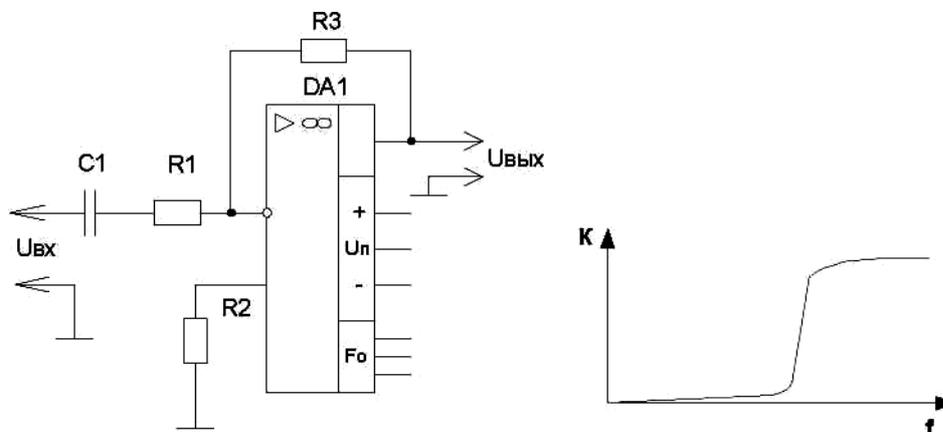


Рис. 12.13. Схема использования ОУ для ФВЧ и его АЧХ

$$K \uparrow = \frac{R_1}{R_2 \uparrow + \frac{1}{\omega C_1} \downarrow} .$$

На рис. 12.14 приведена схема полосового фильтра (ПФ).

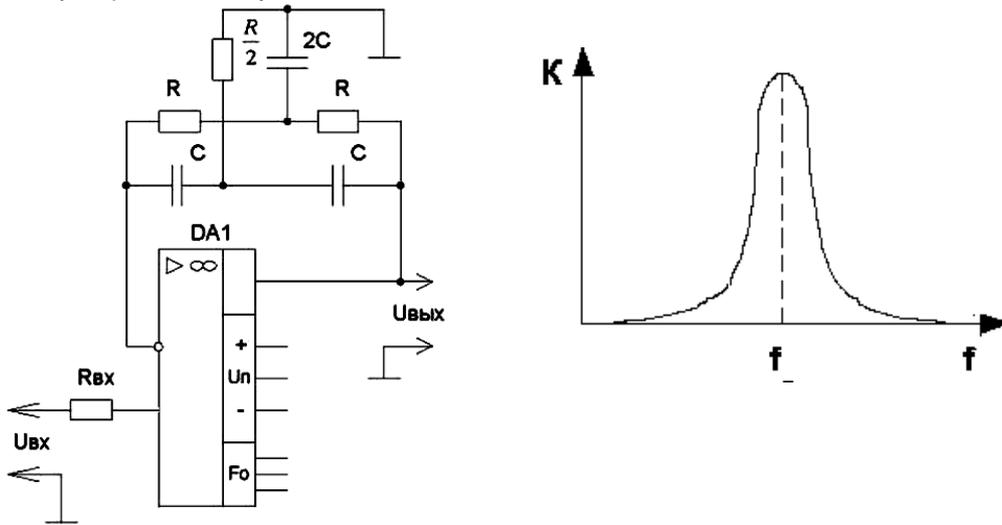


Рис. 12.14. Схема использования ОУ для реализации полосового фильтра и его АЧХ

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Коэффициент передачи двойного Т-образного моста на частоте f_o будет минимальным, а это значит, что сопротивление будет максимальным, а так как двойной Т-образный мост стоит в цепи ООС, то коэффициент усиления на частоте f_o будет максимальным. Перестроим данную схему так, чтобы данный фильтр превратился в режекторный (рис. 12.15).

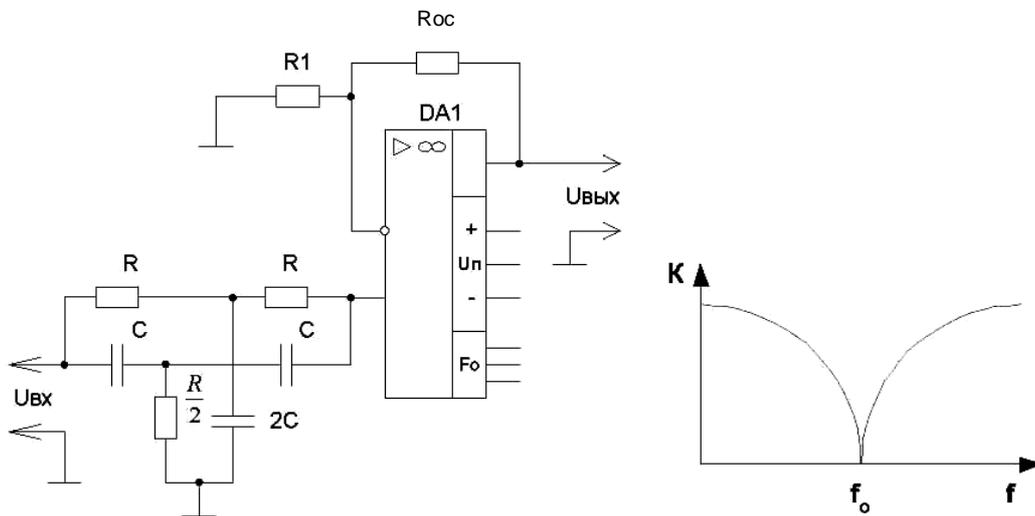


Рис 12.15. Схема использования ОУ для реализации режекторного фильтра и его АЧХ

На частоте f_o коэффициент передачи двойного Т-образного моста будет равен нулю, следовательно, сопротивление его будет очень велико, а так как двойной Т-образный мост включен последовательно с входным сигналом, то коэффициент усиления на частоте f_o будет минимальным.

Контрольные вопросы

1. Что такое дрейф нуля?
2. Объясните принцип работы дифференциального каскада. В чем его преимущество для УПТ?
3. Что произойдет на выходе при подаче переменного напряжения между двумя входами ДУ одновременно?
4. Объясните, почему на несимметричном выходе появляется сигнал при подаче на неинвертирующий вход сигнала.
5. В чем разница между дифференциальным и операционным усилителем?
6. Приведите УГО ОУ, расскажите о назначении выводов и символах на поле УГО.
7. Что означает U_0 на УГО ОУ?
8. Что означает выражение «интерфейсный параметр ОУ»?
9. Какие параметры ОУ относят к точностным, динамическим и энергетическим параметрам?
10. Почему в настоящее время практически не используют ОУ для выполнения арифметических вычислений с аналоговыми сигналами?
11. Что такое «активный фильтр»? Чем он отличается от RC-фильтров?

Список использованных литературных источников

1. Москатов, Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
2. Манаев, Е. И. Основы радиоэлектроники / Е. И. Манаев. – М. : Радио и связь, 1985. – 488 с.
3. Нефедов, В. И. Основы радиоэлектроники и связи / В. И. Нефедов. – М. : Высш. шк., 2002. – 510 с.
4. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
5. Мисюль, П. И. Техническое обслуживание и ремонт бытовой радиоаппаратуры : спецтехнология : учеб. пособие / П. И. Мисюль. – Минск : Выш. шк., 2002. – 320 с. : ил.
6. Валенко, В. С. Электроника и микросхемотехника : учеб. пособие / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Минск : Беларусь, 2000. – 320 с. : ил.
7. Лаврентьев, Б. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учеб. пособие / Б. Ф. Лаврентьев. – Йошкар-Ола : МарГТУ, 2000. – 155 с.

РАЗДЕЛ 7. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Содержание раздела

Элементы интегральных микросхем

Общие сведения о микроэлектронике. Пассивные элементы интегральных микросхем: резисторы, конденсаторы. Биполярные транзисторы. Диод полупроводниковых ИМС. Биполярные транзисторы с инжекционным питанием.

Логические элементы и схемы. Основные понятия о системах счисления и логических устройствах. Способы реализации основных логических функций. Разновидности серий логических элементов и их характеристики.

Методические указания

Элементы интегральных микросхем [1, с. 367 – 392; 2, с. 136 – 148; 3, с. 153 – 173]

При изучении материала необходимо ознакомиться с принципами построения интегральных микросхем и выяснить особенности активных и пассивных элементов.

Для лучшего усвоения материала необходимо ознакомиться с технологическими процессами, используемыми при изготовлении микросхем (фотолитография, диффузия, окисление).

Важным звеном при создании микросхем является изоляция элементов интегральных схем, а также изготовление пассивных элементов интегральных схем – диффузионных резисторов и конденсаторов.

Необходимо также ознакомиться с особенностями биполярных интегральных транзисторов, способами получения диодов из транзисторных структур и структурами полевых транзисторов.

Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризуйте требования, предъявляемые к современным микросхемам.
2. Технологические этапы изготовления интегральной схемы.
3. Способы изоляции элементов полупроводниковой интегральной схемы.
4. Какими методами создаются пленочные элементы интегральных схем?
5. Какие навесные элементы используются в гибридных интегральных схемах?

Основные элементы цифровой техники [1, с. 509 – 517; 3, с. 188 – 199]

Основные понятия алгебры логики. Функционально полный набор логических связей. Законы и аксиомы алгебры логики. Минимизация переключательных функций, их реализация в базисах «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ».

Ключи [3, с. 174 – 188]

Схемы и статические характеристики диодных ключей. Быстродействие диодного ключа, процессы переключения. Применение диодных ключей.

Ключевые свойства биполярных транзисторов. Статические режимы работы транзисторных ключей. Процессы переключения и быстродействие. Способы увеличения быстродействия. Насыщенные ключи, ключи на переключателях тока.

Виды нагрузок транзисторных ключей на полевых транзисторах. Ключи на МДП-транзисторах с дополнительной симметрией. Переходные процессы, быстродействие ключей на МДП-транзисторах и КМДП-структурах.

Логические элементы [1, с. 331 – 372; 3, с. 199 – 227]

Параметры и характеристики логических элементов. Виды сигналов, потенциальные и импульсные логические элементы. Классификационные статические параметры и параметры быстродействия. Основные параметры режима универсальных логических элементов.

Базовые схемы ДТЛ и ТТЛ. Входные и выходные каскады. Помехоустойчивость и быстродействие ДТЛ и ТТЛ элементов. ТТЛ с диодами Шоттки.

Базовый элемент ЭСЛ. Принцип работы, статические режимы, параметры быстродействия. Особенности ЭСЛ элементов различных серий.

Схемы и принцип действия пМДП и рМДП логических элементов. Особенности схемотехники логических элементов на МДП-транзисторах. Логические элементы на МДП-транзисторах с взаимодополняющими структурами. Быстродействие логических элементов на МДП-транзисторах и КМДП-структурах. Интегральная инжекционная логика.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется системой счисления?
2. Правило перевода числа из десятичной системы в систему с основанием q .
3. Как перевести число из двоичной системы счисления в десятичную?
4. Поясните операцию логического умножения.
5. Приведите условное обозначение операций И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ.

6. Что представляет собой накапливающий сумматор?
7. Назовите основные требования к БЛЭ.
8. Что такое коэффициент разветвления по выходу?
9. Назовите основные типы БЛЭ и область их применения.
10. Приведите схему базового элемента 3И-НЕ ТТЛ.
11. Назначение диодов Шоттки в схемах БЛЭ ТТЛШ.
12. Нарисуйте токовый ключ БЛЭ ЭСЛ.
13. Нарисуйте БЛЭ КМОП-типа, реализующий операцию 2И-НЕ.

Рекомендуемая литература

1. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учеб. для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров ; под ред. О. П. Глудкина. – М. : Радио и связь, 1999.
2. Гусев, В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 1991.
3. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.

Тема 13. Основы микроэлектроники

Термины: *микросборка, микросхема, бескорпусной компонент, пленочные, гибридные, совмещенные, полупроводниковые технологии, степень интеграции, БИС, СБИС, серия, климатическое исполнение, функциональный ряд, МЭТ, МКТ, транзистор с инжекционным питанием, DIP, QFP, PLCC, BGA.*

- 13.1. Классификация и УГО интегральных микросхем (ИМС)
- 13.2. Аналоговые интегральные микросхемы
- 13.3. Классификация микросхем по функциональному признаку, система обозначений. Функциональная классификация микросхем
- 13.4. Элементы и компоненты гибридных ИМС (ГИС)
- 13.5. Элементы и компоненты полупроводниковых ИМС
- 13.6. Типы корпусов и техническая документация на ИМС

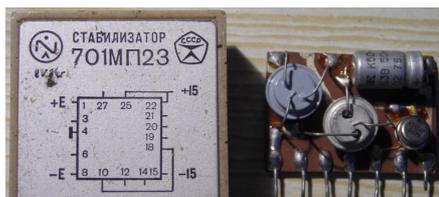


Рис. 13.1. Внешний вид микросборок

Самым ранним этапом процесса микроминиатюризации было использование микросборок – компактных унифицированных узлов для быстрой сборки и замены (рис 13.1). Пик в их применении пришелся на 60 – 70-е гг.

XX века. Однако требования по увеличению количества элементов в схеме, с одной стороны, и уменьшения массы и габаритов, с другой, они обеспечить не смогли. Поэтому с 70-х годов началось массовое производство и использование интегральных микросхем.

13.1. Классификация и УГО интегральных микросхем

Интегральная микросхема (ИМС) – микроэлектронное устройство, выполняющее функции целой электрической схемы и выполненное как единое целое. Согласно ГОСТ 17021-88 интегральная микросхема – это микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки сигнала или накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов и кристаллов, которые рассматриваются как единое целое.

Элементом называют часть ИМС, в которой реализуется функция какого-либо радиоэлемента (транзистора, диода, резистора и т.д.) и которую нельзя отделить от схемы и рассматривать как самостоятельное изделие. Элементы формируются на полупроводниковой пластине в едином технологическом процессе.

В некоторых случаях в состав ИМС входят *компоненты* (бескорпусные транзисторы, навесные конденсаторы, резисторы и т.д.), которые устанавливаются при выполнении сборочно-монтажных операций. Компоненты являются самостоятельными изделиями, они могут быть отделены от изготовленной ИМС и заменены другими. Классифицируют ИМС по следующим признакам:

1. По технологии изготовления

Пленочные – это ИМС, у которых все элементы выполнены в виде тонких пленок, нанесенных на диэлектрическое основание, т.е. подложку. В зависимости от способа нанесения пленок на поверхность диэлектрической подложки и их толщины различают тонкопленочные (толщина пленок менее 1 мкм) и толстопленочные (толщина пленок порядка 20 – 40 мкм).

Гибридные (ГИС) – это ИМС, у которых пассивные элементы выполнены по тонкопленочной технологии, а активные элементы выполнены как отдельные, навесные, бескорпусные. Совмещенные ГИС использовали полупроводниковую подложку, в которой изготавливались активные компоненты, а пассивные напылялись на поверхность (рис. 13.2).

Полупроводниковые ИМС – это микросхемы, у которых все элементы «выращены» в кристалле полупроводника (см. рис. 13.2).

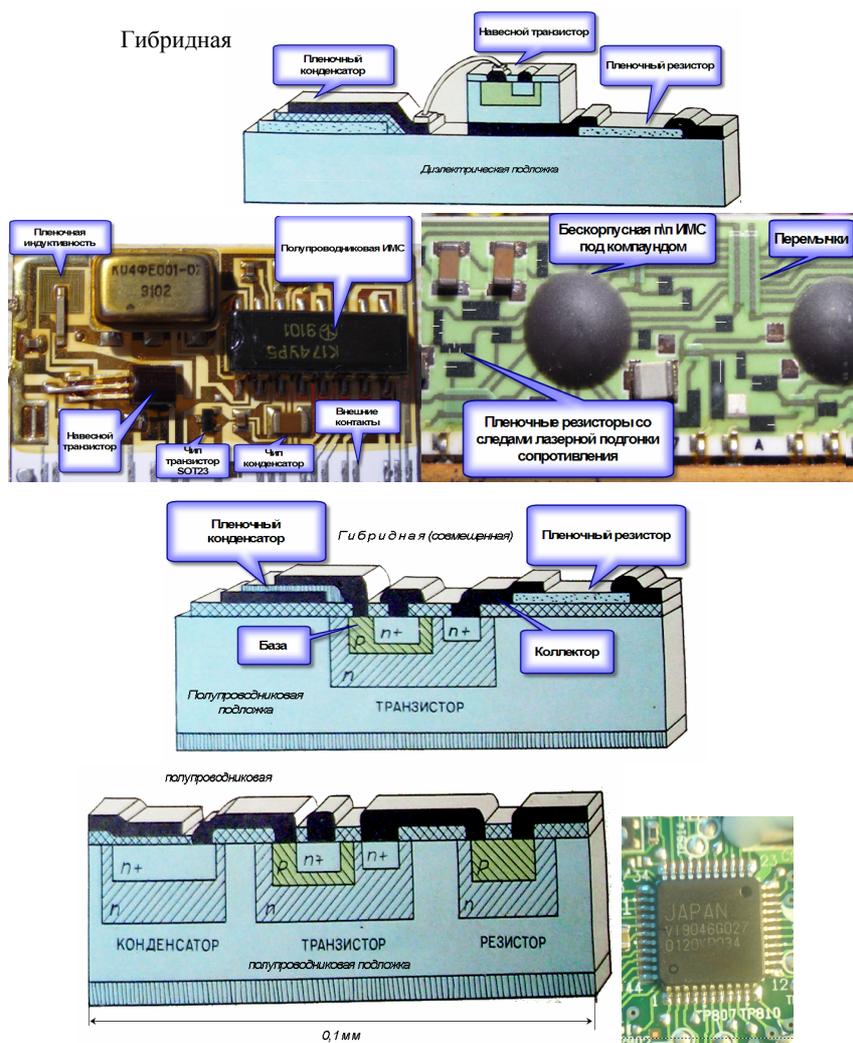


Рис. 13.2. Конструкции ИМС, изготовленных по различным технологиям

2. По способу преобразования и обработки информации:

- Аналоговые ИМС – с непрерывной обработкой информации (рис. 13.3, а);
- Цифровые ИМС – с дискретной обработкой информации (см. рис. 13.3, б).
- Аналогоцифровые и цифроаналоговые преобразователи.

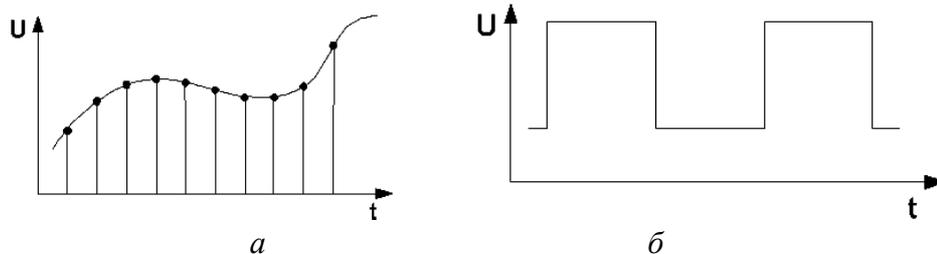


Рис. 13.3. Пояснения к разновидностям сигналов: аналоговый (а) и цифровой двухуровневый (б)

3. По степени интеграции

Сложность ИМС оценивают *степенью интеграции*, определяемой коэффициентом интеграции K , значение которого округляется до ближайшего большего целого числа.

$$K = \lg N, \quad (13.1)$$

где N – число элементов и компонентов, входящих в ИМС.

Микросхемы первой степени интеграции ($K = 1$) содержат до 10 элементов и компонентов, второй степени интеграции ($K = 2$) – от 13 до 100 и т.д. **Все они относятся к малым интегральным микросхемам (МИС)** – ИС, содержащая до 100 элементов и (или) компонентов включительно.

Средняя интегральная микросхема (СИС) – ИС, содержащая выше 100, но не более 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 100, но не более 500 – для аналоговых ИС.

Большая интегральная микросхема (БИС) – ИС, содержащая выше 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 500 – для аналоговых ИС.

Сверхбольшая интегральная микросхема (СБИС) – ИС, содержащая свыше 100000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС с регулярной (однородной) структурой, свыше 50000 – для цифровых ИС с нерегулярной структурой и свыше 10000 – для аналоговых ИС.

Первые опыты по созданию полупроводниковых интегральных схем были осуществлены в 1953 г., а промышленное производство интегральных схем началось в 1959 г.

В 1966 г. был начат выпуск интегральных схем средней степени интеграции (число элементов в одном кристалле до 1000). В 1969 г. были созданы интегральные схемы большой степени интеграции (БИС), содержащие до 10000 элементов в одном кристалле.

В 1971 г. были разработаны микропроцессоры, а в 1975 г. – интегральные схемы сверхбольшой степени интеграции (СБИС), содержащие более 10000 элементов в одном кристалле.

Микропроцессором называют построенное на одной или нескольких СБИС программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки информации и управление им. Микропроцессор является центральным элементом микропроцессорной системы (микро-ЭВМ), в которую также входит память и устройства ввода/вывода (внешние устройства).

При выборе микросхем для аппаратуры определенного типа необходимо руководствоваться не только функциональным предназначением микросхемы, но и ее характеристиками и параметрами, т.е. величинами, определяющими свойства микросхемы, режим и условия ее работы. Обычно это:

- функциональные параметры микросхемы, определяющие ее возможности;
- параметры рабочего режима, определяющие совокупность условий, необходимых для правильного функционирования микросхемы;
- эксплуатационные характеристики, определяющие уровень воздействия факторов окружающей среды (механических, климатических), не нарушающий нормального функционирования микросхемы в пределах гарантированного ресурса при заданной надежности;
- конструктивные параметры, характеризующие габаритные и соединительные размеры.

Что касается эксплуатационных характеристик, то они являются общими для всех изделий электронной техники. Конкретные численные значения параметров и указания по применению приводятся в нормативно-технической документации на изделие и в справочниках.

13.2. Аналоговые интегральные микросхемы

Аналоговые интегральные микросхемы находят применение в аппаратуре связи, телевидения и телеуправления, в аналоговых вычислительных машинах, магнитофонах, в медицинском оборудовании, в измерительных приборах, системах контроля.

Благодаря совершенствованию технологии и методов проектирования номенклатура интегральных микросхем постоянно расширяется. В настоящее время в интегральном исполнении реализуются самые различные аналоговые функциональные элементы и устройства. В большом количестве выпускаются интегральные микросхемы для различных по назначению и функциональным возможностям генераторов, детекторов, модуляторов, преобразователей, усилителей, коммутаторов, ключей, фильтров, вторичных источников питания, схем селекции и сравнения, а также многофункциональные микросхемы и микросхемы, представляющие собой наборы элементов.

Аналоговые микросхемы, так же как и цифровые, выпускаются сериями.

Серии существенно различаются по областям преимущественного применения, функциональному составу и количеству входящих в них интегральных микросхем.

Основными признаками при разделении ИМС на серии являются:

- технология изготовления;
- степень совершенства технологии производства (в последнее время наиболее часто используется понятие минимального разрешения в технологии изготовления – микронное, нанометровое);

Частные признаки:

- электрические и энергетические характеристики;
- климатическое исполнение;
- другие.

Большая группа серий предназначена в основном для создания приемопередающей аппаратуры радиосвязи, выпускаются серии для телевизионной аппаратуры, магнитофонов, электрофонов и линейно-импульсных устройств. Все эти серии условно можно подразделить на *функционально полные* и *функционально неполные*. Функционально полные состоят из широкого круга специализированных микросхем, относящихся к разным функциональным подгруппам. Каждая из этих серий позволяет создать практически все реализуемые сейчас в микроэлектронном исполнении узлы таких устройств, как радиоприемники, телевизоры и подобные им по сложности.

Функционально неполные серии состоят из небольшого числа специализированных микросхем. Они предназначены в основном для создания отдельных трактов аналоговой аппаратуры.

Кроме серий специализированного назначения промышленность выпускает широкий круг серий, микросхемы которых одинаково успешно могут применяться для создания отдельных узлов аппаратуры различных классов.

Для характеристики микросхем различных серий и для сравнительной оценки микросхем, относящихся к одному виду, в основном используют совокупности функциональных параметров. Однако в инженерной и радиолюбительской практике важную роль играют и такие факторы, как напряжение питания, конструктивное оформление, масса, предельно допустимые условия эксплуатации микросхем. В ряде случаев именно они имеют решающее значение при выборе элементной базы для конкретной аппаратуры.

Для питания микросхем используется широкая градация номинальных значений напряжений положительной и отрицательной полярности.

При этом допуск в большинстве случаев составляет $\pm 10\%$. Различие по величине питающих напряжений во многих практических случаях затрудняет или делает невозможным использование в одном устройстве микросхем различных серий, даже если они отвечают требованиям по основным функциональным параметрам.

Разнообразно конструктивное оформление микросхем различных серий. Они отличаются по форме, размерам, материалу корпусов, количеству и типу выводов, массе и т.д.

По предельно допустимым условиям эксплуатации микросхемы разных серий существенно отличаются друг от друга.

Имеется существенное различие по температурному диапазону применения аналоговых микросхем. Очевидно, что микросхемы, характеризующиеся нижним пределом температурного диапазона -10 или -25 °С, не могут быть рекомендованы для применения в аппаратуре, предназначенной для работы в зимних условиях. В отдельных случаях серьезные ограничения накладывает верхняя граница $+50$ или $+55$ °С.

По устойчивости к механическим нагрузкам микросхемы различных серий близки друг к другу. Большинство микросхем выдерживает вибрационную нагрузку в диапазоне от 1 до 600 Гц с ускорением 10 g.

13.3. Классификация микросхем по функциональному признаку, система обозначений. Функциональная классификация микросхем

Функциональная классификация интегральных микросхем определена ГОСТ 18682-73. Интегральные микросхемы по роду выполняемой функции разбиваются на подгруппы (усилители, преобразователи, триггеры и т.д.); внутри каждой подгруппы микросхемы подразделяются по виду выполняемой функции (УВЧ, преобразователи фазы, RS-триггеры и т.д.). В соответствии с функциональной классификацией микросхемам присваиваются определенные наименования (табл. 13.1).

Таблица 13.1

Подгруппы и виды ИС

Подгруппа	Вид	Обозначение
1	2	3
А Формирователи	Формирователи: импульсов прямоугольной формы импульсов специальной формы прочие	АГ АФ АП

Продолжение табл. 13.1

1	2	3
Б Схемы за- держки	Схемы задержки: пассивные активные прочие	БМ БР БП
В Схемы вы- числитель- ных средств	микроЭВМ микропроцессоры микропроцессорные секции схемы микропрограммного управления схемы синхронизации схемы управления прерыванием схемы интерфейса схемы управления памятью функциональные преобразователи инфор- мации схемы сопряжения с магистралью время задающие схемы микрокалькуляторы контроллеры специализированные схемы прочие	ВЕ ВМ ВС ВУ ВБ ВН ВВ ВТ ВФ ВА ВИ ВХ ВГ ВЖ ВП
Г Генераторы	гармонических сигналов прямоугольных сигналов линейно изменяющихся сигналов сигналов специальной формы шума прочие	ГС ГГ ГЛ ГФ ГМ ГП
Д Детекторы	амплитудные импульсные частотные фазовые прочие	ДА ДИ. ДС ДФ ДП
Е Схемы ис- точников вторичного питания	выпрямители преобразователи стабилизаторы напряжения непрерывные стабилизаторы напряжения импульсные стабилизаторы тока схемы управления импульсными стабили- заторами напряжения системы источников вторичного питания прочие	ЕВ ЕМ ЕН ЕТ ЕУ ЕС ЕП

Продолжение табл. 13.1

1	2	3
И Схемы цифровых устройств	регистры сумматоры полусумматоры счетчики шифраторы дешифраторы комбинированные арифметико-логические устройства прочие	ИР ИМ ИЛ ИЕ ИВ ИД ИК ИА ИП
К Коммута- торы и ключи	тока напряжения прочие	КТ КН КП
Л Логические элементы	элемент И элемент НЕ элемент ИЛИ элемент И-НЕ элемент ИЛИ-НЕ элемент И-ИЛИ элемент И-НЕ/ИЛИ-НЕ элемент И-ИЛИ-НЕ элемент И-ИЛИ-НЕ/И-ИЛИ элемент ИЛИ-НЕ/ИЛИ расширители прочие	ЛИ ЛН ЛЛ ЛА ЛЕ ЛС ЛБ ЛР ЛК ЛМ ЛД ЛП
М Модулято- ры	Модуляторы: амплитудные частотные фазовые импульсные прочие	МА МС МФ МИ МП
Н Наборы элементов	диодов транзисторов резисторов конденсаторов комбинированные функциональные прочие	НД НТ НР НЕ НК НФ НП

Продолжение табл. 13.1

1	2	3
П Преобразователи сигналов	частоты длительности напряжения (тока) мощности уровня аналого-цифровые цифро-аналоговые код-код синтезаторы частоты делители частоты аналоговые делители частоты цифровые умножители частоты аналоговые прочие	ПС ПД ПН ПМ ПУ ПВ ПА ПР ПЛ ПК ПЦ ПЕ ПП
Р Схемы запоминающих устройств	матрицы оперативных запоминающих устройств матрицы постоянных запоминающих устройств оперативные запоминающие устройства постоянные запоминающие устройства с возможностью однократного программирования постоянные запоминающие устройства запоминающие устройства на ЦМД постоянные запоминающие устройства с возможностью многократного электрического перепрограммирования постоянные запоминающие устройства с ультрафиолетовым стиранием и электрической записью информации ассоциативные запоминающие устройства прочие	РМ РВ РУ РТ РЕ РР РФ РА РП
С Схемы сравнения	амплитудные временные частотные компараторы напряжения	СК СВ СС СА
Т Триггеры	типа JK типа RS типа D счетные типа Т динамические Шмитта комбинированные прочие	ТВ ТР ТМ ТТ ТД ТЛ ТК ТП

1	2	3
У Усилители	высокой частоты промежуточной частоты низкой частоты широкополосные импульсных сигналов повторители считывания и воспроизведения индикации постоянного тока операционные дифференциальные прочие	УВ УР УН УК УИ УЕ УЛ УМ УТ УД УС УП
Ф Фильтры	Фильтры: верхних частот нижних частот полосовые режекторные прочие	ФВ ФН ФЕ ФР ФП
Х Много- функцио- нальные схемы и схемы повышен- ной функ- циональной сложности	Многофункциональные схемы: аналоговые цифровые комбинированные прочие	ХА ХЛ ХК ХП
Ц Фоточувст- вительные схемы с зарядовой связью	матричные линейные прочие	ЦМ ЦЛ ЦП

Система обозначений

Условное обозначение интегральных микросхем включает в себя основные классификационные признаки. (Пример маркировки микросхемы показан на рис. 13.4.) Она состоит из четырех основных элементов.

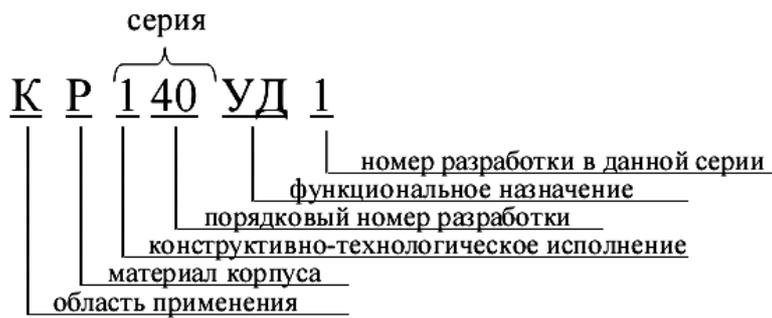


Рис 13.4. Маркировка микросхем

Первый элемент – цифра, соответствующая конструктивно-технологической группе. Цифрами 1, 5, 6 и 7 в первом элементе обозначаются полупроводниковые интегральные микросхемы. Гибридным микросхемам присвоены цифры 2, 4 и 8. Пленочные, вакуумные и керамические интегральные микросхемы обозначаются цифрой 3.

Второй элемент, определяющий порядковый номер разработки серии, состоит из двух (от 00 до 99) или трех (от 000 до 999) цифр.

Третий элемент, обозначающий подгруппу и вид микросхемы, состоит из двух букв (см. табл. 13.1).

Четвертый элемент, обозначающий порядковый номер разработки микросхемы данной серии, состоит из одной или нескольких цифр.

К этим основным элементам обозначений микросхем могут добавляться и другие классификационные признаки. Дополнительная буква в начале четырехэлементного обозначения указывает на особенность конструктивного исполнения:

- Р – пластмассовый корпус типа ДИП;
- А – пластмассовый планарный корпус;
- Е – металлополимерный корпус типа ДИП;
- С – стеклокерамический корпус типа ДИП;
- И – стеклокерамический планарный корпус;
- Н – керамический «безвыводной» корпус.

В начале обозначения для микросхем, используемых в условиях широкого применения, приводится буква К.

Серии бескорпусных полупроводниковых микросхем начинаются с цифры 7, а бескорпусные аналоги корпусных микросхем обозначаются буквой Б перед указанием серии.

Через дефис после обозначения указывается цифра, характеризующая модификацию конструктивного исполнения: 1 – с гибкими выводами; 2 – с ленточными (паучковыми) выводами, в том числе на полиамидном носителе; 3 – с жесткими выводами; 4 – на общей пластине (неразделенные); 5 – разделенные без потери ориентировки (наклеенные на пленку); 6 – с контактными площадками без выводов.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

За рубежом существуют различные системы кодирования (обозначения) ИМС, действующие как в международном масштабе, так и внутри отдельных стран и фирм.

В европейских странах система кодирования ИМС аналогична системе, принятой для кодирования дискретных полупроводниковых приборов, и используется примерно 40 фирмами различных стран (Англии, Бельгии, Италии, Испании, Нидерландов, Швеции, Германии), выпускающими полупроводники. Основные принципы кодирования, по которым обозначения присваиваются организацией Association International Pro Electron, приводятся ниже.

Код состоит из трех букв, за которыми следует серийный номер (например, TBA810, SAB2000).

Первая буква (для одиночных схем) отражает принцип преобразования сигнала в схеме: S – цифровая схема; T – аналоговая схема; U – смешанная аналого-цифровая схема.

Вторая буква не имеет специального значения (выбирается фирмой-изготовителем), за исключением буквы H, которой обозначаются гибридные схемы.

Для серий (семейств) цифровых схем первые две буквы обозначают:

FL, F2, GD – цифровые схемы;

GA – маломощные ТТЛ-схемы;

GF – стандартные ТТЛ-схемы;

GJ – быстродействующие ТТЛ-схемы;

GM – маломощные с диодами Шоттки ТТЛ-схемы; HB – комплементарные МОП-схемы 4000А;

HC – комплементарные МОП-схемы 4500В.

Третья буква обозначает рабочий диапазон температуры или как исключение – другую важную характеристику:

A – температурный диапазон не нормирован;

B – от 0 до +70 °С;

C – от –55 до +125 °С;

D – от –25 до +70 °С;

E – от –25 до +85 °С;

F – от –40 до +85 °С;

G – от –55 до +85 °С.

Затем следует серийный номер. Он может быть либо четырехзначным числом, либо серийным номером, состоящим минимум из четырех цифр существующего внутрифирменного номера. Если последний состоит менее чем из четырех цифр, то количество цифр увеличивается до четырех путем добавления нулей перед ними.

Кроме того, за цифрами может следовать буква для обозначения варианта (разновидности) основного типа.

При обозначении вариантов корпусов (после серийного номера) первая буква показывает тип корпуса:

C – цилиндрический корпус;

D – с двухрядным параллельным расположением выводов (DIP);

F – плоский (с двусторонним расположением выводов);

G – плоский (с четырехсторонним расположением выводов);

K – металлический корпус типа ТО-3;

Q – с четырехрядным параллельным расположением выводов.

Вторая буква показывает материал корпуса: В – бериллиевая керамика; С – керамика; G – стеклокерамика; М – металл; Р – пластмасса.

Ниже приводятся другие условные обозначения ИМС некоторых зарубежных фирм. Вначале дается пример внутрифирменного обозначения, а затем на его основе показано цифро-буквенное кодирование ИМС.

Фирма Advanced Micro Devices

Логотипы фирм-производителей приведены в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Логотипы фирм-производителей

ЛОГОТИПЫ ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ			
	8x8		Alliance
	Acer		Alpha Industries
	Acer Laboratories		Alpha Microelectronics
	Actel		Alpha Semiconductor
	Advanced Analogic Technology		Altera
	Advanced Communication Devices (ACD)		American Microsystems
	Advanced Hardware Architectures		American Microsystems
	Advanced Hardware Architectures		AMI Semiconductor
	Advanced Linear Devices		ANADIGICS
	Advanced Micro Devices (AMD)		Analog Devices
	Advanced Micro Systems		Analog Devices
	Advanced Monolithic Systems		Analog Integrations Corporation
	Advanced Power Technology		Analog Microelectronics
	Aeroflex		Analog Systems
	Agilent Technologies		Anchor Chips
	Aimtron Technology		Apex Microtechnology
	AlTech International		Apex Microtechnology
	AKM Semiconductor		ARK Logic
	Alesis Semiconductor		Arizona Microtek
	Altima Communications		Astec Semiconductor
	Allayer Communications		ATAN Technology
	Allegro Microsystems		ATecoM

	Hewlett Packard - see Agilent Technologies		Integrated Circuit Solution
	HFO		Integrated Circuit Systems
	hi/fn		Integrated Circuit Systems
	Hitachi		Integrated Device Technology (IDT)
	Holtek Microelectronics		Integrated Device Technology (IDT)
	Hualon Microelectronics		Integrated Logic Systems
	Hyundai		Integrated Silicon Solutions
	Hyundai		Integrated Technology Express
	Hutson Industries		Integrated Telecom Express
	iC Designs --- now Cypress		Intel
	iC-Haus		Intel
	iC-Haus		InterFET
	I-Cube		International Microcircuits
	IC Works		International Rectifier
	IGS Technologies		Intersil
	IMP		Intersil
	Impala Linear		Intersil
	Infineon Technologies		Intersil
	Infineon Technologies		ITT (Micronas Semiconductor)
	Infinite Technology		IXYS
	Information Storage Devices		Korea Electronics (KEC)
	Inmos (STMicroelectronics)		KOTA Microcircuits
	Integrated Circuit Designs		Lansdale Semiconductor

Обозначение ИМС на электрических принципиальных схемах и УГО ИМС

Обозначение ИМС на схеме электрической принципиальной (ЭЗ) производится согласно ГОСТ двумя буквами (табл. 13.3), и далее следует позиционный номер в схеме в пределах группы.

УГО ИМС имеют форму прямоугольника. УГО элемента может содержать основное и два дополнительных поля, расположенных по обе стороны от основного (рис 13.5).

Обозначение ИМС на электрических принципиальных схемах

D	Схемы интегральные, микросборки	Схема интегральная аналоговая	DA
		Схема интегральная цифровая	DD
		Устройство хранения информации	DS
		Устройство задержки	DT

Размер прямоугольника по ширине зависит от наличия дополнительных полей и числа помещенных в них знаков (меток, обозначения функции элемента), по высоте – от числа выводов, интервалов между ними и числа строк информации в основном и дополнительных полях. Ширина основного поля не менее 10 мм, дополнительных не менее 5 мм (при большом числе знаков в метках и обозначении функции эти размеры увеличиваются (масштабируются) с кратным коэффициентом по ГОСТ), расстояние между выводами 5 мм, выводом и горизонтальной стороной обозначения – не менее 2,5 мм и кратно этой величине. При разделении групп элементов, относящихся к одной ИМС, прибегают к маркировке на рис. 13.6. Возле вывода указывается номер в соответствии с цоколевкой корпуса. Причем порядок расположения нумерации на схеме может не совпадать с цоколевкой.

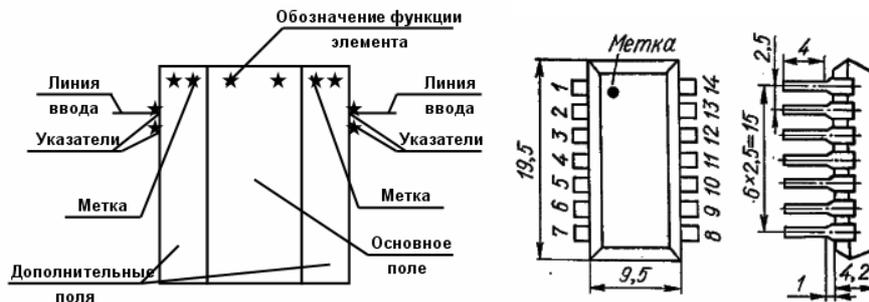


Рис. 13.5. Типовое УГО и внешний вид ИМС

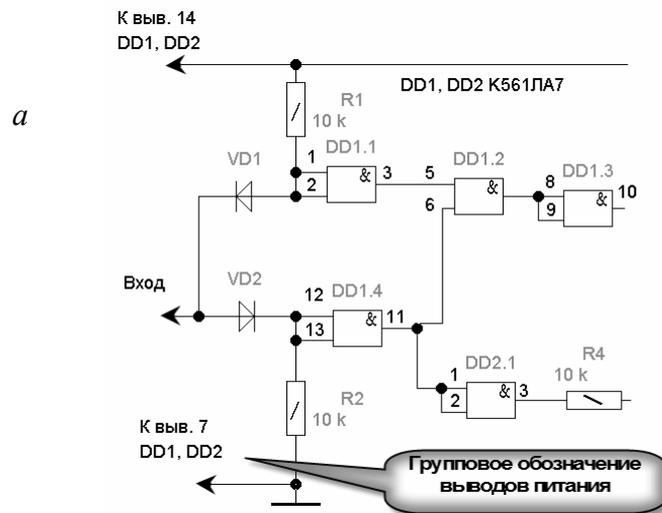
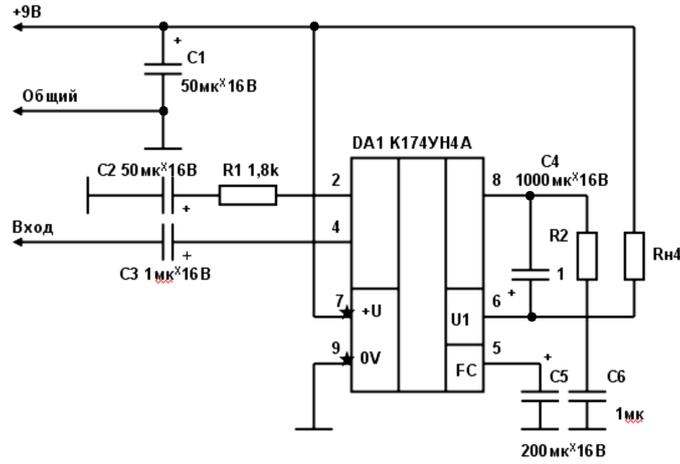


Рис. 13.6. Фрагменты схем с использованием цифровых (а) и аналоговой микросхемы (б) (см также с. 246)



б

Рис. 13.6. Окончание

На зарубежных схемах ИМС обозначают либо одной буквой (U), либо двумя (IC) (рис. 13.7).

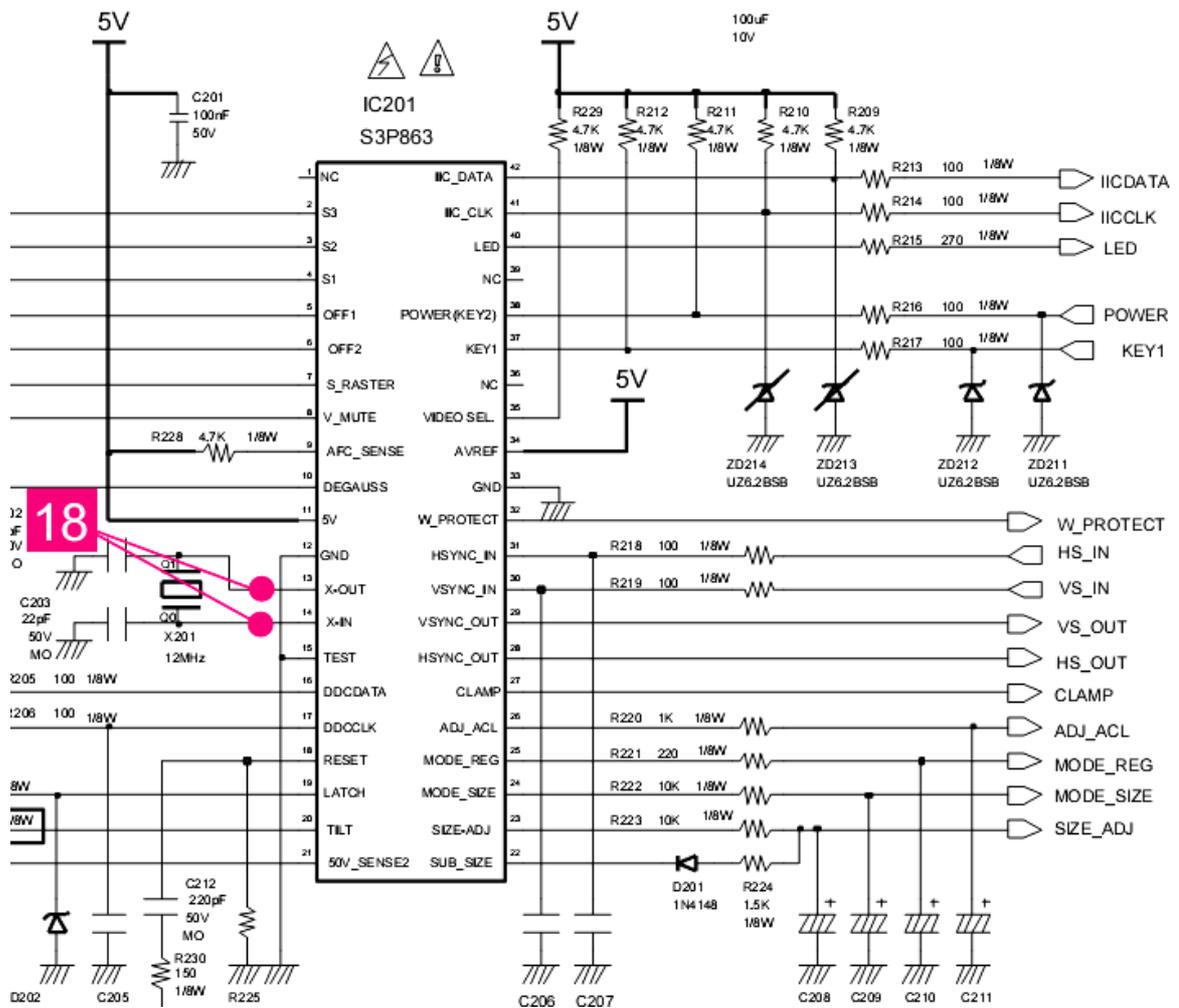


Рис. 13.7. Фрагмент принципиальной схемы монитора Samsung

13.4. Элементы и компоненты ГИС

Одним из основных элементов гибридных ИМС (ГИС) является подложка из стеклокерамического материала. Форма всегда прямоугольная. К подложке предъявляются высокие требования по чистоте обработки поверхности, по химической стойкости и электрической прочности.

Контактные площадки и соединительные проводники. Контактные площадки предназначены для обеспечения электрического контакта между пленочными элементами и соединительными проводниками, а также между пленочными и навесными элементами. Контактные площадки чаще всего изготавливаются из алюминия, потом медь, реже серебро, золото. Для улучшения адгезии (прилипания) между проводником (контактной площадкой) и подложкой их напыляют на подслое из никеля (рис. 13.8).

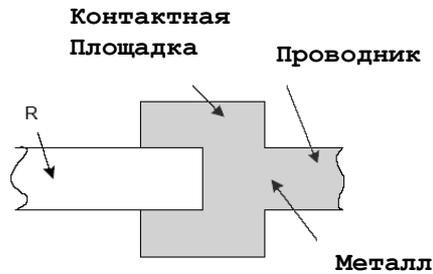


Рис. 13.8. Изготовление контактной площадки

Резисторы. Пленочные резисторы имеют прямоугольную форму (рис. 13.9).

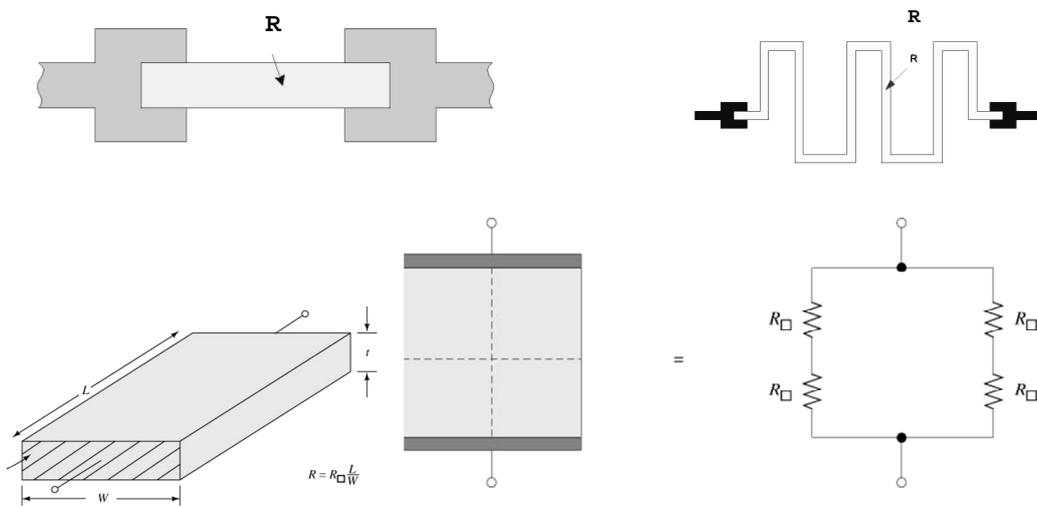


Рис. 13.9. Топология и расчет пленочных резисторов

При необходимости получить большую величину сопротивления допускается их изготавливать в виде меандра. Материалами для изготовления резисторов служат никель, нихром, металлокерамика.

Пленочные конденсаторы представляют собой пленочную трехслойную структуру, между пластинами наносится диэлектрическая пленка. Для обкладок применяют алюминий, медь, реже серебро, золото. В виде диэлектрика наносится окись кремния (SiO_2 ; SiO), моноокись германия (GeO), окись тантала (Ta_2O_5). Не рекомендуется, но допускается для получения больших емкостей напылять многослойные конденсаторы. В большинстве случаев *пленочный конденсатор* представляет собой трехслойную структуру (рис. 13.10), состоящую из нижней (проводящей) обкладки 1, диэлектрической пленки 2 и верхней проводящей обкладки 3. В качестве обкладок тонкопленочного конденсатора используется алюминий, в качестве диэлектрика – монооксид германия или кремния, диоксид кремния, оксид тантала и др. В толстопленочных конденсаторах для создания обкладок используется проводящая паста, а для диэлектрика – диэлектрическая паста. Емкость пленочного конденсатора рассчитывается по известной формуле:

$$C = 0,885 \frac{\varepsilon S}{d} = C_0 S,$$

где S – площадь взаимного перекрытия обкладок, см; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; d – толщина диэлектрика, см; $C_0 = 0,0885 \varepsilon/d$ – удельная емкость, пФ/см.

Диэлектрическая проницаемость применяемых материалов лежит в пределах от 3 до 25.



Рис. 13.10. Конструкция пленочного конденсатора

Катушки индуктивности. Очень редко применяются пленочные катушки индуктивности (рис. 13.11).

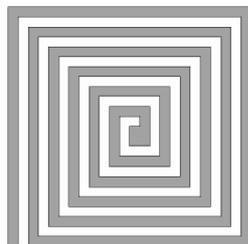


Рис. 13.11. Пленочная катушка индуктивности

Навесные элементы – диоды и транзисторы могут быть с гибкими или жесткими выводами. Применение навесных элементов с жесткими выводами затрудняет процесс проектирования интегральных микросхем. Но жесткие выводы позволяют автоматизировать процесс сборки.

13.5. Элементы и компоненты полупроводниковых ИМС

Основой полупроводниковой ИМС является подложка из кремния обычно р-типа проводимости. В основе изготовления полупроводниковых ИМС лежит диффузионно-планарная или эпитаксильно-планарная технология. Оба эти метода предусматривают создание внутри полупроводника (т.е. в подложке) участков с чередующимися слоями р- и n-типа проводимости (рис. 13.12).

В качестве сопротивлений в полупроводниковых ИМС используют объемное сопротивление полупроводниковой области. Поскольку параметрами диффузионных слоев – толщиной слоя, концентрацией и распределением примеси – задаются требования к транзисторным структурам, то необходимое сопротивление резистивного элемента может быть получено лишь путем выбора типа слоя, его ширины и длины. Эмиттерный слой, имеющий более высокую концентрацию примесей, используют для получения резисторов с малым сопротивлением (от 2 до 30 Ом), а базовый слой – с большим сопротивлением (от 100 Ом до 20 кОм). Отклонение сопротивления от номинального достигает 20 %, предельная частота – 100 МГц, максимальное рабочее напряжение – 5 и 20 В соответственно для эмиттерного и базового слоев.

В полупроводниковых схемах обычно применяют диффузионные резисторы, но если требуемое номинальное сопротивление на их основе не может быть реализовано, то в качестве резистивного элемента используют проводящие дорожки из пленки высокоомного металла, напыленные, как и межсоединения, на изолирующий слой двуокиси кремния, покрывающий поверхность кристалла. Эти резисторы называют пленочными.

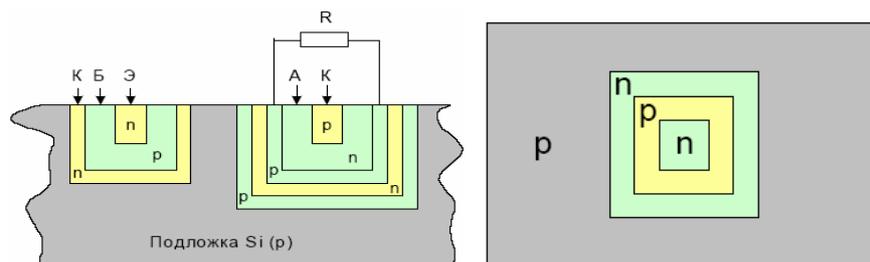


Рис. 13.12. Конструкции транзисторов, диодов и сопротивлений в полупроводниковой микросхеме

В качестве резисторов в полупроводниковых микросхемах используется также канал МДП-транзистора. Сопротивление при этом может регулироваться с помощью напряжения, подаваемого на затвор.

В качестве емкости в полупроводниковых ИМС используют емкость обратносмещенного коллекторного p-n-перехода (емкость до 100 пФ).

Биполярные транзисторы

Главное отличие биполярных транзисторов связано с их планарной конфигурацией областей внутри ИМС, из-за чего возрастает сопротивление транзистора в режиме насыщения (R_k – десятки – сотни ом). Это недостаток по сравнению с дискретными транзисторами, у которых сопротивление не превышает десятков Ом. Устранения этого недостатка добились введением под область коллектора слоя n^+ . В некоторых случаях для повышения быстродействия и снижения времени рассасывания неосновных носителей параллельно коллекторному переходу включают диод на основе контакта металл – полупроводник. Для устранения эффекта выпрямления под металлизированные области электродов вводят дополнительные легирующие примеси, создавая низкоомные области.

Транзистор с переходом Шоттки

По конструкции это обычный эпитаксиально-планарный транзистор, у которого металлический электрод базы расширен и захватывает коллекторную область, что не требует усложнения в изготовлении (рис. 13.13). Образовавшийся в месте контакта выпрямляющий контакт (переход Шоттки) оказывается включенным параллельно коллекторному переходу в том же направлении. В режимах отсечки и активном режиме, когда потенциал коллекторной области больше базовой, переход Шоттки закрыт и не влияет на работу транзистора. Когда транзистор переходит в режим насыщения, потенциал коллектора становится меньше базового и переход Шоттки открывается раньше ($U_{нас.}$ коллекторного перехода 0,6 – 0,8 вольта, а переход Шоттки открывается примерно при 0,4 вольта), и избыток заряда из базы перетекает в коллектор, не накапливаясь в ней, снижая время, необходимое на рассасывание, при переключении в закрытое состояние.

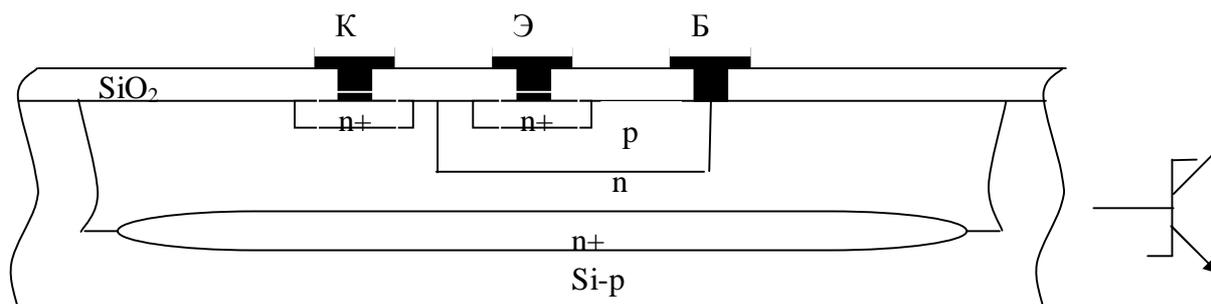


Рис. 13.13. Транзистор с переходом Шоттки и его УГО

Полупроводниковые диоды

Для упрощения технологического цикла диоды изготавливают на основе транзисторных структур. На рис. 13.14 представлены интегральные полупроводниковые диоды (схема соединения). Для быстродействующих диодов используется эмиттерный переход при соединенном с базой коллекторе (см. рис. 13.14, а); для диодов, которые должны иметь большое пробивное напряжение, используется коллекторный переход, а эмиттер соединяется с базой (см. рис. 13.14, б). Во втором случае скорость переключения получается в десятки раз ниже из-за большого неравновесного заряда, накапливающегося не только в области базы, но и в области коллектора, а также из-за большей емкости перехода.

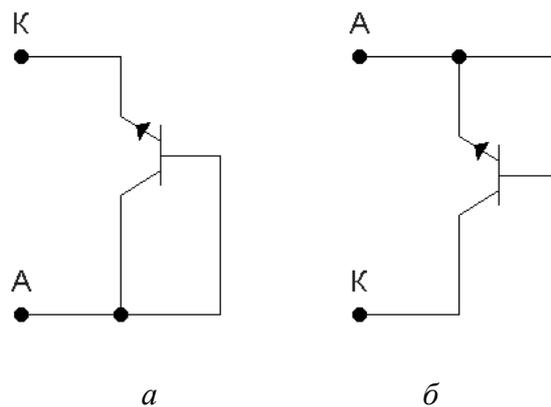


Рис. 13.14. Использование транзисторов в диодном режиме

МДП-транзисторы

Наибольшее распространение получили транзисторы со встроенным каналом. Эти приборы не нужно специально изолировать от тела кристалла, так как у них область «сток – канал – исток» изолирована от тела кристалла электронно-дырочным переходом, образующимся вдоль линии, отделяющей область p тела кристалла от области $n+$ истока, области n канала и области $n+$ стока, переход имеет обратное смещение в рабочем режиме. Площадь, занимаемая на подложке МДП-структурой, оказывается при этом в сотни раз меньше, чем у биполярных структур, что позволяет получить значительно большую плотность размещения элементов на подложке.

Интегральные МДП-транзисторы имеют следующие параметры: ток стока – порядка 10 мА, напряжение стока – до 30 В, входное сопротивление – десятки мегаом, предельная частота – сотни мегагерц. Таким образом, интегральные МДП-транзисторы – сравнительно низкочастотные элементы, что обуславливается большими межэлектродными емкостями.

Следует отметить, что n -канальные транзисторы обладают большим быстродействием, а p -канальные более технологичны.

Многоэмиттерные транзисторы

Многоэмиттерные транзисторы (МЭТ) составляют основу цифровых ИМС транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Имея общий коллектор и базу, МЭТ содержат до 8 эмиттеров. Структура МЭТ и его топология показаны на рис. 13.15, сечения – на рис. 13.16. Особенность работы МЭТ состоит в том, что в любом состоянии схемы коллекторный переход всегда открыт, а эмиттерные переходы могут быть либо открытыми, либо закрытыми.

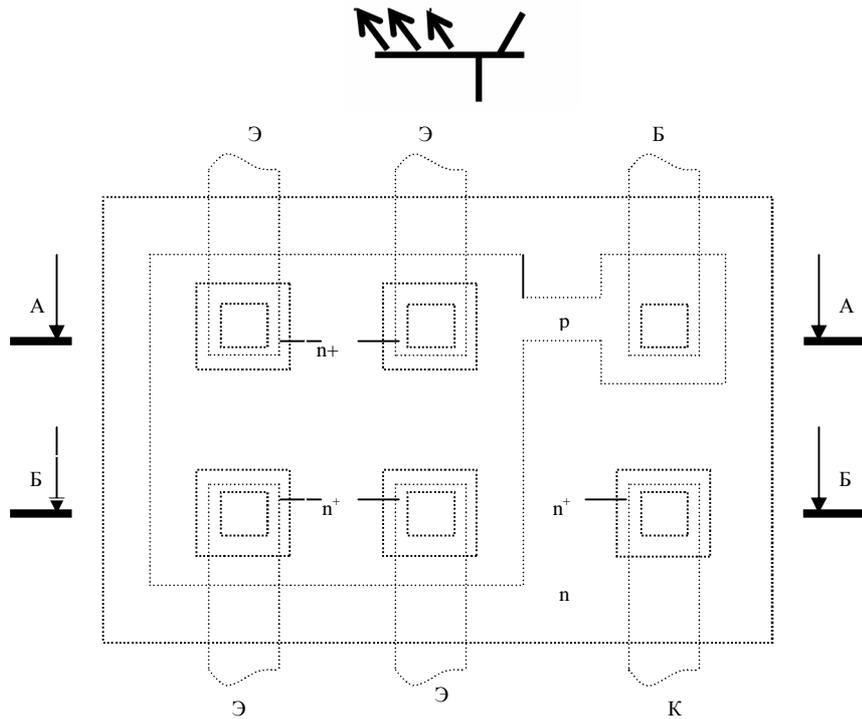


Рис. 13.15. УГО и топология многоэмиттерно транзистора

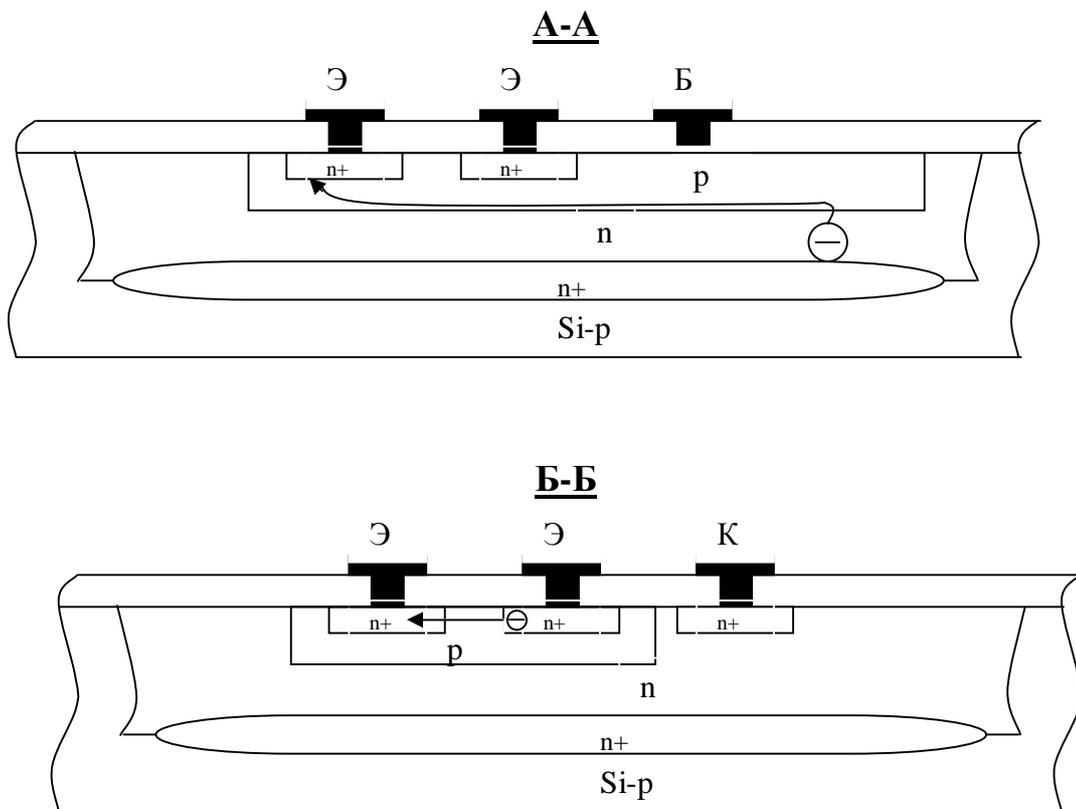


Рис. 13.16. Сечения многоэмиттерного транзистора

Многоколлекторные транзисторы

Многоколлекторные транзисторы (МКТ) находят применение в схемах инжекционной логики. Структура такого транзистора показана на рис. 13.17. Она мало чем отличается от структуры МЭТ. Практически МКТ – это МЭТ, работающий в инверсном режиме. Общим эмиттером в этой структуре является эпитаксиальный n-слой, а коллекторами – n⁺-области. Такая структура не позволяет получить достаточно высокий коэффициент передачи тока эмиттера ввиду низкой эффективности эмиттера.

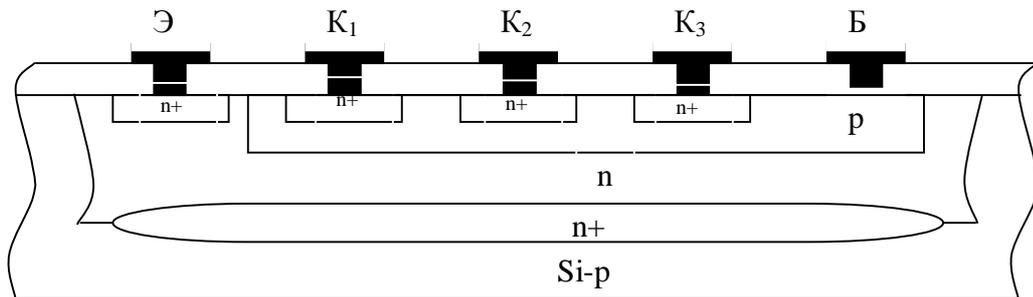


Рис. 13.17. Топология многоколлекторного транзистора

Транзисторы с инжекционным питанием

Транзисторы с инжекционным питанием являются основой для построения схем инжекционной логики. Структурно (рис. 13.18, а) они представляют собой интегрированную комбинацию горизонтального транзистора p-n-p и вертикального транзистора n-p-n. При этом база транзистора p-n-p одновременно является эмиттером транзистора n-p-n, а коллектор транзистора p-n-p является базой транзистора n-p-n. Эмиттер транзистора p-n-p называется инжектором. На инжектор через резистор подается прямое напряжение (см. рис. 13.18, б), в результате чего эмиттерный переход транзистора p-n-p открывается и происходит инжекция дырок в его базу. Диффундируя через базу, дырки попадают в коллектор транзистора p-n-p, являющийся одновременно базой транзистора n-p-n. Если базовый вывод транзистора n-p-n соединен с подложкой, то дырки в его базе не накапливаются и оба перехода транзистора находятся в закрытом состоянии. Если же вывод базы не соединен с подложкой, то происходит накопление дырок в базовой области n-p-n-транзистора, то есть имеет место инжекция носителей заряда, отсюда и название «инжекционное питание». В результате инжекции происходит компенсация отрицательных зарядов акцепторов в эмиттерном и коллекторном переходах n-p-n-транзистора, в результате че-

го оба перехода открываются и транзистор переходит в режим насыщения. Таким образом, вертикальный транзистор n-p-n выполняет функции электронного ключа.

В схеме инжекционной логики транзистор p-n-p делают многоколлекторным, что позволяет питать от одного горизонтального p-n-p-транзистора несколько вертикальных n-p-n-транзисторов. Вертикальный транзистор n-p-n также делают многоколлекторным, что позволяет одновременно замыкать и размыкать несколько электрических цепей.

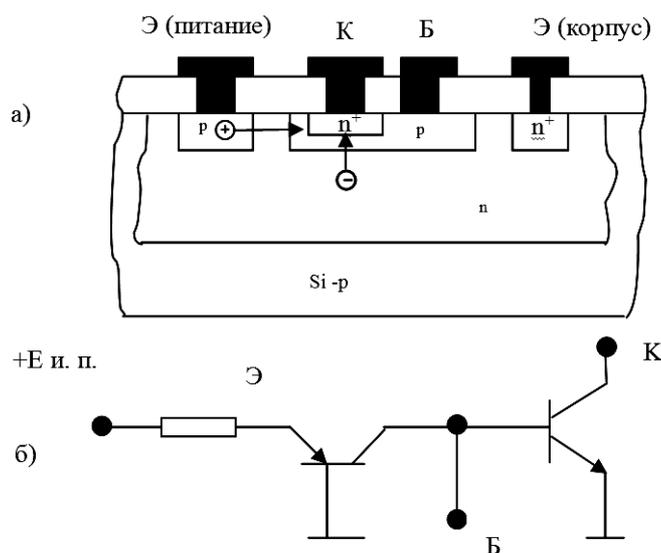


Рис. 13.18. Топология (а) и схема транзистора (б) с инжекционным питанием

Технология изготовления ИМС

Технологический процесс изготовления ИМС представляет собой последовательный ряд базовых технологических операций. Особенностью этого процесса является интегрально-групповой метод производства, при котором на общей подложке одновременно создается большое количество одинаковых интегральных микросхем. При этом технологической обработке подвергается сразу несколько подложек.

Полупроводниковые интегральные микросхемы получили наибольшее распространение. У них все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

Для изготовления полупроводниковых микросхем используются кремниевые монокристаллические пластины диаметром 30 – 60 мм с толщиной 0,25 – 0,4 мм. Элементы (микросхемы) – биполярные и полевые транзисторы, диоды, резисторы и конденсаторы – формируют в полупроводниковой пластине методами, известными из технологии дискретных

полупроводниковых приборов (селективная диффузия, эпитаксия и др.), но получившими в интегральной технологии дальнейшее развитие. Межсоединения выполняют путем напыления узких проводящих дорожек алюминия на окисленную (т.е. электрически изолированную) поверхность кремния, имеющую окна в пленке окисла в тех местах, где должен осуществляться контакт дорожек с кремнием (в области эмиттера, базы, коллектора транзисторов и т.д.). Для соединения элементов с выводами микросхемы на проводящих дорожках создаются расширенные участки – контактные площадки. Методом напыления иногда изготавливают также резисторы и конденсаторы.

Изготовление полупроводниковых микросхем осуществляется групповым методом, при котором на одной пластине одновременно создается большое число (до 30 – 500) одинаковых функциональных структур (набор элементов и межсоединений). Одновременной обработке подвергается до 20 пластин. После выполнения всех операций по формированию элементов и межсоединений пластину разрезают на части, называемые кристаллами (интегральной микросхемы). Каждый кристалл содержит одну функциональную структуру. Его закрепляют на основании корпуса: контактные площадки кристалла соединяют с траверсами (выводами) корпуса с помощью тонких проводников, на основание надевается крышка корпуса, корпус герметизируют для обеспечения защиты микросхемы от воздействия окружающей среды.

Рассмотрим теперь некоторые особенности элементов полупроводниковых микросхем, обусловленные необходимостью изоляции элементов от тела кристалла, обладающего заметной электрической проводимостью. Изоляция элементов осуществляется либо с помощью дополнительного электронно-дырочного перехода, находящегося под напряжением обратного смещения, либо с помощью тонкого слоя диэлектрика, например, двуокиси кремния. Первый способ сравнительно прост и дешев и поэтому является наиболее распространенным, но при этом токи утечки на тело кристалла оказываются не менее 10 нА, а емкость элемента по отношению к телу кристалла не менее 2 пФ. Второй способ более сложен и дорог, но обеспечивает снижение тока утечки в тысячи раз, а емкости – в десятки раз.

После того как процесс формирования микросхем на общей подложке завершен, производят проверку работоспособности каждой ИМС. Контроль осуществляется с помощью механических зондов – тонких игл, которые контактируют с контактными площадками микросхем. Негодные ИМС отбраковываются.

После контроля общую подложку разрезают на отдельные части, каждая из которых содержит одну микросхему. В полупроводниковой технологии эти части называют кристаллами, а в гибридной – платами. Кристаллы (или платы) устанавливают в корпус, периферийные контакты кристалла (платы) соединяют с внешними выводами корпуса, корпус герметизируют, маркируют и упаковывают в тару. Для каждого конструктивно-технологического типа ИМС разрабатывается свой технологический процесс.

Миниатюризация

Идеи и принципы пропорциональной микроминиатюризации позволяют использовать масштабирование МДП-транзисторов (как наиболее компактных) при разработке интегральных схем на их основе. Такой подход позволил фирме Intel модернизировать процессоры персональных компьютеров каждые три – четыре года. В табл. 13.4 приведены этапы пропорциональной микроминиатюризации процессоров Intel за последние тридцать лет.

На рис. 13.19 показана в полулогарифмическом масштабе эволюция размеров МДП-транзистора и длины его канала. Обращает внимание на себя тот факт, что принципы пропорциональной микроминиатюризации позволили вплотную придвинуться к размерам базового элемента интегральных схем, ниже которых находится предел, обусловленный физическими ограничениями.

Опыт разработки МДП-транзисторов с длинами канала 0,25 – 0,1 мкм показывает, что в таких приборах резко нарастает количество новых физических явлений, в том числе и квантовых. Принцип пропорциональной микроминиатюризации при этих значениях линейных размеров уже перестает работать.

Таблица 13.4

Микроминиатюризация процессоров Intel

Модель	Год выпуска	Транзисторы	Тех. процесс	Тактовая частота
4004	1971	2 250	10 мкм	108 КГц
8008	1972	2 500	10 мкм	200 КГц
8080	1974	5 000	6 мкм	2 МГц
8086	1978	29 000	3 мкм	5 – 10 МГц
286	1982	120 000	1,5 мкм	6 – 12,5 МГц
386	1985	275 000	1,5 – 1 мкм	16 – 33 МГц
486DX	1989	1 180 000	1 – 0,6 мкм	25 – 100 МГц
Pentium	1993	3 100 000	0,8 – 0,35 мкм	60 – 200 МГц
Pentium II	1997	7 500 000	0,35 – 0,25 мкм	233 – 450 МГц
Pentium III	1999	24 000 000	0,25 – 0,13 мкм	450 – 1300 МГц
Pentium 4	2000	42 000 000	0,18 – 0,13 мкм	> 1400 МГц

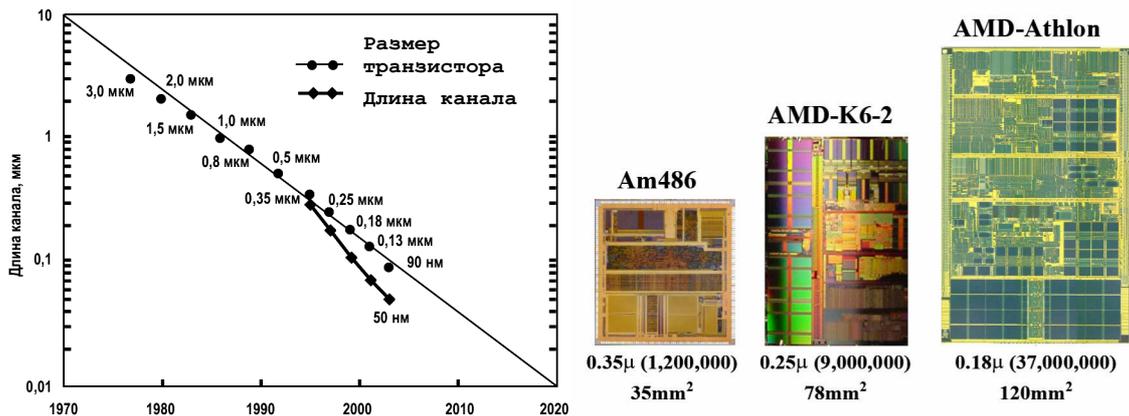


Рис. 13.19. Эволюция размеров длины канала МДП-транзистора (слева) и размеры (количество транзисторов) в зависимости от степени совершенства технологического процесса в микропроцессорах AMD (справа)

Физические явления, ограничивающие микроминиатюризацию

Анализ показывает, что наряду с тенденцией уменьшения геометрических размеров каждого элемента в схемах проявляется тенденция к увеличению числа элементов в схеме. Если в начале 1960-х годов число элементов в схеме составляло десятки, то в начале 2000-х годов число элементов в схеме составляло сотни миллионов. Обращает на себя внимание тот факт, что в настоящее время плотность упаковки приближается к пределу, обусловленному физическими ограничениями.

Проблемы, связанные с физическими ограничениями микроминиатюризации, требуют рассмотрения основных физических явлений, которые запрещают дальнейшее уменьшение линейных геометрических размеров транзисторов, напряжений и токов транзистора, ограничивают его быстродействие и плотность упаковки. В табл. 13.5 перечислены предельно допустимые значения параметров и основные физические ограничения.

Таблица 13.5

Физические ограничения микроминиатюризации

Величина параметра	Физическое ограничение
1	2
Минимальная величина одного элемента (30x30 нм)	Статистические флуктуации легирования подложки, разрешение фоторезиста, космические лучи и радиоактивность, конечная ширина p-n перехода
Минимальная толщина подзатворного изолятора (50 Å)	Тоннельные токи через подзатворный диэлектрик из затвора в канал
Минимальное напряжение питания (0,025 В)	Тепловой потенциал kT/q

Минимальная плотность тока (10^{-6} А/см ²)	Дискретность заряда электрона, флуктуации встроенного заряда
Минимальная мощность (10^{-12} Вт/элемент при $f = 1$ кГц)	Шумы, тепловая энергия, диэлектрическая постоянная
Предельное быстродействие (0,03 нс)	Скорость света
Максимальное напряжение питания	Пробой подзатворного диэлектрика, смыкание областей истока и стока
Максимальное легирование подложки	Туннельный пробой р-п-перехода стока
Максимальная плотность тока	Электромиграция, падение напряжения на паразитных сопротивлениях контактов
Максимальная мощность	Теплопроводность подложки и компонентов схемы
Количество элементов на кристалл (10^8)	Совокупность всех ранее перечисленных ограничений

13.6. Корпуса ИМС, техническая документация на ИМС

ИМС выпускают в различных видах корпусов:

- DIP. Для монтажа в отверстия плат (объемный монтаж).
- QFP, PLCC, BGA. Для поверхностного монтажа.
- Бескорпусные ИМС – для специальных целей.

Внешний вид и расшифровка аббревиатур приведены в табл. 13.6.

Корпус ИМС должен обеспечить:

- Защиту от внешних воздействий.
- Передачу тепла от кристалла (теплоотвод).
- Надежность присоединения и крепления.

Техническая информация (Datasheet) поставляется производителем и содержит всю техническую информацию по использованию, технологии изготовления и монтажа, проверки, эксплуатации и характеристики ИМС (надежность, рабочая и допустимая температуры и нагрузка). Указываются типы и цоколевка (расположение) выводов в соответствии с внутренней электрической схемой, функциональная схема, рекомендации по использованию. Ниже, на рис 13.20, приведен фрагмент из технической информации микросхемы интегрального стабилизатора фирмы ST.

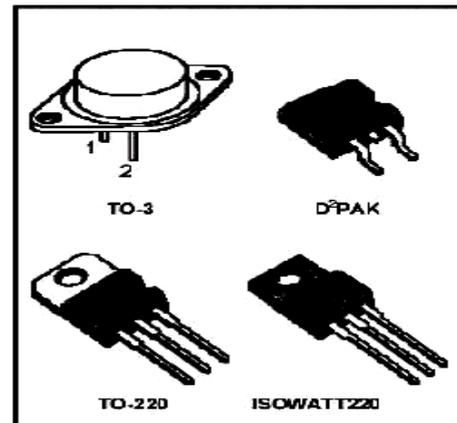
Таблица 13.6

Корпуса ИМС

Аббре-виатура	Расшиф-ровка	Применение	Шаг выво-дов, мм	Внешний вид
DIP	dual inline package	Для монтажа в отверстия плат (объемный монтаж)	1,5 – 1,25	
QFP, PLCC	Quad Flat Pack Plastic Leaded Chip Carrier	Корпус с четырехсторонним расположением выводов Пластмассовый кристаллоноситель с выводами	1,0 – 0,75	
SO, SOIC	Small Outline Small Outline Integrated Circuit	Малогабаритный корпус для поверхностного монтажа	1,25 – 1,0	
BGA	Ball grip Array	Модуль на двойной микроплате с массивом шариковых выводов	1,27 – 1,0	
CSP	Chip Scale Package	Кристалл без корпуса с выводами (покрыт защитной пленкой)	1,0 – 0,5	<p>ИМС повреждена, данный тип исполнения наиболее уязвим при использовании, но наиболее компактен</p>

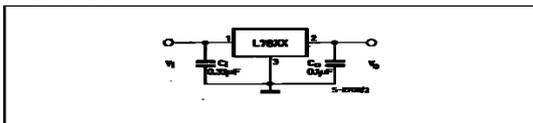
- . OUTPUT CURRENT UP TO 1,5A
- . OUTPUT VOLTAGE OF 3:5,2:6,8:8,5:9: 12,1;
13; 24 V
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION
- . SHORTCIRCUIT PROTECTION
- OUTPUT TRANSITION SOA
PROTECTION DESCRIPTION

The L7800 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220 ISOWATT220 TO-3 and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, terminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

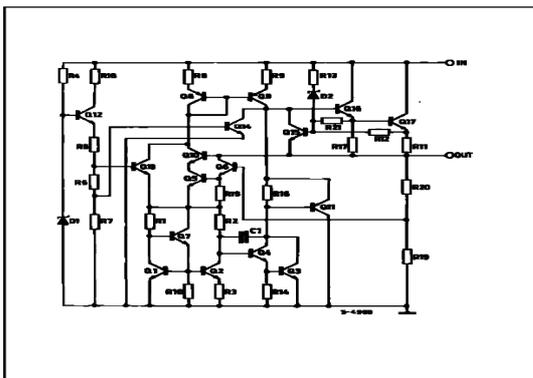


L7800

APPLICATION CIRCUIT



SCHEMATIC DIAGRAM



3/25

BLOCK DIAGRAM

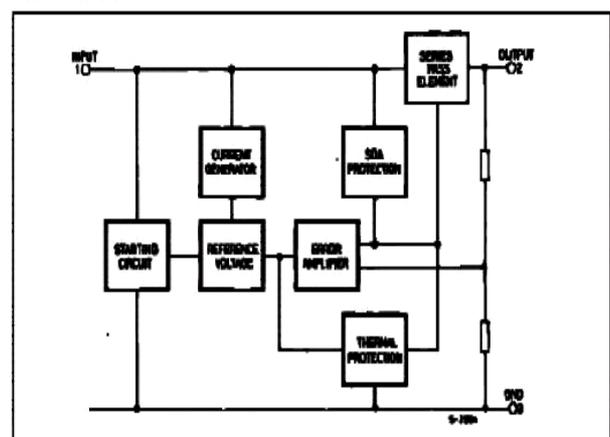


Рис. 13.20. Фрагменты технической информации на ИМС (см. также с. 262)

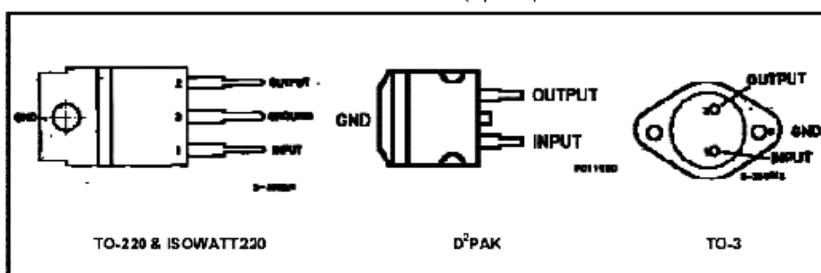
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	V _{ab0}	Unit
V _i	DC Input Voltage (for V _o = 5 to 18V) (for V _o = 20...24V)	35	V
		40	V
I _o	Output Current	Internally limited	
P	Power Dissipation	Internally limited	
T _{op}	Operating Junction Temperature Range (for L7800)	55 to 150	°C
		0 to 150	°C
T _{sig}	Storage Temperature Range	65 to 150	°C

THERMAL DATA

Symbol	Parameter	D ² PAK	TO-220	ISOWATT220	TO-3	Unit
R _{cas}	Thermal Resistance Junction-case Max	6	3	4	4	°C/W
R _{amb}	Thermal Resistance Junction-ambient Max	62.5	50	50	35	°C/W

CONNECTION DIAGRAM AND ORDERING NUMBERS (top view)



Type TO-220	TO-220	D ² PAK(*)	OWATT220	TO-3	Output Voltage
L7805				L7805T	5V
L7805C	L7805CV	L7805CD2T	L7805CP	L7805CT	5V
L7852C	L7852CV	L7852C	L7852CP	L7852CT	5.2V
L7806				L7806T	6V
L7806C	L7806CV	L7806CD2T	L7806CP	L7806CT	6V
L7808				L7808T	8V
L7808C	L7808CV	L7808CD2T	L7808CP	L7808CT	8V
L7885C	L7885CV	L7885CD2T	L7885CP	L7885CT	8.5V
L7809C	L7809CV	L7809CD2T	L7809CP	L7809CT	9V
L7812				L7812T	12V
L7812C	L7812CV	L7812CD2T	L7812CP	L7812CT	12V
L7815				L7815T	15V
L7815C	L7815CV	L7815CD2T	L7815CP	L7815CT	15V
L7818				L7818T	18V
L7818C	L7818CV	L7818CD2T	L7818CP	L7818CT	18V
L7820				L7820T	20V
L7820C	L7820CV	L7820CD2T	L7820CP	L7820CT	20V
L7824				L7824T	24V
L7824C	L7824CV	L7824CD2T	L7824CP	L7824CT	24V

Рис. 13.20. Окончание

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируют интегральные схемы?
2. Приведите параметры ИМС.
3. Что такое серии ИМС?
4. Как маркируются и обозначаются на схемах ИМС?
5. Чем определяется сопротивление пленочного резистора?
6. От чего зависит площадь, занимаемая пленочным конденсатором на подложке гибридной интегральной схемы?
7. Чем отличаются биполярные транзисторы интегральных схем от дискретных транзисторов?
8. Каким образом реализуются диоды в полупроводниковых интегральных схемах и какие особенности при этом необходимо учитывать?
9. Каким образом реализуются резисторы в полупроводниковых интегральных схемах?
10. Каким образом реализуются конденсаторы в полупроводниковых интегральных схемах?
11. Зачем в ИМС изготавливают МЭТ и МКТ?

Тема. 14. Простейшие логические функции и логические элементы

Термины: *система счисления, арифметические и логические операции, алгебра логики, инверсия, дизъюнкция, конъюнкция, элемент Пирса, элемент Шеффера, диодная матрица, транзисторный ключ, логический ноль и логическая единица, помехоустойчивость, работа переключения, время переключения, быстроедействие, комбинационные и последовательные (накопительные) логические элементы.*

14.1. Логические функции и их реализация

14.2. Схемотехника простейших логических элементов

14.3. Характеристики и параметры цифровых ИМС

14.4. Классификация логических устройств

Способ записи чисел цифровыми знаками называется системой счисления. Основанием системы счисления q называется общее количество цифр, используемых в данной позиционной системе для записи чисел. Если принять $q = 10, 2, 8, 16$ и т.д., то будем иметь соответственно десятичную, двоичную, восьмеричную, шестнадцатеричную системы счисления. В табл. 14.1 приведен натуральный ряд чисел в различных системах счисления.

Таблица 14.1

$q = 10$	$q = 8$	$q = 2$	$q = 16$	$q = 10$	$q = 8$	$q = 2$	$q = 16$
0	0	0	0	8	10	1000	8
1	1	1	1	9	11	1001	9
2	2	10	2	10	12	1010	A
3	3	11	3	11	13	1011	B
4	4	100	4	12	14	1100	C
5	5	101	5	13	15	1101	D
6	6	110	6	14	16	1110	E
7	7	111	7	15	17	1111	F
–	–	–	–	16	20	10000	10

Применение двоичной системы счисления в цифровой электронике обеспечивает более высокую скорость выполнения операций и более высокую надежность электронной аппаратуры, т.к. элементной базой для ее построения служат элементы с двумя устойчивыми состояниями. В ряде случаев в цифровой технике применяются двоично-десятичные коды. Для

преобразования чисел из десятичной системы в двоично-десятичные коды необходимо каждую цифру в числе заменить соответствующей тетрадой (эквивалентом), а именно:

0 – 0000; 1 – 0001; 2 – 0010; 3 – 0011; 4 – 0100;
5 – 0101; 6 – 0110; 7 – 0111; 8 – 1000; 9 – 1001.

Например:

$$2934,5_{(10)} > 0010.1001.0011.0100,0101_{(2-10)}$$

Над числами в двоичной системе счисления выполняются арифметические и логические операции. К арифметическим относятся четыре операции: сложение, вычитание, умножение и деление. Алгоритм выполнения арифметических операций такой же, как и в десятичной системе счисления. Помимо арифметических операций существуют логические операции, которые относятся к поразрядным (операции выполняются внутри каждого разряда без переносов и заемов).

Логические операции. Для описания алгоритмов работы цифровых устройств разработан соответствующий математический аппарат, который получил название булевой алгебры или алгебры логики. Алгебра логики занимается изучением логических операций и оперирует двумя понятиями: высказывание истинно или ложно. При этом истинное высказывание принимается за логическую единицу, а ложное – за логический ноль. В алгебре логики высказывания могут быть простыми и сложными. Высказывание, значение истинности которого не зависит от значения истинности других высказываний, называется простым. При анализе и синтезе логических схем простое высказывание рассматривается как независимая переменная x , принимающая два значения: «0» или «1». Сложное высказывание зависит от простых высказываний и также может принимать два значения: «0» или «1». Зависимость сложного высказывания от простых носит название логической или переключательной функции y .

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_n).$$

14.1. Логические функции и их реализация

1. Логическое отрицание (или инверсия). Записывается эта функция так: $y = \bar{x}$. Данная функция реализуется логическим элементом, который называется инвертором или элементом НЕ (рис. 14.1).

Каждый логический элемент характеризуется таблицей состояний на входе и выходе, которую называют *таблицей истинности*. Таблица истинности для элемента НЕ изображена на рис. 14.2.

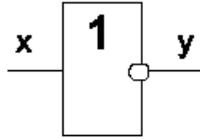


Рис. 14.1. УГО инвертора

x	y
0	1
1	0

Рис. 14.2. Таблица истинности элемента НЕ

2. Вторая логическая функция называется дизъюнкцией, или логическим сложением. $y = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n$. Элемент, реализующий функцию дизъюнкции, называется ИЛИ (рис. 14.3, 14.4).

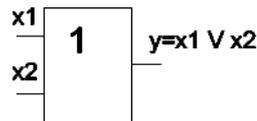


Рис. 14.3. УГО элемента 2ИЛИ

x1	x2	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Рис. 14.4. Таблица истинности элемента 2ИЛИ

Конъюнкция, или логическое умножение. Элемент, реализующий функцию конъюнкции, называется И (рис. 14.5, 14.6). $y = x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n$.

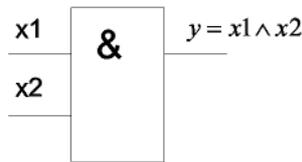


Рис. 14.5. УГО элемента 2И

x1	x2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Рис. 14.6. Таблица истинности элемента 2И

Элементы НЕ, ИЛИ, И представляют собой функционально полный набор логических элементов. Только при помощи этих элементов можно выполнить любую сколь угодно сложную функцию.

3. Элемент Пирса. Этот элемент, реализующий функцию отрицания дизъюнкции, называется ИЛИ-НЕ (рис. 14.7, 14.8). $y = \overline{x_1 \vee x_2}$.

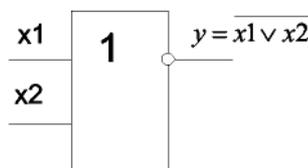


Рис. 14.7. УГО элемента 2ИЛИ-НЕ

x1	x2	y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Рис. 14.8. Таблица истинности элемента 2ИЛИ-НЕ

4. Элемент Шеффера. Этот элемент, реализующий функцию отрицания конъюнкции, называется И-НЕ (рис. 14.9, 14.10). $y = \overline{x_1 \wedge x_2}$.

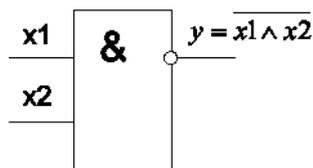


Рис. 14.9. УГО элемента 2И-НЕ

x1	x2	y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Рис. 14.10. Таблица истинности элемента 2И-НЕ

5. Исключающее ИЛИ – это элемент ИЛИ, который исключает два одинаковых состояния на входе (рис. 14.11, 14.12).

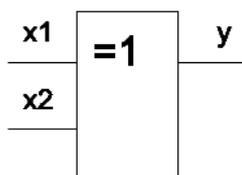


Рис. 14.11. УГО двухвходового элемента исключающего ИЛИ

x1	x2	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Рис. 14.12. Таблица истинности двухвходового элемента исключающего ИЛИ

Маркировка логических элементов. Вторая и третья группы в обозначении цифровых ИМС показывают, какой логический элемент перед нами. Например:

НЕ	ЛН
ИЛИ	ЛЛ
И	ЛИ
ИЛИ-НЕ	ЛЕ
И-НЕ	ЛА
=1	ЛП

Рис. 14.13. Варианты маркировки логических элементов

Следует заметить, что отдельные логические элементы в интегральном исполнении в настоящее время не выпускаются по причине нецелесообразности.

14.2. Схемотехника простейших логических элементов

1. Элемент НЕ (рис. 14.14, 14.15). В общем случае представляет транзисторный ключ на полевом или биполярном транзисторе.

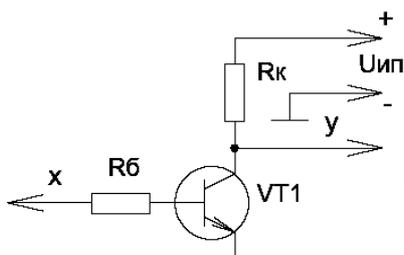


Рис. 14.14. Транзисторный ключ и его УГО

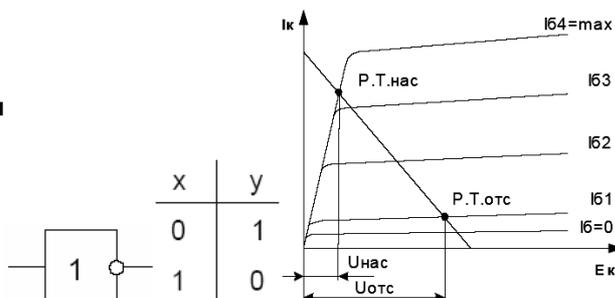
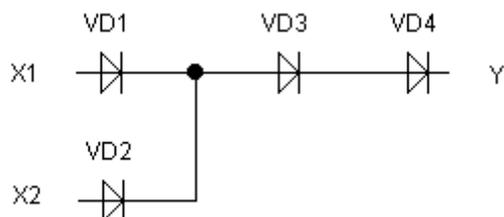


Рис. 14.15. Выходная характеристика ключа

2. Элемент ИЛИ. В простейшем случае реализуется на полупроводниковых диодах (рис. 14.16). Таблица истинности – рис. 14.17. Необходимым условием для работы является:

- 1) $U_{вх}^1 > U_{ин}$;
- 2) $R \gg R_{i.нр.}$.



X1	X2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Рис. 14.16. Реализация ИЛИ на диодах

Рис. 14.17. Таблица истинности

3. Схема И (рис. 14.18). Элементы И-НЕ и ИЛИ-НЕ реализуются подключением на выход диодной матрицы транзисторного инвертора. $R \gg R_{нр.}$.

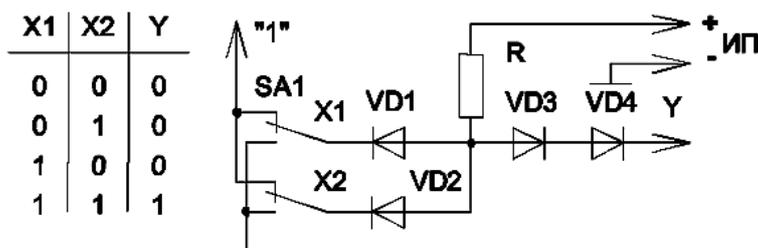


Рис. 14.18. Реализация И на диодах

4. Исключающее ИЛИ (рис. 14.19)

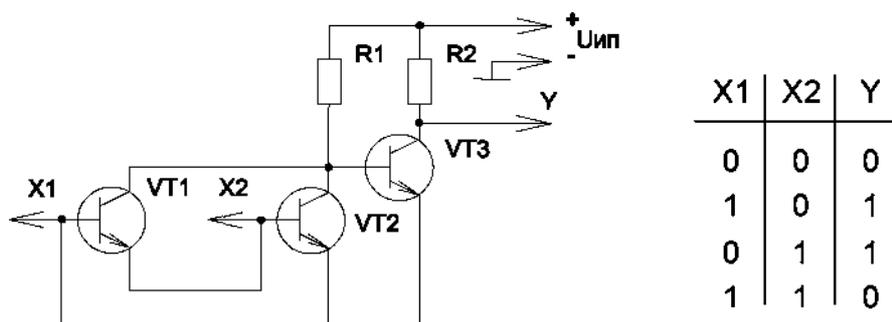


Рис. 14.19. Схема и таблица истинности исключающее ИЛИ

База каждого из входных транзисторов VT1, VT2 соединена с эмиттером другого транзистора. На транзисторе VT3 собран инвертор, или транзисторный ключ.

14.3. Характеристики и параметры цифровых ИМС

Логические и схемотехнические возможности базовых функциональных элементов определяются совокупностью электрических и функциональных параметров, которые являются основными для микросхем.

Основные параметры цифровых ИМС определяют допустимые сочетания схем в устройстве и в обобщенном виде характеризуют их работоспособность в сложных устройствах. Основные параметры цифровых ИМС, число которых одинаково для всех типов микросхем, определяются по измеряемым электрическим параметрам (входным и выходным токам и напряжениям), число которых зависит от типа микросхемы. Поэтому основные параметры являются общими для всех существующих и возможных логических ИМС и позволяют сравнивать между собой микросхемы различных типов.

К характеристикам цифровых ИМС относятся:

- Входные характеристики (рис. 14.20) – это зависимость входного тока $I_{вх}$ ИМС от величины входного напряжения. $I_{вх..} = f(U_{вх..})$.

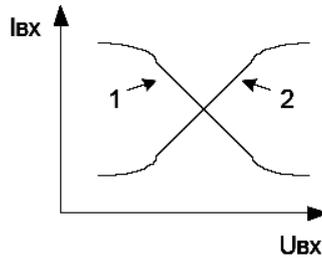


Рис. 14.20. Входные характеристики

Кривая 1 – для ИМС, у которых входной ток максимален при логическом нуле на входе. Кривая 2 – это характеристика ИМС, у которых входной ток максимален при логической единице на входе.

- Передаточные характеристики. Это зависимость выходного напряжения ИМС от входного (рис. 14.21).

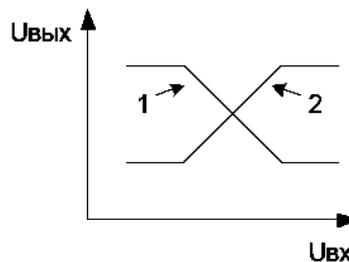


Рис. 14.21. Передаточные характеристики

Кривая 1 – для ИМС с инверсией.

Кривая 2 – для ИМС без инверсии.

Параметры ИМС

Параметры ИМС подразделяются на две группы – статические и динамические.

1. Статические параметры характеризуют работу ИМС при статических 0 или 1 на входе и выходе.

К статическим параметрам относятся:

1. Напряжение источника питания $U_{ин}$.

2. Входные и выходные напряжения логического нуля и логической единицы: $U_{вх. 0}$, $U_{вх. 1}$, $U_{вых. 0}$, $U_{вых. 1}$.

3. Входные и выходные токи логического нуля и логической единицы: $I_{вх. 0}$, $I_{вх. 1}$, $I_{вых. 0}$, $I_{вых. 1}$.

4. Коэффициент разветвления K_p (иногда обозначается n) показывает количество входов микросхем нагрузок, которые можно подключить к данной микросхеме без потери ее работоспособности (характеризует нагрузочную способность ИМС). Однако увеличение n , т.е. увеличение числа нагрузок, ухудшает помехоустойчивость и быстродействие.

5. Нагрузочная способность ИС в значительной степени определяется типом применяемого в них инвертора. Для простейшего инвертора, состоящего из одного транзистора, $n = 2...4$, для сложных $n = 10...20$.

В схемах на основе МДП-транзисторов входы последующих схем в статическом режиме практически не нагружают выходов предыдущих. Это дает возможность иметь очень большой коэффициент разветвления по выходу. Однако в динамическом режиме емкости присоединенных входов замедляют переходной процесс и увеличивают ток, потребляемый данной схемой.

6. Коэффициент объединения по входу $K_{об}$ (иногда обозначают m) – это максимальное число входов, которое может иметь логический элемент. С его увеличением расширяются логические возможности микросхемы за счет выполнения более сложных функций на одном типовом элементе. Увеличение коэффициента объединения по входу ухудшает другие параметры микросхемы: быстродействие, помехоустойчивость, нагрузочную способность. Чаще всего он не превышает 8, что определяется ограниченным числом выводов ИС. Для увеличения m в ИМС вводят специальную схему (логический расширитель), подключение которой к основному элементу позволяет увеличить его до 10 и более.

7. Помехоустойчивость $U_{n \max}$ – наибольшее значение напряжения на входе микросхемы, при котором еще не происходит изменение уровней выходного напряжения. Помехоустойчивость определяет работоспособность логического элемента при наличии различных помех, действующих на входе ИМС наряду с полезным сигналом. Помехи могут как возникать в самих логических схемах, так и наводиться от посторонних устройств.

Помехи бывают статические и динамические. Под статическими понимают помехи, длительность которых значительно превосходит длительность переходных процессов в логических элементах. К импульсным (динамическим) помехам относятся коротковременные импульсы, длительность которых соизмерима с длительностью переходных процессов в логических элементах.

Статическая помехоустойчивость – это наименьшее постоянное напряжение, которое, будучи добавлено (при самом неблагоприятном сочетании обстоятельств) к полезному входному сигналу, смещает рабочую точку на передаточной характеристике в область переключения, что вызывает ложное срабатывание по всей последующей цепи логических схем. Логическая ИМС в статическом режиме может находиться в одном из двух состояний – открытом или закрытом. Поэтому различают помехоустойчивости закрытой схемы по отношению к отпирающим помехам и открытой схемы по отношению к запирающим.

Обычно используют безразмерный коэффициент статической помехоустойчивости

$$K_{ст.} = \frac{U_{ном.}}{U_{лог.}},$$

где $U_{лог.}$ – логическая разность напряжений (рис 14.22, а).

Причиной появления статических помех в большинстве случаев является падение напряжения на проводниках, соединяющих микросхемы в устройстве. Наиболее опасные помехи возникают в шинах питания. Для исключения подобных ситуаций необходимо внимательно относиться к расположению проводников, подводящих напряжения питания, увеличивать по возможности их сечение.

По статической помехоустойчивости логические элементы условно можно разделить на элементы:

с низкой помехоустойчивостью, $U_{П ст.} = 0,2...0,4$ В;

со средней помехоустойчивостью, $U_{П ст.} = 0,4...0,8$ В;

с высокой помехоустойчивостью, $U_{П ст.} > 0,8$ В.

Импульсная помехоустойчивость всегда выше статической. Это вызвано тем, что при коротком импульсе помех паразитные емкости в логическом элементе не успевают перезарядиться до пороговых уровней переключения ИМС. Поэтому при одинаковой статической помехоустойчивости схемы с меньшим временем задержки сильнее подвержены действию импульсных помех.

Допустимая амплитуда помехи зависит от ее длительности. Эта зависимость называется характеристикой импульсной помехоустойчивости (см. рис. 14.22, б).

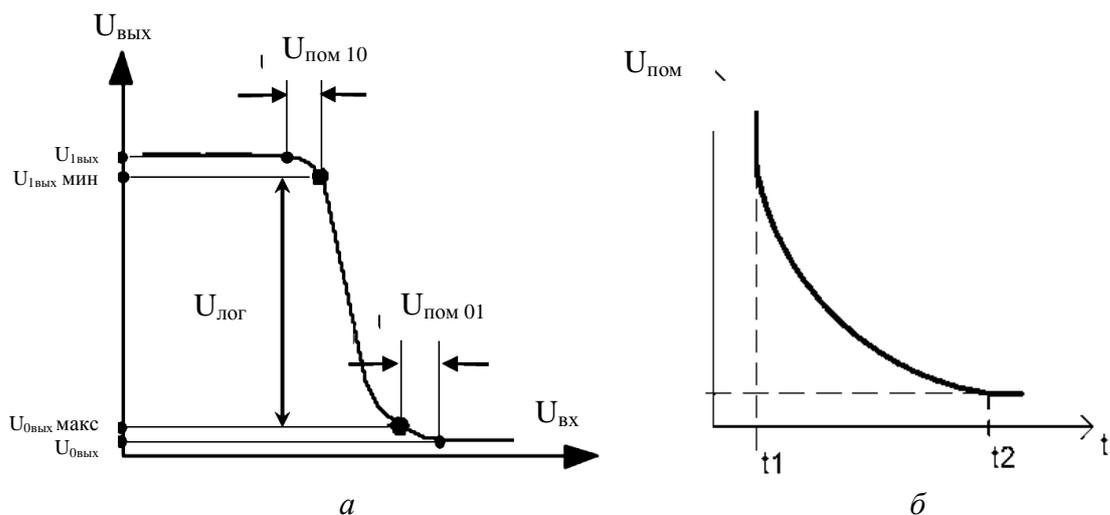


Рис. 14.22. Характеристика импульсной помехоустойчивости

8. Средняя потребляемая мощность от источника питания $P_{\text{ном.ср.}}$.

$$P_{\text{ном.ср.}} = \frac{P_{\text{ном.}}^0 + P_{\text{ном.}}^1}{2},$$

где $P_{\text{ном.}}^0$ и $P_{\text{ном.}}^1$ – мощности, потребляемые схемой в состоянии логического нуля «включено» и в состоянии логической единицы «выключено».

Такое определение справедливо, когда мощность, потребляемая схемой во время переходных процессов, значительно меньше мощности, потребляемой в одном из статических состояний. В противном случае микросхема характеризуется еще и средним значением мощности, потребляемой при максимальной частоте переключения элемента. По потребляемой мощности ИМС делятся на:

мощные – $25 \text{ мВт} < P_{\text{ср.}} < 250 \text{ мВт}$ (ЭСЛ схемы);

средней мощности – $3 \text{ мВт} < P_{\text{ср.}} < 25 \text{ мВт}$ (ТТЛ схемы);

маломощные – $0,3 \text{ мВт} < P_{\text{ср.}} < 3 \text{ мВт}$;

микромощные – $1 \text{ мкВт} < P_{\text{ср.}} < 300 \text{ мкВт}$ (КМДП схемы);

нановаттные – $P_{\text{ср.}} < 1 \text{ мкВт}$ (И²Л).

Потребляемая мощность зависит от напряжения источника питания $U_{ИП}$. При снижении $U_{ИП}$ уменьшается потребляемая мощность, ухудшаются помехоустойчивость, нагрузочная способность, а иногда и быстродействие. В связи с этим $U_{ИП}$ выбирается с учетом требований, предъявляемых ко всем параметрам ИМС. Оно должно соответствовать одному из значений стандартного ряда напряжений питания: 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,0; 4,0; 5,0; 6,3; 9,0; 12,6 В. Для цифровых микросхем на биполярных транзисторах типовые значения $U_{ИП}$ составляют 2...5 В, для схем на МДП-транзисторах – 5...9 В.

9. Помимо номинального значения $U_{ИП}$ определяется допустимое отклонение питания

$$\xi_n = U_{ИП\text{ ном.}} / U_{ИП}.$$

Для цифровых устройств $\xi_n = 0,05...0,1$, так как при более низких значениях существенно повышаются требования к источникам питания.

Цифровые ИМС, потребляющие большую мощность, характеризуются наибольшим быстродействием и применяются для создания быстродействующих вычислительных устройств. В устройствах, для которых быстродействие не является определяющим параметром, применяются мало- и микромощные схемы.

10. Для оценки мощности, потребляемой схемой во время переключения, используется интегральный параметр, называемый *энергией переключения*. Он определяется как произведение потребляемой мощности $P_{ср.}$ на время задержки $\tau_{зд}$: $A = P_{ср.}\tau_{зд}$. Работа, затрачиваемая на выполнение единичного переключения, называется энергией переключения.

Снижение потребляемой мощности ИМС при сохранении высокого быстродействия является одной из важных проблем микроэлектроники. В настоящее время наметились два пути снижения потребляемой мощности:

- создание логических элементов, работающих при минимально допустимых токах и напряжениях;
- создание логических элементов, потребляющих энергию только при переключениях и практически не потребляющих ее в статических состояниях.

11. Надежность интегральных логических элементов определяет их свойство выполнять заданные функции при сохранении эксплуатационных показателей в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки на отказ. Надежность интегральных логических элементов характеризуется количеством отказов соединений между контактными площадками на кристалле и выводами корпуса в единицу

времени. Надежность ИМС в нормальных условиях эксплуатации значительно выше надежности аналогичных схем на дискретных элементах. Надежность ИМС сильно зависит от температурных изменений электрических параметров транзисторов, диодов, резисторов, входящих в ИМС. Поэтому для ИМС всегда задается диапазон рабочих температур, в котором значения параметров не выходят за принятые значения.

2. Динамические характеристики и параметры. Они характеризуют работу ИМС в момент переключения из нуля в единицу или из единицы в ноль.

1. Время переключения из логического нуля в логическую единицу t^{01} – это время, за которое напряжение на входе или выходе возрастает от 0,1 до 0,9 уровня логической единицы (рис. 14.23).

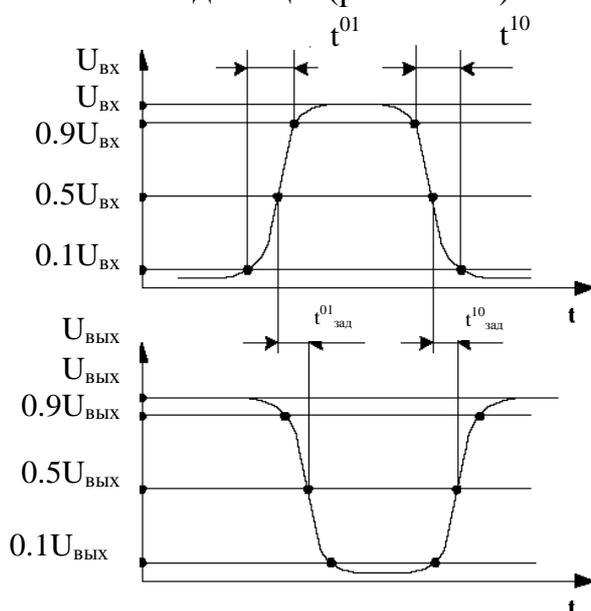


Рис. 14.23. Определение динамических характеристик

2. Время переключения из логической единицы в логический ноль t^{10} .
3. Время задержки распространения сигнала при переключении из нуля в единицу $t^{01}_{зад}$.
4. Время задержки распространения сигнала при переключении из логической единицы в логический ноль $t^{10}_{зад}$.
5. Среднее время задержки распространения сигнала, характеризует быстродействие ИМС. Обозначение – $t_{зад.ср}$.

$$t_{зад.ср} = \frac{t^{01}_{зад} + t^{10}_{зад}}{2}$$

Если цепь состоит из N последовательно включенных одностипных логических ИМС, то время прохождения сигнала по цепи одной ИС

$$T = \frac{N}{2} t_{\text{зад.вкл.}} + \frac{N}{2} t_{\text{зад.выкл.}}$$

и зависит от режима работы транзистора в микросхеме и потребляемой мощности.

По среднему времени задержки ИС делятся на:

сверхбыстродействующие – $t_{\text{зд ср.}} < 5$ нс;

быстродействующие – $10 \text{ нс} > t_{\text{зд ср.}} > 5$ нс;

среднего быстродействия – $100 \text{ нс} > t_{\text{зд ср.}} > 10$ нс;

низкого быстродействия – $t_{\text{зд ср.}} > 100$ нс.

Схемы ТТЛ типа относятся к схемам среднего быстродействия, $50 \text{ нс} > t_{\text{зд ср.}} > 5$ нс. Наибольшее быстродействие имеют транзисторные логические схемы с эмиттерными связями (ЭСЛ), $t_{\text{зд ср.}} = 1 \dots 10$ нс.

С параметром быстродействия тесно связана максимальная рабочая частота (переключений) $F_{\text{max}} = K / t_{\text{зд ср.}}$, где K – конструктивно-технологический коэффициент, зависящий от типа логики.

14.4. Классификация логических устройств

Логические устройства могут быть классифицированы по различным признакам. В зависимости от способа ввода и вывода информации цифровые устройства подразделяются на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные.

Последовательным называется устройство, в котором входные сигналы поступают на вход, а выходные сигналы снимаются с выхода последовательно разряд за разрядом. Устройство называется параллельным, если входные сигналы подаются на вход, а выходные сигналы снимаются с выхода одновременно. В последовательно-параллельных устройствах входные и выходные сигналы представлены в разных формах. Либо на вход сигналы поступают последовательно сигнал за сигналом, а с выхода они снимаются одновременно, либо наоборот.

По принципу действия все цифровые устройства делятся на два класса: комбинационные и последовательные (накопительные). Комбинационными цифровыми устройствами (ЦКУ) называются устройства, выходные сигналы которых определяются только действующими в данный момент входными сигналами и не зависят от внутреннего состояния устройства. Последовательными устройствами называются цифровые устройства, выходные сигналы которых зависят не только от входных сигналов, но и от внутреннего состояния устройства. Этот тип устройств часто называют цифровыми автоматами.

Контрольные вопросы

1. Что такое система счисления?
2. Какие арифметические и логические операции вам известны?
3. Расскажите о логических функциях, приведите примеры обозначения и таблицы истинности для элементов, их реализующих.
4. Реализуйте с помощью переключателей логические функции.
5. Расскажите о характеристиках и параметрах цифровых ИМС.
6. Что такое помеха и помехоустойчивость?
7. Расскажите о классификации логических устройств.

Тема 15. Базовые логические элементы цифровых интегральных микросхем

Термины: *ТЛНС, ТРЛ, РЕТЛ, ДТЛ, ТТЛ, ЭСЛ, И²Л, КМДП-логика, квазистатические элементы, статический режим, шина питания.*

15.1. Диодно-транзисторная логика

15.2. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ)

15.3. Логические элементы ТТЛ со специальными выводами

15.4. Логические элементы на полевых транзисторах МОП-структуры

15.5. Эмиттерно-связная логика

15.6. Интегральная инжекционная логика (И²Л)

15.7. Правила схемного включения элементов

Логические интегральные микросхемы выпускаются в виде серии логических элементов. Микросхемы, выполненные по биполярной технологии и схемотехнической реализации, делятся на следующие группы:

- 1) транзисторная логика с непосредственной связью между логическими элементами (ТЛНС);
- 2) транзисторная логика с резистивными связями между логическими элементами (ТРЛ);
- 3) резистивно-емкостная транзисторная логика (РЕТЛ);
- 4) диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- 5) транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- 6) эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);
- 7) инжекционная интегральная логика И²Л.

С применением полевых транзисторов наибольшее развитие получили микросхемы КМДП-логики.

Серии цифровых интегральных микросхем ТЛНС, ТРЛ, РЕТЛ, ДТЛ не используются в новых разработках из-за низких характеристик. Наиболее интенсивное распространение в настоящее время получили серии цифровых интегральных микросхем, построенных на основе ТТЛ, ЭСЛ, И²Л, КМДП-логики.

Разработка каждой серии микросхем начинается с базового логического элемента – основы всех элементов, узлов и устройств серии. Базовые логические элементы выполняют либо операцию И-НЕ, либо ИЛИ-НЕ. Разнообразие типов базовых элементов объясняется тем, что каждый из них имеет свои достоинства и свою область применения.

15.1. Диодно-транзисторная логика

Диодно-транзисторная логика (ДТЛ) представляет собой сочетание диодных логических ячеек с транзисторным инвертором. Базовым логическим элементом всех серий ДТЛ является элемент Шеффера (элемент И-НЕ), реализующий операцию логического умножения с отрицанием. Промышленностью выпускаются следующие серии элементов ДТЛ: К104, К109, К 151, К 158, К 156, К202, К215, К217, К218, К221, К240, К511.

Схема логического элемента ДТЛ представлена на рис. 15.1.

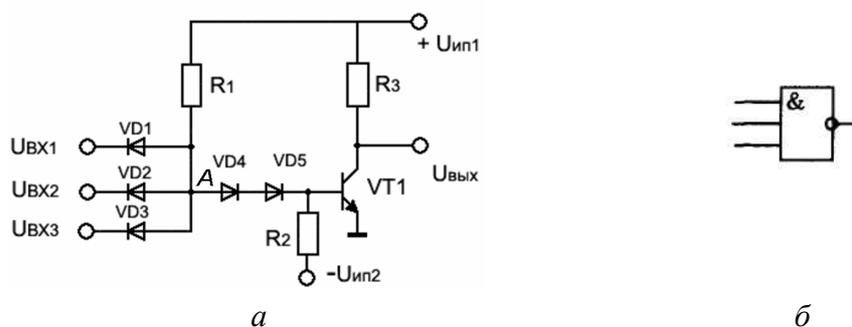


Рис. 15.1. Принципиальная электрическая схема (а) и условное обозначение (б) базового логического элемента серии ДТЛ

Входные диоды $VD1...VD3$ и резистор $R1$ образуют входную логическую схему, выполняющую в положительной логике операцию И. Инвертор на транзисторе $VT1$ выполняет логическую операцию НЕ, усиливает и формирует сигналы на выходе до стандартного уровня. Смещающие диоды $VD4$ и $VD5$ предназначены для увеличения порога запираения и помехоустойчивости схемы в закрытом состоянии, а резистор $R2$ и $U_{ин2}$ обес-

печивают оптимальную величину тока этих диодов. Диоды VD1...VD3 должны обладать минимальным сопротивлением в проводящем состоянии, высоким обратным напряжением, малой емкостью и малым временем восстановления обратного сопротивления.

Рассмотрим принцип работы ДТЛ. Пусть на один (или на все) вход подается низкий входной сигнал логического нуля $U^0_{вх}$. Входной диод (или все диоды) открывается и оказывается замкнутым на общую шину. От источника питания $U_{ИП}$ через резистор R1, открытый диод и входную цепь протекает ток, при этом потенциал точки А уменьшается до уровня прямого падения напряжения на диоде: $U_A = U^0_{вх} + U_{пр}$, где $U_{пр}$ – падение напряжения на открытом входном диоде. При отсутствии VD4, VD5 потенциал базы транзистора VT1 был бы положительным, а транзистор – открыт. Диоды VD4, VD5 а также второй источник $U_{ИП2}$ повышают помехоустойчивость схемы.

При одновременной подаче на все входы высокого уровня напряжения логической единицы диоды VD1...VD3 запираются. Транзистор VT1 переходит в область насыщения за счет тока, протекающего от источника питания $U_{ИП}$ через R1 и открытые диоды VD4...VD5 в базу транзистора. На выходе схемы появляется низкий уровень напряжения $U^0_{вых}$, близкий к нулю.

15.2. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ)

Элементы транзисторно-транзисторной логики являются дальнейшим усовершенствованием ДТЛ, которое осуществляется заменой диодной сборки многоэмиттерным транзистором. Многоэмиттерный транзистор представляет собой совокупность нескольких транзисторных структур, имеющих общий коллектор и общую базу и непосредственно взаимодействующих друг с другом только за счет движения основных носителей.

Эмиттерные переходы МЭТ выполняют функции входных диодов в схемах ДТЛ, а коллекторный переход – роль смещающего диода.

Характерной особенностью элементов ТТЛ является:

- высокая помехоустойчивость;
- большое быстродействие;
- хорошая нагрузочная способность;
- малая потребляемая мощность;
- высокая надежность;
- малая стоимость.

15.2.1. Транзисторно-транзисторная логика с простым инвертором

На рис. 15.2, 15.3, 15.4 приведены схема, ВАХ и таблица истинности ТТЛ с простым инвертором.

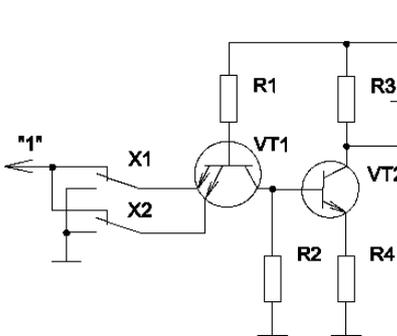


Рис. 15. 2. Схема ТТЛ с простым инвертором

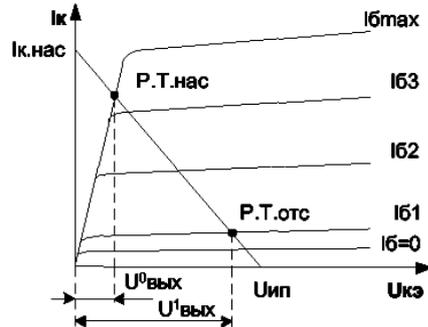


Рис. 15.3. ВАХ ТТЛ с простым инвертором

$X1$	$X2$	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Рис. 15.4. Таблица истинности ТТЛ с простым инвертором

Принцип действия

Если хотя бы на один из входов будет подаваться сигнал логического нуля, соответствующий эмиттерный переход транзистора VT1 будет открыт, и через него будет протекать ток от плюса источника питания (ИП), через резистор R1, база – эмиттер VT1, общий провод, минус источника питания. В цепи коллектора VT1, а, следовательно, и в цепи базы VT2 ток будет отсутствовать, транзистор VT2 будет находиться в режиме отсечки, на выходе будет высокий уровень напряжения логической единицы. При подаче на оба входа логических единиц оба эмиттерных перехода закрываются и ток будет протекать по цепи от плюса ИП, через R1, база – коллектор VT1 и на базу VT2. Транзистор VT2 перейдет в режим насыщения, и на выходе установится низкий уровень напряжения логического нуля.

Недостатком ТТЛ с простым инвертором является маленький коэффициент разветвления.

15.2.2. ТТЛ со сложным инвертором. Схема ТТЛ со сложным инвертором приведена на рис. 15.5, таблица истинности – на рис. 15.6.

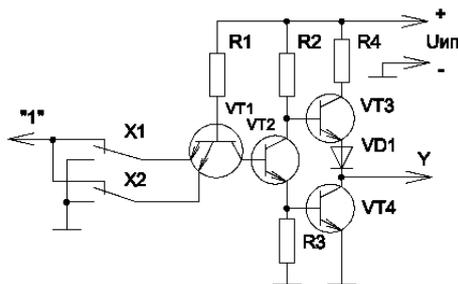


Рис. 15.5. Схема ТТЛ со сложным инвертором

$X1$	$X2$	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Рис. 15.6. Таблица истинности

Если хотя бы на одном из входов будет действовать логический ноль, соответствующий эмиттерный переход будет открыт, и через него будет протекать ток по цепи от плюса ИП, через R1, база – эмиттер VT1, общий провод, минус ИП. В цепи коллектора VT1, а, следовательно, и в цепи базы VT2 ток будет отсутствовать, VT2 будет находиться в режиме отсечки, ток через транзистор VT2, а значит, ток базы VT4 будут близки к нулю. Транзистор VT4 также будет находиться в режиме отсечки, и на выходе будет высокий уровень напряжения логической единицы. При этом напряжение на коллекторе VT2 и на базе VT3 будет максимальным и VT3 будет находиться в полностью открытом состоянии.

При подаче на оба входа логических единиц оба эмиттерных перехода закрываются и ток будет протекать по цепи от плюса ИП, через R1, переход база-коллектор VT1 на базу VT2. Транзистор VT2 перейдет в режим насыщения. Ток через него, а, следовательно, и ток базы VT4 будет максимальным, и транзистор VT4 перейдет в режим насыщения. На выходе будет низкий уровень логического нуля. При этом напряжение на коллекторе VT2 и на базе VT3 будет близко к нулю и VT3 перейдет в полностью закрытое состояние. Диод VD1 применяется для более надежного запираания транзистора VT3.

Базовые элементы различных серий ТТЛ различаются только инверторами, которые должны улучшать переходные характеристики, повышать помехоустойчивость и нагрузочную способность, потреблять небольшую мощность. Логические элементы со сложным инвертором потребляют большую мощность, занимают большую площадь кристалла, поэтому на их основе изготавливаются цифровые микросхемы малой и средней степени интеграции.

Быстродействие логических элементов различных серий ТТЛ можно повысить двумя путями:

- уменьшая сопротивление резисторов и паразитные емкости;
- обеспечивая работу транзисторов в активном, т.е. ненасыщенном режиме, при котором отсутствует накопление и рассасывание носителей в базах транзисторов.

Оба эти способа нашли практическое применение. Первый способ использовался при создании ТТЛ серий К130 и К131. Второй способ повышения быстродействия цифровых микросхем ТТЛ связан с применением транзисторов с барьером Шоттки. При этом высокое быстродействие сочетается с умеренным потреблением мощности. Диоды Шоттки подключаются параллельно коллекторному переходу транзистора, а транзисторы с диодами Шоттки называют транзисторами с барьером Шоттки или транзисторами Шоттки.

15.3. Логические элементы ТТЛ со специальными выводами

15.3.1. ТТЛ с открытым коллектором

Для расширения функциональных возможностей у отдельных микросхем выходы выполнены так, что верхний выходной транзистор и относящиеся к нему элементы отсутствуют. Такие логические элементы называют элементами со свободным (открытым) коллектором. Внешним нагрузочным сопротивлением может быть резистор, реле, элементы индикации (светодиод, лампа накаливания), коаксиальный кабель, вход усилителя мощности и др. Напряжение, к которому подключается внешняя нагрузка, может значительно превышать напряжение питания микросхемы.

Микросхемы с открытым коллектором могут:

- быть переходным звеном от логической части устройства к элементам вывода информации, т.е. использоваться для управления внешними устройствами;
- обеспечивать реализацию дополнительной логической функции при непосредственном соединении между собой выходов нескольких микросхем.

Объединение выходов нескольких функциональных узлов называют монтажной (проводной) логикой. При таком соединении если на выходе одного или нескольких элементов будет низкий потенциал (логический «0» в положительной логике), то низкий потенциал будет на выходе всей схемы. При наличии логической единицы на всех выходах на общем объединенном выходе будет значение логической единицы. Параллельное подключение нескольких открытых коллекторов к общей нагрузке создает систему, выполняющую логическую операцию И (монтажное И).

Следующая схема получила свое название за счет того, что коллектор выходного транзистора не подключен ни к одной точке схемы. Поэтому для обеспечения работоспособности между выходом и плюсом ИП необходимо подключить внешнее навесное сопротивление (рис. 15.7, 15.8).

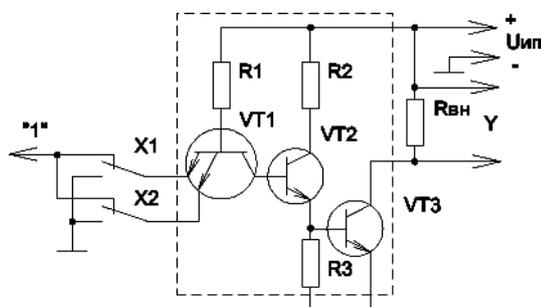


Рис. 15.7. Схема элемента с открытым коллектором

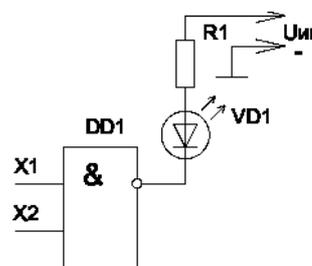


Рис. 15.8. Включение элемента ТТЛ с открытым коллектором

ТТЛ с открытым коллектором применяется для управления сегментами элементов индикации (миниатюрные лампы накаливания, светодиоды, семисегментные индикаторы).

Примерами элементов с открытым коллектором являются микросхемы К155ЛА7, К155ЛА11.

Подавая разные значения напряжения питания в схемах с открытым коллектором, можно получать разные уровни выходного сигнала. Это позволяет осуществлять согласование микросхем серии ТТЛ с другими сериями, имеющими другие значения логических нулей и единиц, не используя дополнительных преобразователей уровней.

Конкретное значение R_H выбирают из условия требуемого быстродействия при наименьшей потребляемой мощности. Оно достигается тогда, когда R_H близко к минимальному значению. С повышением R_H увеличивается время заряда паразитных емкостей при высоком уровне выходного напряжения и уменьшается потребление тока при низком уровне.

15.3.2. ТТЛ с Z-состоянием

Третьим, или Z-состоянием называется запрет приема информации, при котором выходное сопротивление логического элемента стремится к бесконечности, а выходной ток – к нулю (рис. 15.9, 15.10).

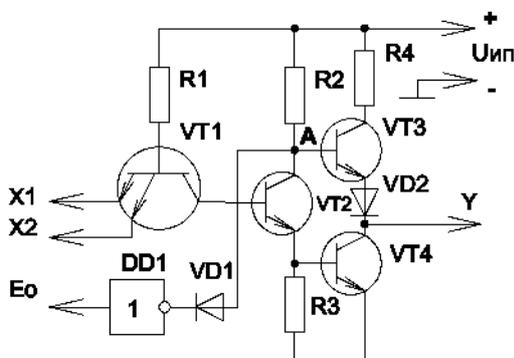


Рис. 15.9. Схема логического элемента с Z-состоянием

\bar{E}_0	X1	X2	Y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	Z
1	0	1	Z
1	1	0	Z
1	1	1	Z

Рис. 15.10. Таблица истинности логического элемента с Z-состоянием

Если на запрещающий вход с инверсией подать логический ноль, то на выходе инвертора DD1 установится высокий уровень логической единицы, диод VD1 закроется, что равносильно разрыву цепи, и схема будет работать как базовый элемент ТТЛ, выполняющий функцию И-НЕ. При подаче на запрещающий вход логической единицы на выходе инвертора DD1 будет логический ноль, и диод VD1 откроется. Точка А схемы окажется под напряжением, близким к нулю, т.е. под напряжением логического нуля выходного сигнала инвертора DD1. Это приведет к тому, что тран-

зистор VT3 закроется. Ток через транзистор VT2, а, следовательно, в базе VT4 будет близок к нулю, и транзистор VT4 тоже закроется. Таким образом, оба транзистора, и VT3, и VT4 будут одновременно закрыты при любых состояниях на информационных входах X1 и X2. Это и является Z-состоянием схемы.

15.3.3. ТТЛШ

К одному из недостатков ТТЛ можно отнести сравнительно невысокое быстродействие. Это объясняется тем, что при переключении транзистора из режима насыщения в режим отсечки база транзистора оказывается насыщенной неосновными носителями заряда и коллекторный ток транзистора будет продолжать течь до тех пор, пока неосновные носители заряда не перейдут из базы в коллектор. Для повышения быстродействия в ТТЛШ между базой и коллектором транзистора включают быстродействующий переход Шоттки. В этом случае неосновные носители будут переходить из базы в коллектор не через коллекторный p-n-переход, а через переход Шоттки.

Обозначение транзистора с переходом Шоттки на принципиальных схемах – на рис. 15.11, пояснение к работе – на рис. 15.12.

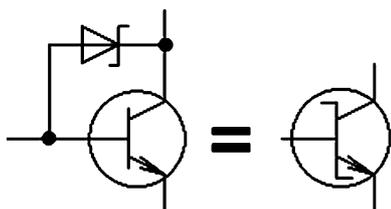


Рис. 15.11. Схематехника транзистора с переходом Шоттки

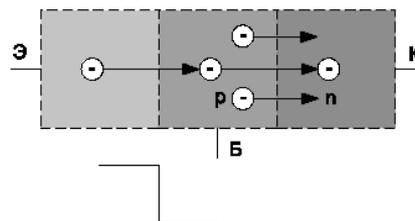


Рис. 15.12. Пояснение к работе транзистора Шоттки

Когда транзистор закрыт или работает в ненасыщенном, активном режиме, потенциал коллектора выше потенциала базы. Диод Шоттки закрыт и не влияет на работу транзистора. При насыщении транзистора потенциал коллектора уменьшается, диод Шоттки открывается при напряжении 0,3...0,5 В и фиксирует этот уровень напряжения на коллекторном переходе, не позволяя транзистору перейти в режим насыщения. Применение транзисторов Шоттки позволяет уменьшить или почти полностью исключить время рассасывания избыточного заряда в базе и тем самым снизить время выключения схемы.

Промышленностью выпускаются следующие серии ТТЛШ-логики: К530, К531, КР1531 и маломощные К555, КР1533 с потребляемой мощностью порядка 2 мВт. По принципу действия эта схема аналогична базовому

ТТЛ элементу. Отличие состоит лишь в том, что в выходном каскаде использован составной транзистор, обеспечивающий повышенный выходной ток, а каскад с ОЭ (генератор тока), включенный в эмиттерную цепь транзистора, улучшает форму передаточной характеристики, приближая ее к прямоугольной. В перспективных интегральных микросхемах применяются новые интегральные транзисторы со структурой «Изопланар-П», у которых использована оксидная изоляция между транзисторами, а не привычный р-п-переход. Граничная частота у транзисторов с такой структурой достигает 5 ГГц, что в 3 раза выше, чем у транзисторов с планарной структурой.

Выигрыш в быстродействии схем с использованием транзисторов Шоттки приводит к некоторому ухудшению статических параметров: понижается пороговое напряжение, повышается значение логического нуля $U_{вых}^0$, ухудшается помехоустойчивость. Для повышения помехоустойчивости логических элементов в эмиттерные цепи многоэмиттерного транзистора вводят диоды, включенные в обратном направлении для сигналов логической единицы и нуля.

15.4. Логические элементы на полевых транзисторах МОП-структуры

Полевые транзисторы являются наиболее перспективными полупроводниковыми приборами для создания логических и других интегральных схем большой и сверхбольшой степени интеграции. Практическое применение при разработке интегральных логических схем получили полевые транзисторы с МДП-структурой и индуцированным каналом n- или p-типа. Наибольшее распространение получили две разновидности логических схем:

- 1) МДП-логики с нагрузочным транзистором;
- 2) логики на комплементарных транзисторах.

Особенностью интегральных микросхем на МДП-транзисторах является возможность реализации любых логических функций с помощью только МДП-транзисторов.

Кроме того, МДП-транзисторы имеют следующие достоинства:

- возможность использования транзистора в качестве нагрузки, что обеспечивает высокую однородность интегральных схем;
- высокую помехоустойчивость (2...6 В) по сравнению с 0,6 В для биполярных транзисторов;
- малую мощность рассеяния в статическом режиме, особенно при использовании в схеме транзисторов разного типа проводимости канала;
- использование одного источника питания, что обеспечивает простоту схемы;
- устойчивость к нейтронной составляющей радиационного воздействия.

К недостаткам МДП-транзисторов следует отнести:

- большое пороговое напряжение;
- высокое напряжение питания;
- относительно невысокое быстродействие;
- малую крутизну характеристики, что снижает нагрузочную способность элементов по току и ухудшает отношение скорости переключения к мощности рассеяния.

Схемы на МДП-транзисторах с каналом р-типа имеют малую стоимость и более технологичны, время прохождения сигнала в них в 8... 10 раз меньше, чем у схем на транзисторах с каналом n-типа. По быстродействию схемы на МДП-транзисторах с каналом р-типа не уступают ТТЛ схемам, обеспечивая меньшую мощность рассеяния и более высокую плотность размещения компонентов, чем ТТЛ схемы.

Логические интегральные микросхемы на МДП-транзисторах бывают следующих типов: статические, динамические и квазистатические. Элементарной базой для построения таких схем являются простейшие логические элементы, реализующие логические функции И-НЕ (схемы типа ЛА), ИЛИ-НЕ (схемы типа ЛЕ), И (схемы типа ЛИ), НЕ (схемы типа ЛН) и комбинированные (схемы типа ЛП, ЛС). Использование базовых элементов позволяет построить цифровое устройство с любым алгоритмом функционирования. В логических схемах получили распространение схемы статического типа.

15.4.1. Ключи на МОП-транзисторах. Ключ на МОП-транзисторе изображен на рис. 15.13, структура МОП-транзистора – на рис. 15.14, таблица истинности – рис. 15.15.

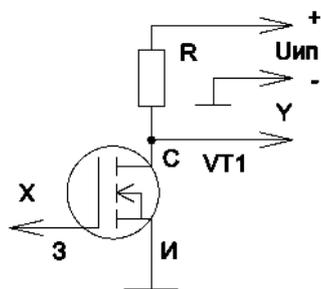


Рис. 15.13. Ключ на МОП-транзисторе

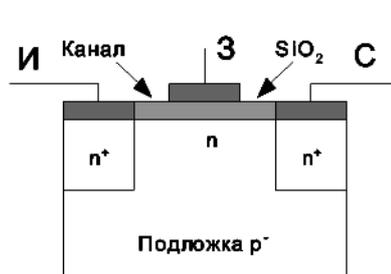


Рис. 15.14. Структура МОП-транзистора

x	y
0	1
1	0

Рис. 15.15. Таблица истинности

Недостатком данных ключей является наличие резисторов, которые занимают в подложке значительно больше места, чем транзистор. Поэтому наиболее широко применяются ИМС, у которых вместо резистора также применяется МОП-транзистор, но с каналом другого типа проводимости. Такие взаимодополняющие структуры получили название МОП-пар.

15.4.2. Комплементарная МОП-пара (КМОП). На рис. 15.16 – 15.18 изображены КМОП-транзисторный ключ, таблица истинности и стокзатворные характеристики МОП.

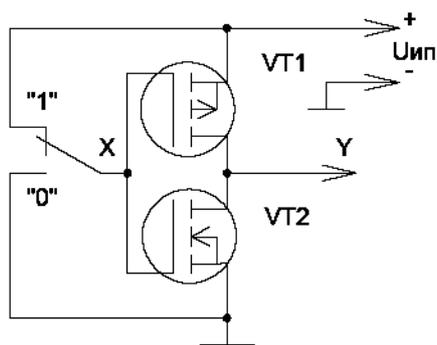


Рис. 15.16. КМОП-транзисторный ключ

x	y
0	1
1	0

Рис. 15.17. Таблица истинности

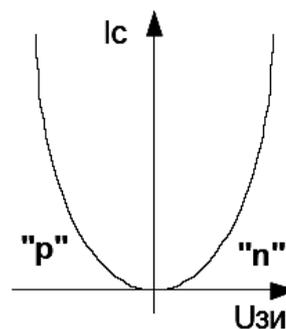


Рис. 15.18. Стокзатворные характеристики МОП-транзисторов

Если на затвор подать сигнал логического нуля, то в транзисторе VT2 (с каналом n-типа проводимости) канал будет отсутствовать, а в транзисторе VT1 с каналом p-типа канал будет индуцирован, т.к. на затворе относительно истока будет действовать отрицательное напряжение. Через этот канал выход Y соединяется с плюсом ИП, и на выходе будет высокий уровень логической единицы.

При подаче на вход логической единицы канал в транзисторе VT1 исчезает, а в VT2 канал индуцируется и через этот канал выход схемы соединяется с нулевым потенциалом общего провода, следовательно, на выходе будет логический ноль.

Достоинства комплементарной МОП-пары: отсутствие резисторов, что позволяет повысить степень интеграции; очень малое потребление тока от ИП, т.к. между плюсом и минусом ИП всегда оказывается транзистор, у которого нет канала. Недостаток комплементарной МОП-пары – низкое быстродействие.

15.4.3. Реализация функции И-НЕ в КМОП-логике. На рис. 15.19, 15.20 изображены схема элемента И-НЕ на КМОП-транзисторах и таблица истинности.

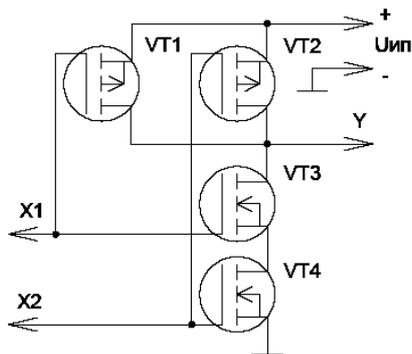


Рис. 15.19. Схема элемента И-НЕ на КМОП-транзисторах

X1	X2	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Рис. 15.20. Таблица истинности

Если хотя бы на одном из входов имеется сигнал логического нуля, в соответствующем транзисторе с каналом р-типа – VT1 или VT2 – будет индуцирован канал, через который выход Y соединяется с плюсом ИП, и на выходе будет логическая единица. При подаче на оба входа логических единиц в VT1 и в VT2 каналы исчезают, а в транзисторах VT3 и VT4 каналы индуцируются, и через эти каналы выход Y соединяется с общим проводом, следовательно, на выходе будет логический ноль.

15.4.4. Реализация функции ИЛИ-НЕ в КМОП-логике

Если на оба входа поданы нули, то в транзисторах VT1 и VT4 с каналами n-типа каналы отсутствуют, а в VT2 и VT3 каналы индуцируются, через них выход Y связан с плюсом ИП, следовательно, на выходе логическая единица. На рис. 15.21, 15.22 – схема элемента ИЛИ-НЕ на КМОП-транзисторах и таблица истинности.

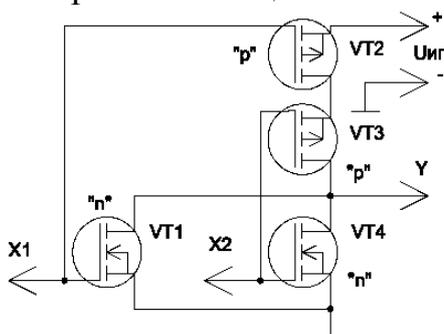


Рис. 15.21. Схема элемента ИЛИ-НЕ на КМОП-транзисторах

X1	X2	Y
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Рис. 15.22. Таблица истинности

Если хотя бы на один из входов подать логическую единицу, то в соответствующем транзисторе р-типа канал исчезает и выход Y отключается от плюса ИП, а в соответствующем транзисторе с каналом n-типа канал индуцируется и через него выход Y соединяется с общим проводом, следовательно, на выходе будет логический ноль.

15.5. Эмиттерно-связная логика

15.5.1. Реализация функций ИЛИ и ИЛИ-НЕ в эмиттерно-связной логике (ЭСЛ)

Цифровые микросхемы эмиттерно-связанной логики составляют схемы на переключателях тока с объединенными эмиттерами, обладающие по сравнению с другими типами цифровых схем наибольшим быстродействием и большой потребляемой мощностью. Большое быстродействие ЭСЛ-логики обеспечивается:

- за счет работы транзисторов в ненасыщенном (линейном) режиме;
- за счет применения на выходах схемы эмиттерных повторителей, ускоряющих процесс заряда и разряда нагрузочных емкостей;
- за счет ограничения перепада выходного напряжения, что приводит к снижению статической помехоустойчивости.

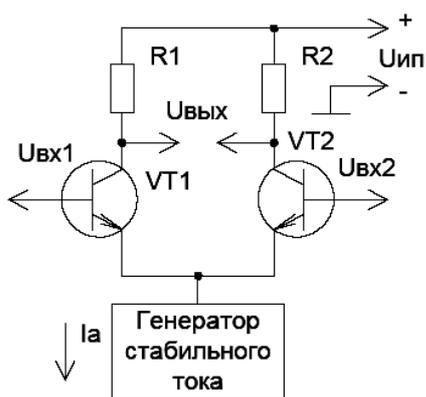


Рис. 15.23. Типовой элемент ЭСЛ-логики

Наибольшее распространение получили ЭСЛ серии 100, 500, К500, 700, К1500, обеспечивающие выполнение любых арифметических и логических операций.

ЭСЛ является самой быстродействующей из всех типов логики. Это объясняется тем, что транзисторы в ЭСЛ работают в линейном режиме, не переходя в режим насыщения или отсечки. Основой ЭСЛ является дифференциальный эмиттерный каскад, изображенный на рис. 15.23.

$$U_{\text{вх.1}} = U_{\text{вх.2}}; I_1 = I_2 = \frac{I_0}{2}; U_{\text{вх.1}} > U_{\text{вх.2}}; I_1 = I_0 + \Delta I; I_2 = I_0 - \Delta I.$$

Особенность ЭСЛ: разница уровней логической единицы и нуля очень мала, следовательно, помехоустойчивость плохая. Чтобы повысить помехоустойчивость, в ЭСЛ используется схема, при которой в цепи коллектора – соединение с общим проводом, а в цепь эмиттера подается минус напряжения ИП. Это приводит к тому, что все уровни напряжения отрицательны и ЭСЛ плохо согласуется с другими типами логики. Рассмотрим следующую схему (рис. 15.24, 15.25), в которой $U^0 \approx -1,6 \text{ В}$; $U^1 \approx -0,8 \text{ В}$; $U_{\text{он}} \approx -1,2 \text{ В}$.

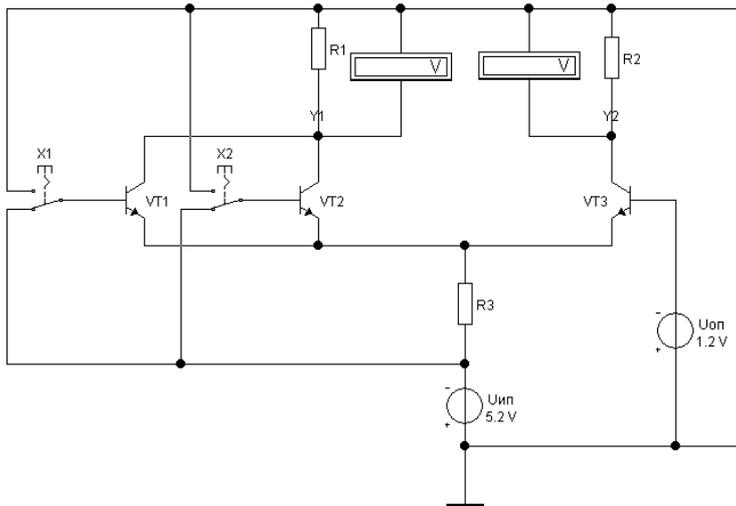


Рис. 15.24. Схема ЭСЛ элемента

X1	X2	Y1	Y2
0	0	1	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1

Рис. 15.25. Таблица истинности

В данной схеме роль генератора стабильного тока (ГСТ) выполняет источник стабилизированного напряжения $U_{III} = -5,2$ В вместе с последовательно включенным резистором R3 достаточно большого номинала.

При подаче на оба входа логического нуля опорное напряжение оказывается более положительным, чем на базах транзисторов VT1 и VT2, следовательно, транзистор VT3 открыт в большей степени, чем VT1 и VT2. Значит, ток через R2 будет больше, чем через R1, и напряжение на Y2 (логический ноль) будет более отрицательным, чем на выходе Y (логическая единица).

Если хоть на один из входов подать логическую единицу, то напряжение на базе соответствующего транзистора становится более положительным, чем опорное. Этот транзистор (VT1 или VT2) открывается в большей степени, чем VT3. Ток через R1 будет больше, чем через R2. Напряжение на выходе Y1 будет более отрицательным, т.е. логическим нулем, а напряжение на выходе Y2 – более положительным, т.е. логической единицей.

Вывод: ЭСЛ реализует функцию ИЛИ-НЕ по выходу Y и функцию ИЛИ по выходу Y2.

15.5.2. Источник опорного напряжения

Источник опорного напряжения собран на транзисторе VT4 (рис. 15.26). Схема эта представляет собой эмиттерный повторитель. Делитель, состоящий из резисторов R5, R6 и диодов VD1 и VD2, обеспечивает постоянное напряжение на базе транзистора, следовательно, ток через транзистор также будет постоянным и падение напряжения на резисторе R4

будет постоянным. Это напряжение и подается на базу транзистора VT3 как опорное. Диоды VD1, VD2 предназначены для температурной стабилизации работы схемы.

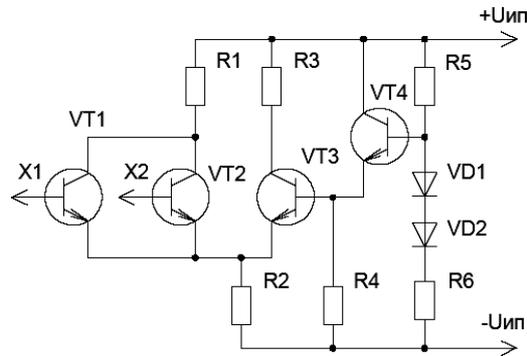


Рис. 15.26. Реализация источника опорного напряжения

15.5.3. Базовый элемент ЭСЛ серии К500

Недостатком рассмотренной выше схемы является малый коэффициент разветвления по выходу. Для увеличения его на выходе схемы включают эмиттерные повторители. В результате мы получили базовый элемент ЭСЛ (рис. 15.27).

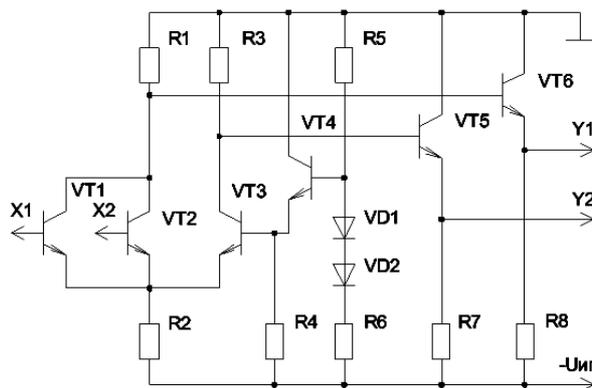


Рис. 15.27. Базовый элемент ЭСЛ

Интегральные схемы на эмиттерно-связанной логике используются в качестве элементной базы быстродействующих систем связи, вычислительной техники и радиоэлектронной аппаратуры. Они обладают следующими достоинствами:

- 1) высокая помехоустойчивость;
- 2) высокое быстродействие при средней и сверхвысоком быстродействии при большой потребляемой мощности за счет работы транзисторов в линейном ненасыщенном режиме;
- 3) высокая стабильность динамических параметров при изменении рабочей температуры и напряжения питания;

- 4) высокий коэффициент разветвления (высокая нагрузочная способность);
- 5) возможность работы на низкоомные согласованные линии связи и нагрузки;
- 6) малая мощность переключения и отсутствие зависимости тока потребления от частоты переключения;
- 7) использование биполярной технологии изготовления.

15.6. Интегральная инжекционная логика (И²Л)

Схемы интегральной инжекционной логики, иногда называемые совмещенной транзисторной логикой (СТЛ) или схемами с инжекционным питанием, нашли широкое применение при создании БИС и СБИС и не имеют аналогов среди логических элементов на дискретных транзисторах. В БИС с инжекционным питанием управление осуществляется путем инжекции неравновесных носителей в полупроводниковый кристалл через инжекторный переход.

Питание на инжектор подается от внешнего генератора тока или от источника напряжения через внешний резистор. Напряжение питания невелико и составляет 1...1,5 В. Схемы с инжекционным питанием могут нормально функционировать при изменении тока питания I_n в широких пределах (10^{-8} ... 10^{-3} А), что достигается изменением сопротивления резистора, который для уменьшения мощности рассеивания в кристалле находится вне корпуса микросхемы. Изменяя сопротивление резистора R или напряжение источника питания $U_{ин}$, можно в широких пределах (3...4 порядка) регулировать ток питания, мощность, потребляемую схемой, и быстродействие, что невозможно выполнять в ТТЛ и ЭСЛ схемах. Инжекционные логические схемы способны работать при сверхмалых токах (1 нА), в связи с чем возникает проблема токовой совместимости с другими логическими элементами. Увеличение тока обеспечивается с помощью каскадирования элементов И²Л с соответствующим ростом площади коллекторов от каскада к каскаду. Входная цепь И²Л выполняется с учетом совместимости ее входных и выходных сигналов с сигналами предшествующих каскадов, которыми обычно служат элементы ТТЛ типа.

Основой элементов интегральной инжекционной логики является ключ, представляющий собой транзистор с инжекционным питанием. Упрощенная эквивалентная схема его состоит из транзистора n-p-n типа и генератора тока инжекции I_n в цепи базы. Схема элемента, выполняющего логическую операцию ИЛИ-НЕ, представлена на рис. 15.28, а.

Принцип работы схемы следующий. Если хотя бы на один из входов схемы подать сигнал логической единицы от предыдущей схемы, у которой транзистор закрыт, то ток от генератора тока I_n потечет в базу транзи-

стора, он открывается и переходит в режим насыщения. Выходное напряжение соответствует логическому нулю. Если на обоих входах действуют сигналы логического нуля, т.е. они закорочены, токи I_u не будут проходить в базу транзисторов, а потекут во входные цепи. Транзисторы VT1 VT2 будут закрыты, их выходное напряжение соответствует логической единице. Таким образом, параллельное соединение нескольких ключей образует логический элемент ИЛИ-НЕ. Принципиальная схема логического элемента И-НЕ представлена на рис. 15.28, б. Сигнал на общем выходе схемы – коллекторе транзистора VT5 будет тогда, когда на входы одновременно поступают одинаковые сигналы. Если на все входы подается низкий потенциал, соответствующий логическому нулю, инвертор VT5 закрывается и на выходе имеется высокий потенциал.

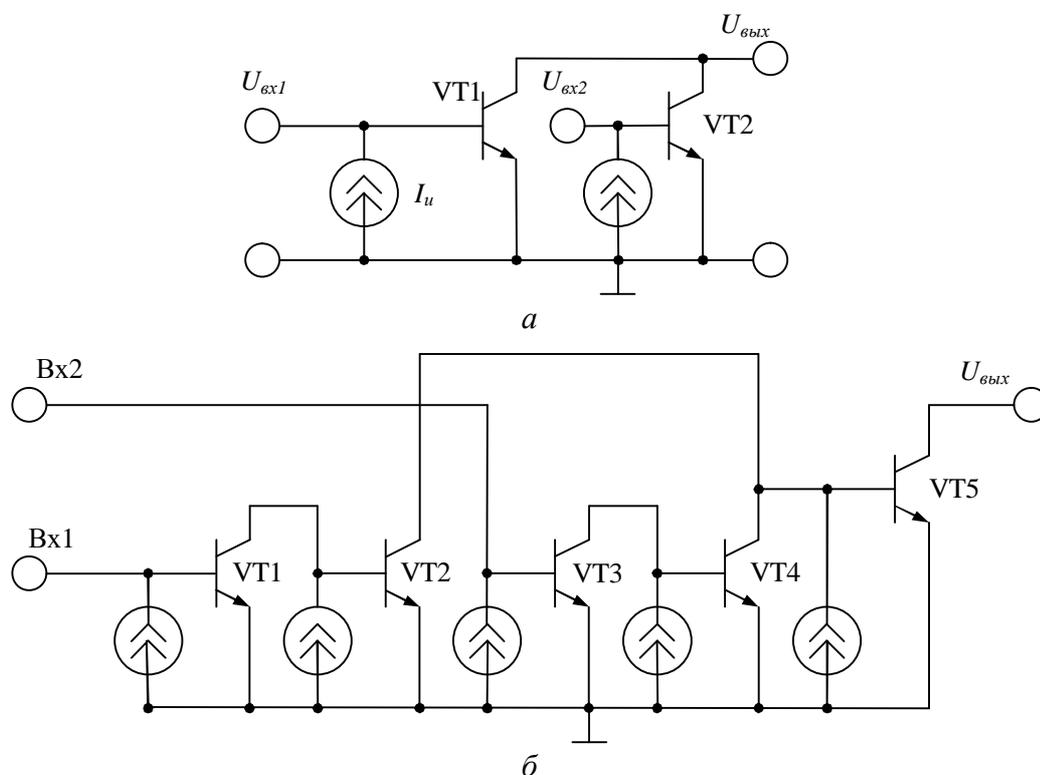


Рис. 15.28. Принципиальная схема логического элемента ИЛИ-НЕ (а) и И-НЕ (б) И²Л-логики

При подключении нескольких входных цепей к выходу одного каскада может ухудшиться функциональная надежность элемента, потому что входные (базовые) токи нагрузочных транзисторов в режиме насыщения зависят от коллекторных токов входных транзисторов. Транзисторы с большими коллекторными токами будут иметь меньший коэффициент насыщения. Для устранения этого недостатка используются многоколлекторные п-р-п-транзисторы, у которых в области базы формируется не-

сколько коллекторных областей. На рис. 15.29 представлена схема, выполняющая логические операции ИЛИ-НЕ и ИЛИ, которая является основой для создания более сложных цифровых схем. Число коллекторов переключающего транзистора определяет нагрузочную способность схемы.

Интегральные инжекционные логические схемы являются перспективными для совершенствования БИС. Структуры с инжекционным питанием все время совершенствуются:

- 1) за счет использования диодов Шоттки для реализации логических функций и уменьшения логического перепада;
- 2) за счет создания структур с низкоомным эмиттером: активная область эмиттерного перехода приближается к размеру коллектора;
- 3) за счет применения металлического коллектора.

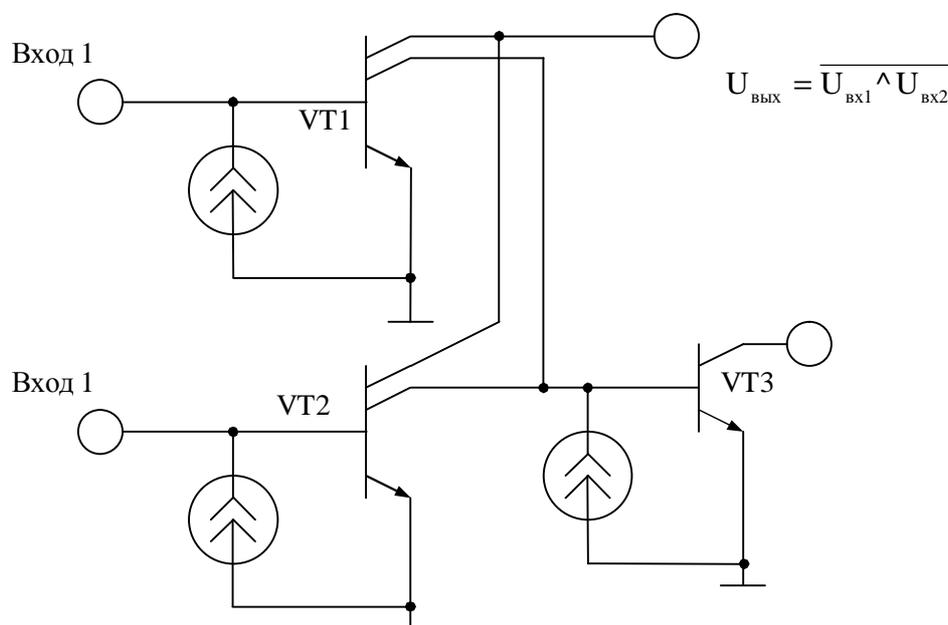


Рис. 15.29. Схема, выполняющая логические операции ИЛИ-НЕ и ИЛИ

Достоинствами элементов интегральной инжекционной логики и микросхем на их основе являются: малое потребление энергии, среднее быстродействие, высокая степень интеграции.

Недостатками являются: малый перепад между логической единицей и нулем, чувствительность к помехам, невозможность непосредственной стыковки с другими типами логических микросхем. Элементы И²Л используются для создания БИС и СБИС, где они выполняют все логические функции внутри структуры, ее связь с внешними цепями осуществляется с помощью ТТЛ элементов.

15.7. Правила схемного включения элементов

Выпускаемые промышленностью микросхемы ТТЛ серий выполняют простейшие логические операции (И-НЕ; ИЛИ-НЕ и др.), содержат в одном корпусе несколько независимых логических элементов, связанных между собой только источником питания.

Если некоторые логические элементы, входящие в состав корпуса, не используются, то рекомендуется такие элементы включать так, чтобы на их выходах был высокий потенциал. Для этого входы неиспользуемых элементов ТТЛ серий, выполняющих операции И-НЕ и ИЛИ-НЕ, соединяют с общей (земляной) шиной. В таком состоянии элемент потребляет (рассеивает) минимальную мощность и его выход можно использовать как источник логической единицы на входах других схем.

Неиспользованные входы логического элемента ТТЛ серий можно оставлять свободными, но при этом снижается помехоустойчивость из-за воздействия наводок на свободные выходы. В сериях ТТЛ и ТТЛШ неиспользованные входы объединяют с другими используемыми входами, если это не ведет к превышению нагрузочной способности предыдущего каскада, либо подключают к источнику логической единицы.

В качестве источника логической единицы используют неиспользованные элементы, входы которых заземлены, или источник питания микросхемы, который подключают ко входу через резистор с сопротивлением 1 кОм, ограничивающий входной ток. К одному такому резистору обычно подключается до 20 неиспользованных входов.

Для уменьшения помех по цепи питания в точках подключения к шинам групп логических элементов включаются развязывающие керамические конденсаторы емкостью порядка 0,1 мкФ на один корпус. При большом числе одновременно переключаемых логических элементов скачки тока в цепи питания достигают десятков А. Поэтому между цепью питания и общей шиной устанавливаются электролитические конденсаторы большой емкости, которые компенсируют кратковременные импульсы тока и обеспечивают уменьшение взаимосвязей логических элементов через цепь питания.

Небольшие значения выходных сопротивлений элементов ТТЛ серий приводят к тому, что во время переключения схемы ток в цепи питания возрастает и может в несколько раз превышать ток, потребляемый схемой в статическом режиме. Поэтому при увеличении частоты переключения мощность, потребляемая ТТЛ схемой со сложным инвертором, растет, все это приводит к недопустимости соединения выходов нескольких схем.

Контрольные вопросы

1. Какие типы серий логических ИМС вам известны, как они классифицируются?
2. По каким характеристиками сравнивают серии ИМС?
3. Приведите сравнительные характеристики биполярных серий.
4. Что дает применение перехода Шоттки в логических элементах?
5. Где применяют логические элементы с открытым коллектором?
6. В чем достоинства и недостатки серий, использующих МОП и КМОП технологии?
7. МДП-транзисторы какого типа проводимости канала обладают большим быстродействием?
8. В чем принцип работы ЭСЛ-логики?
9. Как работает логическая схема на транзисторах с инжекционным питанием?
10. Приведите правила схемотехнического включения элементов.

Список использованных литературных источников

1. Москатов, Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
2. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
3. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие / К. С. Петров. – СПб. : Питер, 2003. – 512 с. : ил.
4. Кутыркин, Ю. М. Зарубежные интегральные микросхемы широкого применения : справочник / Ю. М. Кутыркин, А. В. Нефедов, А. М. Савченко ; под ред. А. А. Чернышева. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 144 с. : ил.
5. Гуртов, А. В. Твердотельная электроника : учеб. пособие / А. В. Гуртов. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2004. – 312 с.
6. Лаврентьев, Б. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учеб. пособие / Б. Ф. Лаврентьев. – Йошкар-Ола : МарГТУ, 2000. – 155 с.

РАЗДЕЛ 8. ГЕНЕРАТОРЫ

Содержание раздела

Генераторы гармонических колебаний. Общие сведения. Самовозбуждение генератора. LC-генераторы. Режимы самовозбуждения автогенераторов. Трехточечные автогенераторы гармонических колебаний. RC-генераторы. Стабилизация частоты в автогенераторах. Прочие типы генераторов. Магнетроны. Оптические квантовые генераторы (лазеры).

Мультивибраторы на аналоговых и логических элементах.

Методические указания [1, с 130 – 138, 258 – 285; 2, с 239 – 244; 3, с 179 – 186, 213 – 217; 4, с 496 – 511]

Используя материалы, изучить определения и классификацию электронных генераторов. Обратит внимание на области практического использования генераторов различных типов.

Изучить основные элементы структуры и теоретические особенности работы автогенераторов: условие баланса фаз и баланса амплитуд. Разобраться в особенностях режимов самовозбуждения. Уделить внимание практическим схемам автогенераторов, элементам реализации фазосдвигающих цепей и способам стабилизации частоты автогенераторов.

Изучить принцип работы магнетрона и лазеров.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите структурную схему генератора с внешним возбуждением и автогенератора. Что между ними общего и в чем разница?
2. Где используют генераторы специальной формы и мультивибраторы?
3. Можно ли усилитель превратить в автогенератор? Что для этого нужно выполнить?
4. Чем характерны мягкий и жесткий режимы самовозбуждения?
5. Какие характеристики и показатели генераторов вам известны?
6. Почему в настоящее время используют кварцевые резонаторы в генераторах?
7. Как устроен и работает магнетрон?
8. Расскажите, как работает мультивибратор на логических элементах.
9. Что такое таймер? Область применения таймеров.

Рекомендуемая литература

1. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и микросхемотехника : учеб. для электротехн. и энерг. вузов / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – М. : Высш. шк., 2002. – 384 с. : ил.
2. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
3. Карлащук, В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение / В. И. Карлащук. – М. : «Солон-Р», 1999. – 506 с.
4. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие / К. С. Петров. – СПб. : Питер, 2003. – 512 с. : ил.

Тема 16. Автогенераторы электрических колебаний

Термины: *генератор, автогенератор, мультивибратор, возбуждение, резонансная система, мягкий и жесткий режимы самовозбуждения, трехточка, фазосдвигающая цепь, кварцевый резонатор, пьезоэффект, магнетрон, лазер.*

- 16.1. Генераторы гармонических колебаний. Общие сведения**
- 16.2. Самовозбуждение генератора**
- 16.3. LC-генераторы**
- 16.4. Режимы самовозбуждения автогенераторов**
- 16.5. Трехточечные автогенераторы гармонических колебаний**
- 16.6. RC-генераторы**
- 16.7. Стабилизация частоты в автогенераторах**
- 16.8. Прочие типы генераторов. Магнетроны**
- 16.9. Оптические квантовые генераторы (лазеры)**

16.1. Генераторы гармонических колебаний. Общие сведения

Прежде чем приступить к анализу автогенераторов (автоколебательных систем), сформулируем основные понятия. Устройства, предназначенные для создания электрических колебаний, называют *генераторами*. С точки зрения режима работы их разделяют на автогенераторы и генераторы с внешним возбуждением.

Автогенератор (часто, просто *генератор*) – устройство, преобразующее энергию постоянного тока в энергию электрических колебаний требуемой частоты и формы.

Генератор с внешним возбуждением (в импульсной технике – *ждущий генератор*) переходит в режим генерации, формирования или усиления электрических колебаний только при поступлении на его вход сигналов возбуждения (запуска).

В зависимости от формы вырабатываемых напряжений различают *генераторы гармонических и релаксационных (импульсных) колебаний*. Генератор гармонических колебаний (к ним относятся и генераторы СВЧ колебаний) вырабатывает сигнал, в спектре которого присутствует практически одна гармоника. Выходные колебания релаксационного генератора содержат широкий спектр гармонических составляющих, часто имеющих соизмеримые амплитуды. Можно отметить и генераторы линейных *пилообразных* напряжений, которые относятся к релаксационным.

К импульсным устройствам относятся мультивибраторы, триггеры, одновибраторы, блокинг-генераторы, генераторы линейно изменяющегося напряжения.

Мультивибратор – это электронный узел для формирования импульсов прямоугольной формы с требуемыми параметрами.

Независимо от назначения, принципа действия и схемотехнического выполнения автогенератор любых перечисленных колебаний (кроме параметрических схем) состоит из *нелинейного усилителя, цепи положительной обратной связи (ОС) и источника питания постоянного тока*. Форма и частота выходных колебаний определяется только параметрами самого автогенератора, между тем как в генераторе с внешним возбуждением амплитуда и частота колебаний навязываются извне.

Генератор гармонических колебаний должен обязательно содержать *узкополосную колебательную систему*. Принцип действия релаксационных генераторов основан на зарядно-разрядных или накопительно-поглощающих явлениях, протекающих в *широкополосных энергоемких цепях* положительной обратной связи.

16.2. Самовозбуждение генератора

Рассмотрим условия самовозбуждения генератора гармонических колебаний. Для процесса возбуждения и генерации колебаний часть мощности с выхода усилителя (точнее, с колебательной системы) подается на его вход по цепи положительной ОС. Говоря другими словами, подобное устройство «возбуждает само себя» и поэтому называется *генератором с самовозбуждением*.

Механизм возникновения колебаний можно упрощенно трактовать следующим образом. При запуске в колебательной системе автогенератора

самопроизвольно возникают слабые свободные колебания, обусловленные включением источников питания, замыканием цепей, скачками токов и напряжений в усилительном приборе и т.д. Благодаря специально введенной цепи положительной ОС часть энергии колебаний, возникающих на выходе усилителя, поступает на его вход. Ввиду наличия узкополосной (обязательно высокочастотной) колебательной системы описанные процессы происходят на одной частоте ω_p и резко затухают на других частотах.

Вначале, после включения питания автогенератора, усиление сигнала происходит в линейном режиме, а затем, по мере роста амплитуды колебаний, существенную роль начинают играть нелинейные свойства усилительного элемента. В результате амплитуда выходных колебаний генератора, нарастая, достигает некоторого установившегося уровня и остается практически неизменной. Энергия, отбираемая у источника постоянного тока усилителем схемы за один период колебаний, оказывается равной энергии, расходуемой за то же время в нагрузке. В этом случае говорят о *стационарном режиме* работы автогенератора.

Автогенератор гармонических колебаний (как, впрочем, и колебаний любой формы и частоты) можно представить обобщенной структурной схемой (рис. 16.1), состоящей из нелинейного усилителя и цепи положительной ОС.

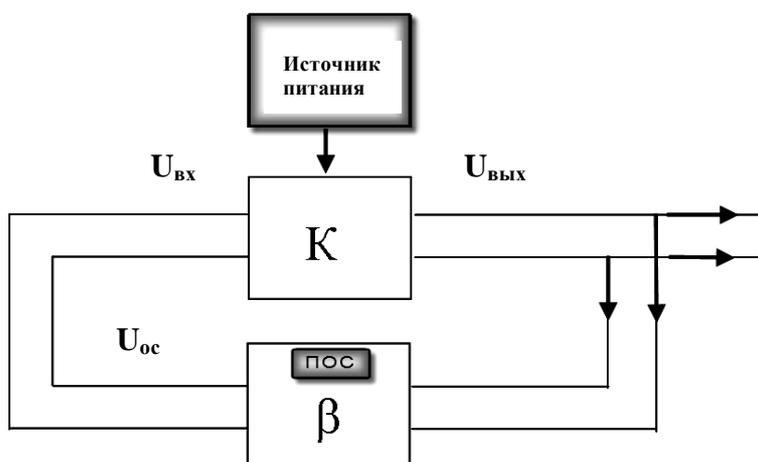


Рис. 16.1. Обобщенная структурная схема автогенератора

Выражение для напряжения ОС на любой частоте генерации ω запишем в виде:

$$U_{oc} = U_{ex} = \beta U_{вых}.$$

Тогда выходное напряжение $U_{вых} = KU_{ex}$ или $U_{вых} = K\beta U_{вых}$.

Автогенератор будет работать в стационарном режиме при условии, что

$$K\beta = 1.$$

Если же $K\beta > 1$, то амплитуда выходных колебаний будет непрерывно нарастать, что определяет необходимое условие самовозбуждения генератора.

Принимаем $\varphi_k(\omega) = \varphi_k$ и $\omega_\beta(\omega) = \omega_\beta$ – фазовые сдвиги, вносимые соответственно усилителем и цепью положительной ОС на текущей частоте ω .

В теории автогенераторов условие, описывающее стационарный режим работы, принято представлять в виде двух равенств:

$$K\beta = K_{oc} = 1;$$

$$\varphi_k = \varphi_\beta = 2\pi n,$$

где K_{oc} – коэффициент усиления усилителя с ОС; параметр $n = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Первое соотношение определяет *условие баланса амплитуд* в автогенераторе. Из него следует, что в стационарном режиме на генерируемой частоте коэффициент усиления усилителя с обратной связью K_{oc} равен единице.

Второе равенство характеризует *условие баланса фаз*. Оно показывает, что в стационарном режиме суммарные фазовые сдвиги сигнала на частоте генерации, создаваемые усилителем и цепью положительной ОС, должны быть равны (или кратны) 2π . Следует отметить, что только условие баланса фаз позволяет определить частоту генерируемых колебаний.

В схемах автогенераторов гармонических колебаний, работающих в стационарном режиме, соотношения выполняются на одной фиксированной частоте ω_p , которая является *резонансной* для узкополосной колебательной системы. При работе автогенератора негармонических колебаний условия должны выполняться для некоторой полосы частот.

Наиболее часто в автогенераторах гармонических колебаний в качестве узкополосных колебательных систем используются резонансные LC-контуры и частотно-зависимые (*фазирующие*) RC-цепи. Автогенераторы гармонических колебаний с упомянутыми резонансными контурами называют *LC-генераторами*, а с фазирующими RC-цепями – *RC-генераторами*. LC-генераторы способны вырабатывать колебания достаточно высокой частоты (более 100 кГц), а RC-генераторы используются для создания гармонических колебаний низкочастотного диапазона (от десятков кГц до единиц и даже долей Гц).

16.3. LC-генераторы

Условия самовозбуждения, механизм возникновения гармонических колебаний и зависимость их частоты от параметров схемы рассмотрим на примере современного LC-генератора на аналоговой интегральной микросхеме – операционном усилителе (ОУ) (рис. 16.2).

Усилитель автогенератора охвачен двумя цепями ОС, обеспечивающими режимы балансов амплитуд и фаз. Баланс амплитуд устанавливается цепью отрицательной ОС, содержащей резисторы R1 и R2. С ее помощью задается необходимый коэффициент усиления собственно усилителя $K = R_2/R_1$.

Баланс фаз обеспечивается цепью положительной ОС, состоящей из последовательно включенных резистора R и параллельного колебательно-го LC-контура. Коэффициент передачи цепи положительной ОС определяется формулой:

$$\beta = \frac{R_0}{R_0 + R},$$

где R_0 – резонансное сопротивление параллельного контура.

Характер выходного сигнала описывается уравнением гармонического колебания с экспоненциально изменяющейся амплитудой:

$$U_{\text{вых.}}(t) = U(0)e^{-\alpha t} \sin \omega_{\text{св.}} t,$$

где $U(0)$ – постоянная, определяемая начальными условиями; α – эквивалентный коэффициент затухания, а частота свободных колебаний в контуре

$$\omega_{\text{св.}} = \sqrt{\omega_p^2 - \alpha^2}.$$

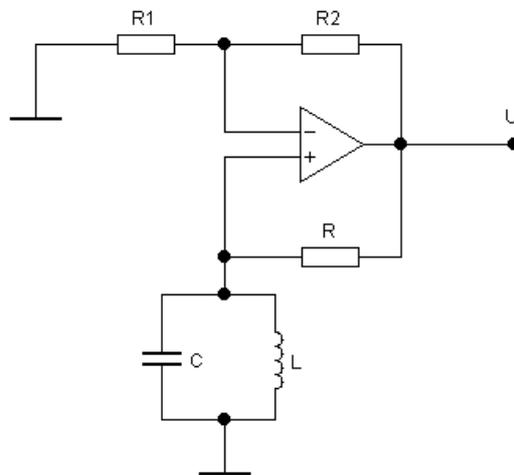


Рис. 16.2. Схема LC-генератора на ОУ

Характер возникновения и изменения амплитуды выходных колебаний зависит от величины и знака параметра α и, соответственно, – от коэффициента усиления K . При работе автогенератора возможны три специфических случая (рис. 16.3):

а) $\alpha = 0$ ($K = 0$). Генерируются выходные гармонические колебания с постоянной амплитудой и частотой (см. рис. 16.3, а).

б) $\alpha < 0$ ($K > 1$). Возникают выходные колебания, амплитуда которых нарастает по экспоненциальному закону (см. рис. 16.3, б).

в) $\alpha > 0$ ($K < 1$). Амплитуда выходных колебаний генератора затухает по экспоненциальному закону (см. рис. 16.3, в).

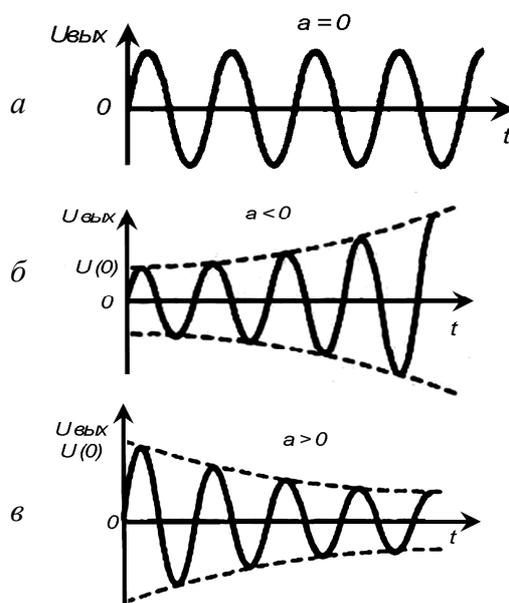


Рис. 16.3. Характер изменения амплитуды колебаний в LC-генераторе

Несложный анализ выведенных положений показывает, что самовозбуждение автогенератора, как и следовало ожидать, возможно при коэффициенте усиления $K > 1$. Амплитуда выходного колебания в этом случае будет нарастать до перехода усилителя в нелинейный режим усиления. Из-за нелинейности амплитудной характеристики усилителя с цепью положительной ОС величина K_{oc} будет автоматически уменьшаться до единицы и завершится переводом автогенератора в стационарный режим. Отметим, что реальная форма кривой выходного колебания несколько отличается от синусоидальной. Однако на достаточно высоких частотах несложно реализовать колебательный контур с большой добротностью, поэтому выходное колебание может быть практически синусоидальным с частотой колебаний $\omega_p = \omega_{св.}$

16.4. Режимы самовозбуждения автогенераторов

Чтобы выявить особенности *самовозбуждения* автогенератора и определить *стационарную амплитуду* выходных колебаний, наиболее удобно использовать метод совместного анализа амплитудной характеристики собственно усилителя K и прямой линии ОС $\beta = U_{oc}/U_{вых.}$, отражающей влияние цепи положительной ОС (рис. 16.4). Отметим, что амплитудная характеристика собственно усилителя в теории автогенераторов соответствует *колебательной характеристике*. Сущность метода традиционна и заключается в том, что схему автогенератора (см. рис. 16.2) мысленно (и по существу) разделяют на две цепи – линейную и нелинейную. Линейная цепь представляет собой петлю положительной ОС, а нелинейная цепь – собственно усилитель (ОУ и цепь отрицательной ОС).

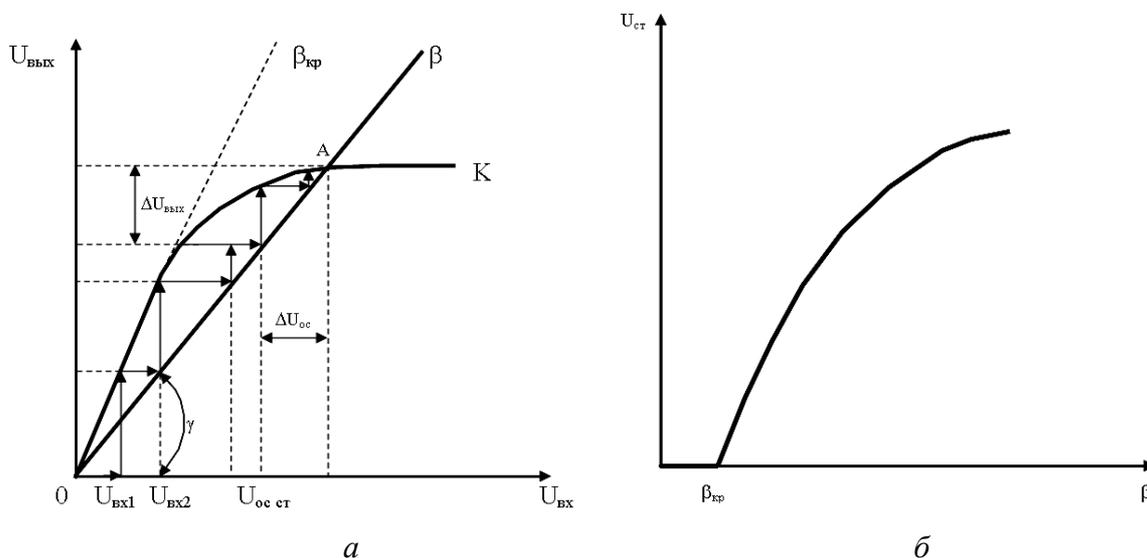


Рис. 16.4. Мягкий режим самовозбуждения автогенератора:
 а – графики амплитудной характеристики и линии обратной связи;
 б – зависимость амплитуды $U_{ст}$ от коэффициента передачи β

Мягкий режим самовозбуждения. Обратимся к типичному виду амплитудной характеристики нелинейного усилителя, созданного на ОУ (см. рис. 16.4, а). Из графика следует, что при малой амплитуде входного напряжения усилитель работает в линейном режиме и $U_{вых.}/U_{вх.} = K$. С ростом же этой амплитуды начинает проявляться нелинейность передаточной характеристики ОУ и коэффициент усиления K (а, значит, и выходное напряжение) будет практически постоянным и даже может уменьшаться. На линейном участке напряжение ОС $U_{oc} = U_{вх.}$ линейно связано с выходным

напряжением $U_{вых.}$ и определяется коэффициентом передачи цепи положительной ОС β (ведь $U_{ос} = \beta U_{вых.}$). Это напряжение действует на входе усилителя, поэтому линия ОС (зависимость $U_{вых.}$ от $U_{ос}$) проводится на том же графике в виде прямой линии β под углом $\gamma = \arctg(1/\beta)$ к оси абсцисс (см. рис. 16.4, а).

Несложный анализ графиков амплитудной характеристики и линии ОС позволяет пояснить возникновение, развитие и установление колебательного процесса в автогенераторе. Графически результат анализа показан стрелками на рис. 16.4, а. Положим, что на вход усилителя воздействует небольшое входное напряжение $U_{вх.1}$. Тогда после усиления в K раз на выходе генератора появится напряжение $U_{вых.1}$. Это напряжение, ослабленное цепью положительной ОС в β раз, поступает на вход усилителя в виде напряжения $U_{вх.2}$. Затем оно, в свою очередь, усилится до напряжения $U_{вых.2}$. Подобный процесс будет протекать до тех пор, пока амплитуда выходного колебания не достигнет стационарного значения, при котором выполняется условие баланса амплитуд.

Стационарную амплитуду автоколебаний можно определить по координатам точки пересечения амплитудной характеристики усилителя с линией ОС (точка А на рис. 16.4, а). Нетрудно заметить, что точка А является точкой устойчивого равновесия, и при случайном отклонении амплитуды выходного напряжения от стационарного значения $U_{ст.}$ автогенератор всегда возвращается в исходное состояние.

Если плавно увеличивать коэффициент передачи β (уменьшать наклон линии β), то, начиная с некоторого критического значения $\beta_{кр}$, амплитуда стационарного колебания $U_{ст}$ будет нарастать (см. рис. 16.4). Такой режим самовозбуждения автогенератора называют *мягким*. Для его обеспечения амплитудная характеристика усилителя должна выходить из нуля и иметь достаточно большой угол наклона к оси абсцисс в начале координат. Мягкий режим характерен тем, что подбором величины коэффициента передачи β можно установить любую, даже очень небольшую (близкую к уровню шумов) стационарную амплитуду выходных колебаний. В мягком режиме самовозбуждения на выходе автогенератора возникают колебания при появлении на входе его усилителя очень малых уровней шумовых или импульсных напряжений.

Жесткий режим самовозбуждения. Другая картина процессов наблюдается в автогенераторах, амплитудная характеристика усилителя которых имеет S-образную форму (рис. 16.5, а). Такой амплитудной характеристикой обладает усилитель при расположении его рабочей точки на не-

линейном участке передаточной характеристики ОУ. Для самовозбуждения этих автогенераторов требуется очень сильная положительная ОС, и выходные колебания возникают мгновенно – скачком.

Очень резкое «взрывное» самовозбуждение автогенератора происходит при значении коэффициента передачи цепи ОС $\beta = \beta_1$, когда линия ОС (линия 1) касается снизу амплитудной характеристики в точке 0. Генерация колебаний срывается скачком при величине коэффициента передачи β , меньшей β_2 , когда линия обратной связи (линия 2 на рис. 16.5, а) становится касательной к выпуклой части амплитудной характеристики. На графиках рис. 16.5, а точка А отражает стационарный режим работы автогенератора, а точка С – режим неустойчивого равновесия. Такое положение объясняется следующим образом. При амплитудах выходных колебаний автогенератора, располагающихся на графиках ниже точки С, колебания затухают, а при амплитудах колебаний, находящихся выше точки С, будут нарастать и достигнут стационарной амплитуды в точке А.

Чтобы вновь возбудить автогенератор, необходимо опять увеличить коэффициент передачи цепи положительной ОС β до значения β_1 , соответствующего положению линии 1. Такой режим самовозбуждения автогенератора называют *жестким*. На рис. 16.5, б показана зависимость стационарной амплитуды $U_{ст}$ от величины коэффициента передачи цепи положительной ОС, причем стрелками показано направление изменения β .

Жесткий режим самовозбуждения автогенератора неэффективен, считается нежелательным и применяется крайне редко.

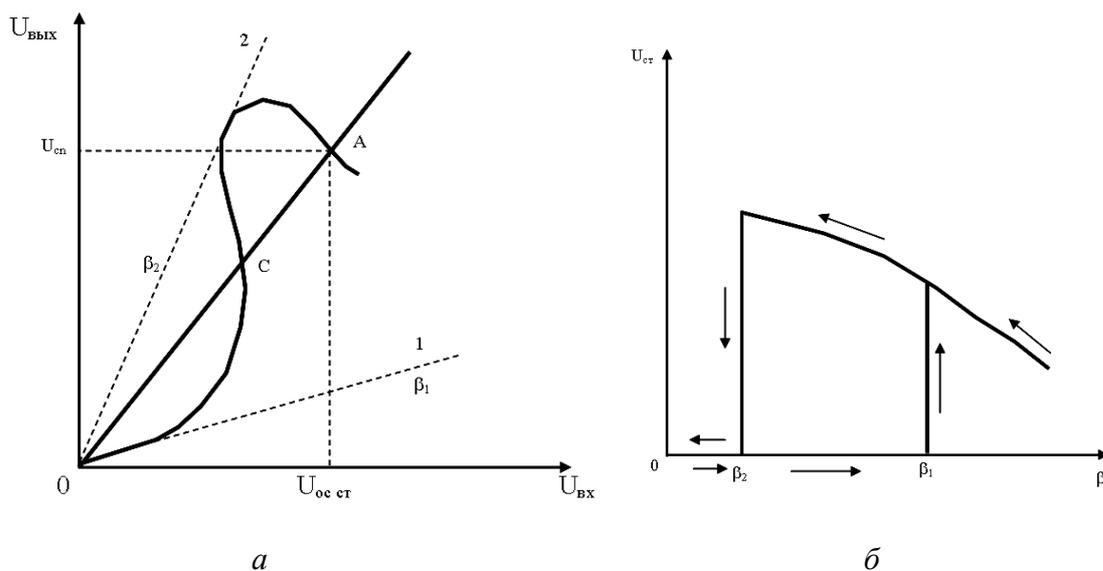


Рис. 16.5. Жесткий режим самовозбуждения автогенератора:
 а – графики амплитудной характеристики и линии обратной связи;
 б – зависимость амплитуды $U_{ст}$ от коэффициента передачи β

16.5. Трехточечные автогенераторы гармонических колебаний

В большинстве схем LC-генераторов напряжение обратной связи снимается с части колебательного контура, т.е. используется неполное включение. Поскольку контур при этом имеет три точки соединений (выводов), то схемы LC-генераторов (рис. 16.6) получили название *трехточечных*.

Упрощенная структурная схема трехточечного автогенератора, построенного на неинвертирующем усилителе, представлена на рис. 16.6, а. В схеме реактивные элементы Z_1, Z_2, Z_3 образуют колебательную систему (резонансный контур), с помощью которой создается частотно-зависимая положительная ОС. В реальных схемах автогенераторов индуктивности и емкости контуров имеют малые омические потери, поэтому при анализе можно учитывать только их реактивные сопротивления x_1, x_2 и x_3 .

$$\beta = \frac{U_{ос}}{U_{вых.}} = \frac{U_{вх.}}{U_{вых.}} = \frac{z_1}{z_1 + z_3} = \frac{x_1}{x_1 + x_3}.$$

В схеме LC-генератора (см. рис. 16.6, б), известной в радиотехнике под названием *индуктивной трехточки*, индуктивная ветвь параллельного контура содержит индуктивности L_1 и L_3 . Напряжение ОС с индуктивности L_1 поступает на неинвертирующий вход ОУ. Поскольку знаки мгновенных значений напряжений на индуктивностях L_1 и L_3 относительно их общей точки соединения одинаковы, то ОС будет положительной. В емкостной ветви колебательного контура включен конденсатор C_2 . По аналогии с индуктивной трехточкой можно построить автогенератор с *емкостной трехточкой* (см. рис. 16.6, в). В данной схеме емкостная ветвь колебательного контура содержит конденсаторы C_1 и C_3 . Напряжение ОС с конденсатора C_1 поступает на неинвертирующий вход усилителя. При таком включении конденсаторов в колебательный контур полярности мгновенных значений напряжений на их обкладках относительно общей точки соединения одинаковы, поэтому ОС в схеме – положительная.

Широкое применение в радиотехнике и системах связи находят также автогенераторы, в которых операционные усилители включены по инвертирующей схеме. При этом достаточно в схемах на рис. 16.6, б, в поменять местами индуктивность L_1 и емкость C_1 .

Настройку LC-генератора на требуемую частоту осуществляют обычно изменением небольшой емкости дополнительного конденсатора, включенного параллельно основному конденсатору резонансного контура. В современных автогенераторах для изменения частоты колебаний применяют варикапы и подстройку или даже перестройку частоты производят с их помощью электронным способом.

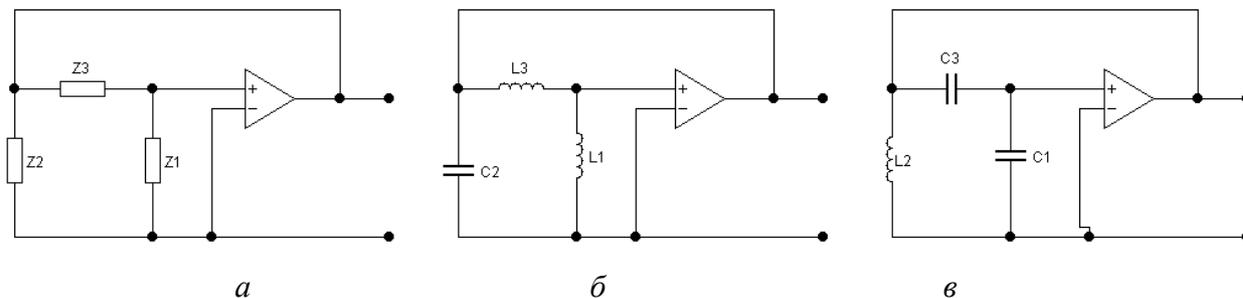


Рис. 16.6. Схемы трехточечных автогенераторов:
a – структурная; *б* – индуктивная трехточка; *в* – емкостная трехточка

16.6. RC-генераторы

Технические характеристики LC-генераторов в диапазонах достаточно низких частот существенно ухудшаются из-за резкого возрастания величин индуктивностей и емкостей колебательных контуров и соответствующих им размеров катушек индуктивностей и конденсаторов. Поэтому в низкочастотных автогенераторах в качестве колебательных систем и цепей положительной ОС используют частотно-избирательные *RC-цепи*.

Практически все современные RC-генераторы малой и средней мощностей (до десяти – пятнадцати ватт) строятся на ОУ.

Напряжение положительной обратной связи в RC-генераторах на операционных усилителях можно подавать как на инвертирующий, так и на неинвертирующий входы. В схемах RC-генераторов с неинвертирующим включением операционного усилителя частотно-избирательная цепь положительной ОС не должна вносить фазового сдвига в выходной сигнал. В RC-генераторах с инвертирующим включением ОУ, наоборот, RC-цепь положительной обратной связи на частоте генерации должна сдвигать фазу выходных колебаний на угол $\varphi_{\beta} = \pi$.

Наиболее распространены в радиоэлектронике и технике связи низкочастотные автогенераторы двух видов – с фазосдвигающей RC-цепью и с мостом Вина.

Автогенератор с фазосдвигающей RC-цепью

Такой автогенератор содержит инвертирующий усилитель и трехзвенную RC-цепь положительной ОС (рис. 16.7, *a*).

Из курса теории цепей известно, что данная трехзвенная RC-цепь (ее называют *R-параллель*) имеет типовые частотную $\beta(f)$ и фазовую $\varphi_{\beta}(f)$ характеристики, показанные на рис. 16.7, *б*. Анализ графиков частотной и фазовой характеристик показывает, что на *квазирезонансной* (напомним –

якобы резонансной) циклической частоте генерации f_k трехзвенная RC-цепь положительной ОС имеет вещественное значение коэффициента передачи $\beta = 1/29$ и вносит фазовый сдвиг $\varphi\beta = \pi$. Поэтому для обеспечения в автогенераторе баланса амплитуд необходимо выбирать коэффициент усиления усилителя $|K| = R2/R1 \geq 29$, а баланс фаз обеспечивается автоматически путем инвертирующего включения ОУ.

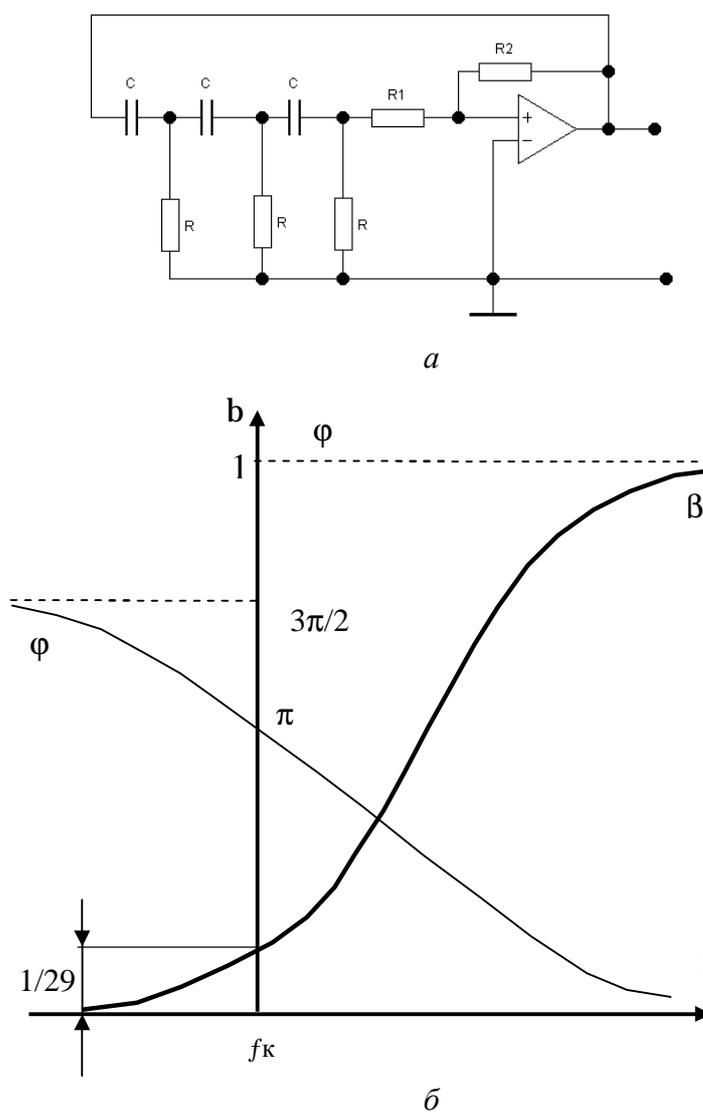


Рис. 16.7. Автогенератор с трехзвенной RC-цепью:
a – схема; *б* – частотная и фазовая характеристики

Можно показать, что квазирезонансная частота генерации для схемы с идеальным ОУ (см. рис. 16.7, *a*) определяется формулой:

$$f_k = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}.$$

Как следует из этой формулы, частота генерации зависит только от параметров цепи ОС K и C (т.е. внешних элементов усилителя). Недостатки RC-генератора на инвертирующем усилителе с трехзвенной RC-цепью – довольно большое количество элементов в петле положительной ОС и, как следствие, трудность перестройки частоты генерации в широком диапазоне. Поэтому чаще применяют автогенераторы с неинвертирующим включением операционного усилителя и мостом Вина в цепи положительной ОС.

RC-генератор с мостом Вина

Данный автогенератор имеет более компактную структуру построения схемы. В ней цепь положительной ОС включается между выходом и неинвертирующим входом ОУ (рис. 16.8, *a*).

Мост Вина представляет собой частотно-избирательную последовательно-параллельную RC-цепь, состоящую из двух емкостей C и двух сопротивлений R . Из графика частотной характеристики следует, что на квазирезонансной частоте генерации коэффициент передачи моста Вина $\beta = 1/3$. Значит, самовозбуждение автогенератора обеспечивается при коэффициенте усиления усилителя $|K| = R_2/R_3 > 3$.

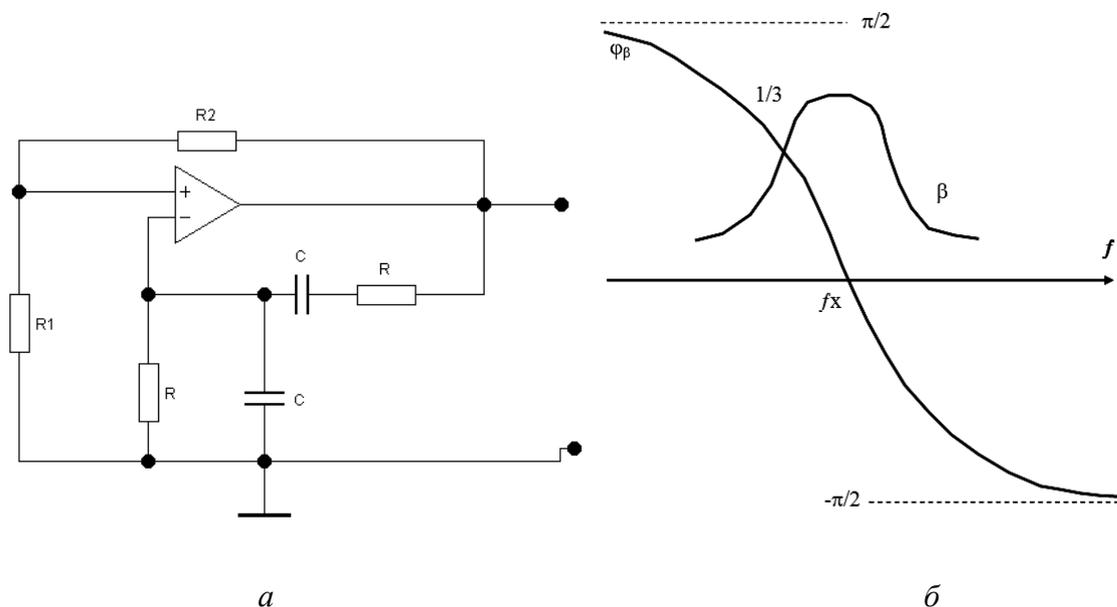


Рис. 16.8. RC-генератор с мостом Вина:
a – схема; *б* – частотная и фазовая характеристики

Фазовый сдвиг в выходном сигнале отсутствует ($\varphi_{\beta} = 0$) только на квазирезонансной частоте (см. рис. 16.8, б), которая определяется известной формулой:

$$f_k = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Перестройка частоты в схеме осуществляется обычно с помощью сдвоенного конденсатора.

16.7. Стабилизация частоты в автогенераторах

Наиболее важным требованием, предъявляемым к автогенераторам, является высокая стабильность частоты выходных колебаний. Это связано с тем, что во время работы любого автогенератора частота колебаний флюктуирует в некоторых пределах по случайному закону под воздействием различных дестабилизирующих факторов: изменений температуры, влажности и напряжения питания, наличия внешних электромагнитных полей, механических воздействий и пр. Влияние дестабилизирующих факторов проявляется в изменениях величин индуктивностей катушек, емкостей конденсаторов и сопротивлений резисторов, входящих в состав колебательных контуров и частотно-избирательных RC-цепей.

Качество работы автогенераторов принято оценивать *абсолютной и относительной нестабильностями частоты*. Абсолютная нестабильность представляет собой разность Δf между текущим f и номинальным f_p (или f_k) значениями частоты колебаний. Относительная нестабильность частоты определяется *коэффициентом нестабильности* $\Delta f/f_p$ или $\Delta f/f_k$.

В схемах автогенераторов гармонических (часто и импульсных) колебаний применяют два основных способа стабилизации частоты: параметрический и кварцевый.

Параметрический способ стабилизации частоты

Данный способ стабилизации частоты заключается в ослаблении влияния дестабилизирующих факторов и подборе высокочастотных и прецизионных элементов колебательных контуров автогенераторов. Для исключения влияния температуры на параметры усилительных элементов автогенераторы в отдельных случаях помещают в термостаты. Уменьшение влияния механических воздействий обеспечивает применение печатного монтажа и проводов индуктивностей, вжигаемых в керамику. Параметри-

ческая стабилизация частоты позволяет снизить нестабильность до 10^{-5} (уход частоты на $\Delta f = 10$ Гц при генерируемых колебаниях $f_p = 1$ МГц).

Кварцевая стабилизация частоты

Данный способ стабилизации основан на применении в электрических схемах вместо LC-контуров кварцевого резонатора, что позволяет снизить нестабильность частоты колебаний автогенератора до 10^{-7} (отклонение частоты на $\Delta f = 0,1$ Гц от генерируемой в 1 МГц).

Кварцевый резонатор (сокращенно *кварц*) представляет собой помещенную в *кварцедержатель* тонкую прямоугольную пластинку минерала кварца, грани которой определенным образом ориентированы по отношению к осям кристалла. Из физики известно, что кварц обладает прямым и обратным *пьезоэлектрическим эффектом* (проще – *пьезоэффектом*). Прямой пьезоэффект возникает при механическом сжатии или растяжении кварцевой пластинки и сопровождается появлением на ее противоположных гранях электрических зарядов.

При воздействии на кварцевую пластинку переменного электрического поля в ней возникают упругие механические колебания (*обратный пьезоэффект*), приводящие, в свою очередь, к появлению электрических зарядов на гранях пластинки. Кварц можно рассматривать как электромеханическую колебательную систему и сравнивать ее свойства с обычным колебательным LC-контуром (рис. 16.9). Добротность кварцевого резонатора достигает сотен тысяч, тогда как у колебательного контура она не превышает 300...400. Механическая прочность и слабая зависимость частотных свойств от температуры обуславливают достаточно высокую эталонность частоты кварцевых резонаторов.

При расчетах кварцевый резонатор представляют эквивалентной схемой (см. рис. 16.9, а), в которой элементы $L_{кв}$, $C_{кв}$ и $R_{кв}$ характеризуют, соответственно, индуктивность, емкость и омические потери собственно кварца. Емкость $C_{ок}$ отражает наличие кварцедержателя. Зависимость реактивного сопротивления кварцевого резонатора от частоты $x(f)$ приведена на рис. 16.9, б. Она имеет два резонанса: последовательный на частоте f_{k1} и параллельный на частоте f_{k2} . Последовательный резонанс обеспечивают элементы $L_{кв}$ и $C_{кв}$, отражающие резонансную частоту кварца.

$$f_{k1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{кв}C_{кв}}}.$$

Параллельный резонанс в устройствах с кварцевым резонатором практически не используется. Эквивалентная схема кварцевого резонатора – на рис. 16.10.

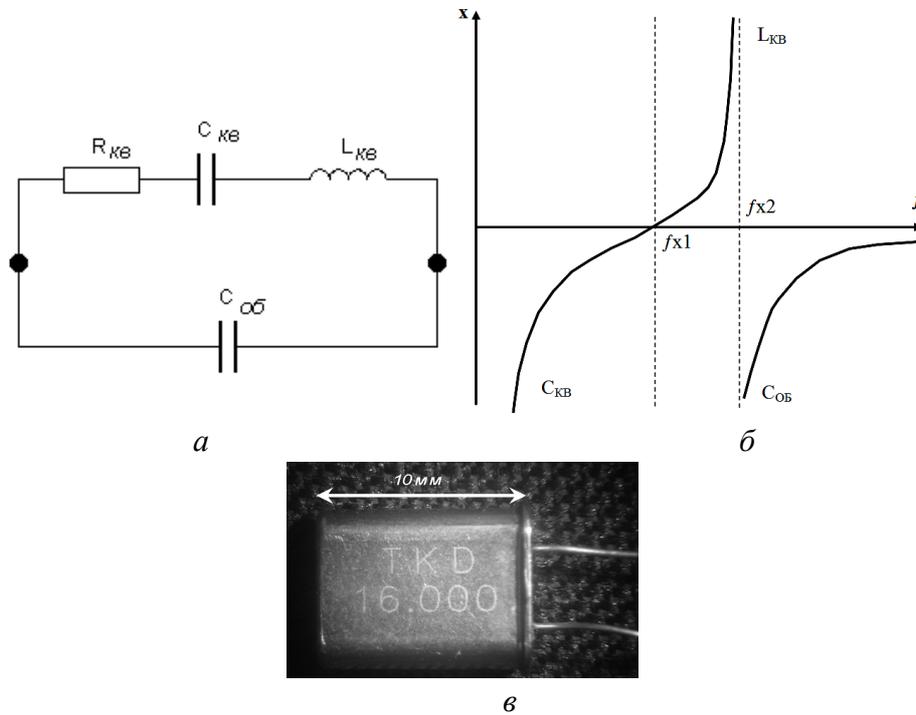


Рис. 16.9. Кварцевый резонатор:
а – эквивалентная схема; *б* – зависимость реактивного сопротивления от частоты; *в* – внешний вид и размеры

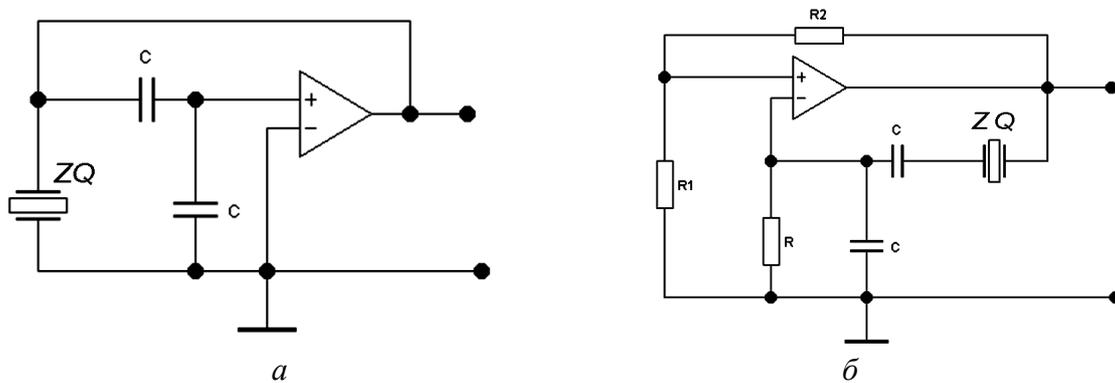


Рис. 16.10. Схемы кварцевых автогенераторов:
а – кварц – аналог индуктивности; *б* – кварц включен в мост Вина в качестве сопротивления

16.8. Прочие типы генераторов. Магнетроны

Одним из наиболее распространенных СВЧ-генераторов является магнетрон (от греч. *magnetis* – магнит). Магнетроны позволяют получить мощность в импульсе, измеряемую мегаваттами. Подобные магнетроны чаще всего используются в радиолокации. Другой областью применения

магнетронов является СВЧ-нагрев различных материалов. Такие магнетроны обладают непрерывной мощностью генерации от единиц до сотен ватт и используются также в промышленности и в бытовой технике (СВЧ-печи).

По своей структуре магнетрон представляет собой двухэлектродную лампу (рис. 16.11, а), в которой электроны движутся под действием двух взаимно перпендикулярных полей: электрического и магнитного. Под действием известной силы Лоренца траектории движения электронов искривляются. В теле анода (анодного блока) делают симметрично расположенные по окружности отверстия или прорезы (см. рис. 16.11, б), в результате чего анод превращается в несколько (от 6 до 40) связанных между собой резонаторов СВЧ. Часть анодного блока, заключенная между двумя соседними прорезями, называется *сегментом*.

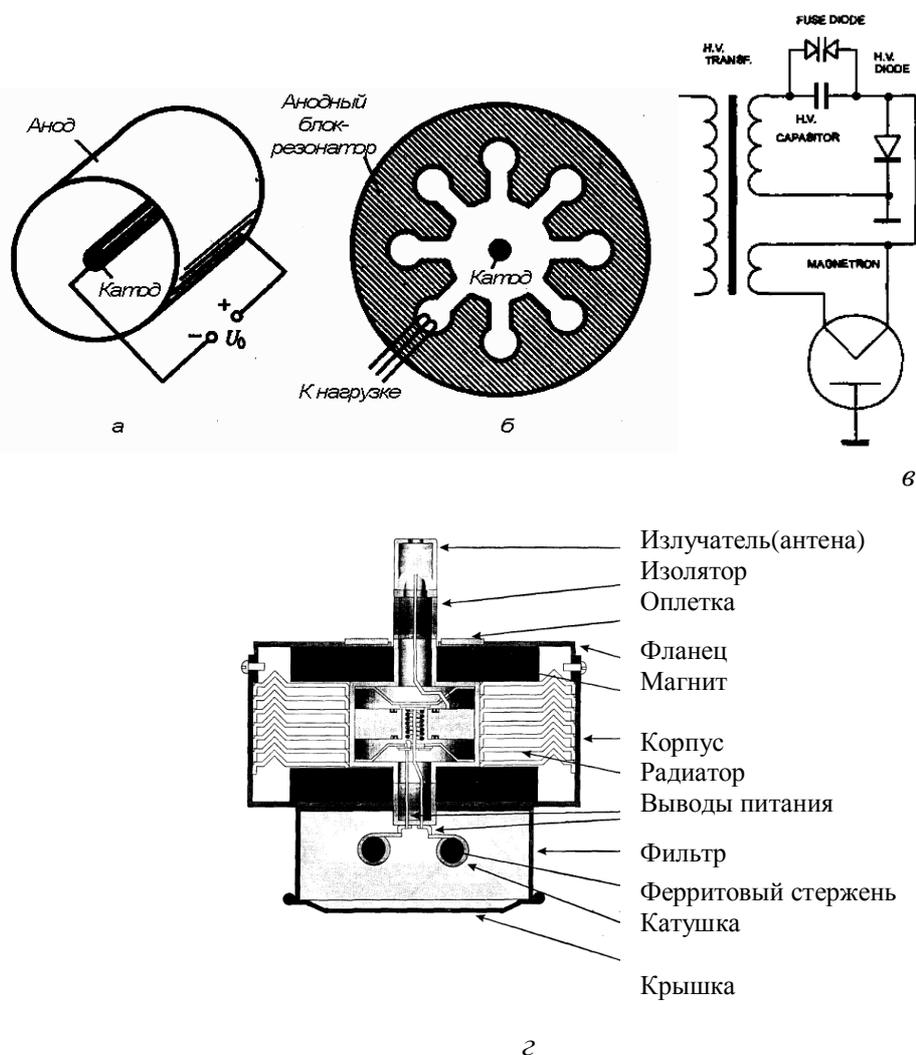


Рис. 16.11. Магнетрон: а – структура; б – анодный блок; в – схема включения и УГО; з – конструкция

СВЧ-колебания в магнетроне поддерживаются за счет энергии источника постоянного напряжения U_0 , включенного между анодом и катодом (см. рис. 16.11, а). С помощью электронного потока, ускоряемого постоянным электрическим полем между анодом и катодом и взаимодействующего с переменным электрическим полем вблизи щелей резонаторов, энергию от источника напряжения удастся передать потоку электронов, а затем полю волны в резонаторе. Такую направленную передачу энергии можно осуществить, как известно из теории клистрона, если электронный поток взаимодействует с переменным электрическим полем определенной фазы. Для этого электронный поток должен быть сгруппирован в сгустки, время прохождения которых вблизи щели резонатора совпадало бы со временем существования там поля в нужной фазе.

В магнетроне движение электронов от катода к аноду происходит не во всех азимутальных направлениях равномерно, что связано с различием знаков переменного напряжения на сегментах. Потоки электронов к аноду создаются лишь в некоторых областях пространства взаимодействия между анодом и катодом, образуя так называемые *электронные спицы* (рис. 16.12). Количество спиц зависит от характера высокочастотных колебаний и в наиболее распространенном случае работы магнетрона равно половине числа резонаторов. Электроны в спице перемещаются от катода к аноду по сложным петлеобразным траекториям, поскольку характер их движения определяется суммарным воздействием постоянного и переменного электрических полей и постоянного магнитного поля. Спицы вращаются в пространстве со скоростью, зависящей от частоты колебаний и фазовых соотношений для полей двух соседних резонаторов. В моменты прохождения спицы мимо резонатора электроны передают часть своей энергии полю резонатора. Электроны, отдавшие свою энергию полю, непрерывно уходят на анод, а спицы пополняются новыми электронами, эмитированными катодом.

Возбуждение колебаний в одном из резонаторов магнетрона приводит к возникновению колебаний в остальных. Энергия из колебательной системы отводится в нагрузку с помощью коаксиальной линии с петлей связи в резонаторе (см. рис. 16.11, б) или волноводной линии через щель в стенке резонатора, закрытую стеклянной или керамической вакуумной перегородкой.



Рис. 16.12. Конструкция резонатора и траектории движения электронов в магнетроне

16.9. Оптические квантовые генераторы (лазеры)

Наряду с внедрением волоконно-оптических линий связи современная радиотехника стала разрабатывать системы лазерной локации, лазерной медицины, лазерной обработки материалов, лазерного оружия, оптической голографии. В качестве генератора во всех этих устройствах используется *оптический квантовый генератор (ОКГ) – лазер* (аббревиатура слов английской фразы «*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*» – *LASER*).

Главный элемент лазера – *активная среда* (активное вещество). Упрощенный принцип действия лазера состоит в следующем. В каждом атоме относительно его ядра электроны могут занимать разные энергетические уровни. Обычно атом находится в невозбужденном состоянии и все электроны расположены на энергетических уровнях, соответствующих минимальным значениям энергии. При воздействии на атомы внешнего излучения или электрического разряда часть электронов может перейти на более удаленные электронные орбиты, которым уже соответствуют энергетические уровни с неминимальным значением энергии. Возникает инверсия населенностей уровней в активной среде возбужденных атомов.

Такая активная среда играет роль усилителя в схеме автогенератора. Когда на вход усилителя подается часть выходного напряжения в фазе с входным, на его выходе возникают генерируемые колебания большой амплитуды. Аналогичные процессы происходят и в лазере. При наличии инверсии населенностей под действием стимулирующего (внешнего) излучения в результате перехода в атомах возбужденных электронов на уровни невозбужденных происходит индуцированное (вынужденное или стимулированное) излучение. Излученные колебания точно совпадают по частоте, фазе, поляризации и направлению с вызвавшими их колебаниями. Иными словами, индуцированное излучение *когерентно* стимулирующему излучению.

Структурная схема лазера изображена на рис.16.13. Оптические резонаторы (обычно резонаторы Фабри – Перо) позволяют осуществить положительную обратную связь. Основное назначение этого резонатора –

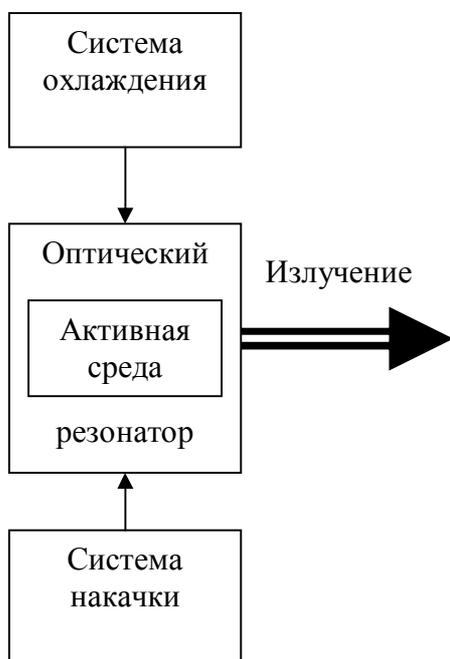


Рис. 16.13. Структурная схема лазера

обеспечить многократное прохождение индуцированного излучения через активную среду. Оптический резонатор представляет собой пару отражающих элементов (зеркал или призм полного внутреннего отражения), обращенных друг к другу. Между ними расположена активная среда (активное вещество). С других сторон объем резонатора ничем не ограничен, поэтому оптический резонатор часто называют открытым. Одно из зеркал делают полупрозрачным или с отверстием, через него луч лазера выходит наружу. Система накачки призвана обеспечить инверсную населенность в активной среде. Система

охлаждения служит для отвода рассеиваемой лазером мощности и в ряде случаев – для понижения температуры активной среды, поскольку многие мощные ОКГ работают при температурах жидкого азота или гелия.

В последнее время в науке и технике используют твердотельные, полупроводниковые, газовые и другие типы лазеров. В качестве активной среды для газовых лазеров применяют благородные газы: неон, аргон, криптон, ксенон, а также гелиево-неоновую смесь и СО. Газ находится в резонаторе Фабри – Перо. В газовом ОКГ атомы переводятся в возбужденное состояние с помощью электрического разряда. Типичная мощность излучения таких лазеров – от нескольких милливатт до нескольких киловатт в непрерывном режиме и до 100 кВт в импульсном режиме. Последние цифры относятся к ОКГ на СО, кпд которого достигает 10 %.

В ОКГ на твердом теле активная среда представляет собой стержень из кристалла (рубина, сапфира) или стекла, в который введена добавка из собственно активного лазерного вещества. Оба зеркала, образующие резонатор Фабри – Перо, наносятся в большинстве случаев на торцы кристаллического стержня. Для возбуждения атомов в твердотельных ОКГ требу-

ется энергия накачки – возбуждение некогерентным светом от специального источника, например, ксеноновых ламп. Импульсная мощность таких ОКГ достигает 100 кВт при длительности импульса 1 мс.

Полупроводниковый ОКГ представляет собой полупроводниковый диод (чаще всего из арсенида галлия). Диод состоит из кристалла с электронной проводимостью, в котором с помощью диффузии создана область с дырочной проводимостью (рис. 16.14). Подвод энергии и возбуждение лазерного вещества в полупроводниковом ОКГ осуществляются путем инжекции электронов и дырок (такой ОКГ часто называют «инжекционным»). Важной особенностью таких ОКГ является то, что они могут модулироваться непосредственно инжекционным током с частотой модуляции до нескольких гигагерц. Поскольку при возбуждении полупроводникового кристалла достигается высокая плотность энергии (до 10^6 Вт/см³), лазерные диоды можно делать весьма малых размеров (их длина составляет 0,1...1 мм). Разработаны также полупроводниковые ОКГ с электронным и оптическим возбуждением.

Мощность излучения полупроводниковых лазеров достигает 10 Вт при длительности импульса 10^{-2} ...1 мкс при комнатной температуре и увеличивается при снижении окружающей температуры.

В стадии лабораторных исследований и развития находятся жидкостные ОКГ. В самом ближайшем будущем практическое использование найдут химические ОКГ. Они работают без электрического питания – за счет энергии химической реакции с водородом возникает инверсия населенностей уровней. Выходная мощность может достигать 1,2 ГВт в импульсном режиме и 4,5 кВт в непрерывном.

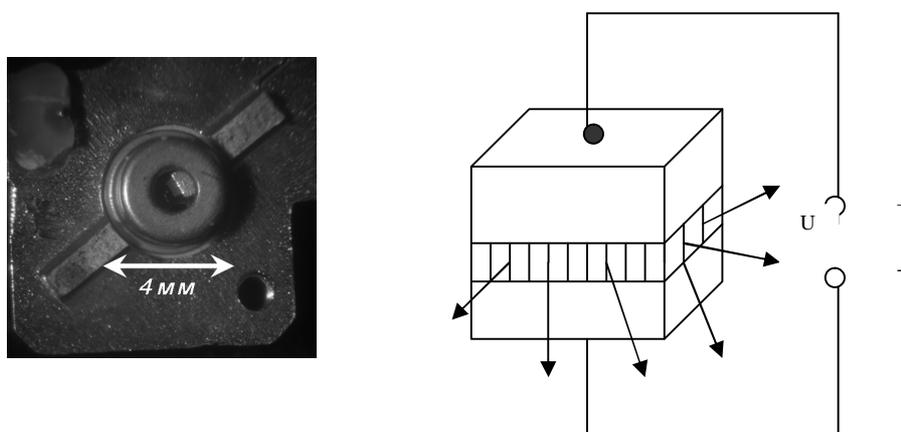


Рис. 16.14. Внешний вид, размеры и структурная схема твердотельного лазера

Контрольные вопросы

1. Дайте определения: что такое генератор, автогенератор, мульти-вibrator. Какие виды генераторов вам известны?
2. Какие структурные элементы входят в состав автогенераторов?
3. Что такое «условие баланса амплитуд» и «условие баланса фаз»?
4. Какие резонансные системы могут использоваться в автогенераторах?
5. Расскажите о режимах самовозбуждения генераторов.
6. Что такое трехточечный автогенератор, мост Вина?
7. Как поддерживают стабильность частоты автогенераторов?
8. Как работает магнетрон?
9. Состав лазера и принцип его работы.

Список использованных литературных источников

1. Нефедов, В. И. Основы радиоэлектроники и связи / В. И. Нефедов. – М. : Высш. шк., 2002. – 510 с.
2. Гуртов, А. В. Твердотельная электроника : учеб. пособие / А. В. Гуртов. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2004. – 312 с.
3. Жеребцов, И. П. Основы электроники. – 5-е изд., перераб. и доп. / И. П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с. : ил.
4. Сапунов, Г. С. Ремонт микроволновых печей / Г. С. Сапунов. – М. : СОЛОН, 1998. – 270 с. : ил.

РАЗДЕЛ 9. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

Содержание раздела

Физические основы работы электровакуумных приборов (ЭВП)

Электронная эмиссия. Виды эмиссии. Катоды электровакуумных приборов, основные типы катодов. Прохождение тока в вакууме.

Электронно-управляемые лампы.

Вакуумный диод. Принцип действия. Понятие об объемном заряде. Режим насыщения и режим ограничения тока объемным зарядом. Идеализированная и реальная анодные характеристики диода. Статические параметры. Основные типы диодов, области применения.

Трехэлектродная лампа. Устройство, роль сетки в триоде. Понятие о действующем напряжении и проницаемости сетки. Токораспределение в триоде. Статические характеристики триода. Статические параметры и определение их по характеристикам. Междуэлектродные емкости. Режим работы триода с нагрузкой, нагрузочные характеристики, параметры режима работы с нагрузкой. Статические характеристики и параметры многоэлектродных ламп; междуэлектродные емкости. Эквивалентные схемы электронных ламп на низких и высоких частотах.

Электронно-лучевые приборы

Устройство электронно-лучевой трубки. Элементы электронной оптики. Управление плотностью электронного луча. Электростатическая система фокусировки и отклонения луча. Магнитная система фокусировки и отклонения луча. Параметры экранов. Осциллографические, индикаторные трубки. Кинескопы. Устройство и принцип работы кинескопов. Цветные кинескопы.

Методические указания

Электровакуумные приборы [1, с. 224 – 230]

Необходимо знать устройство электронных ламп, назначение их отдельных элементов, принцип управления анодным током. Двухэлектродные лампы – [1, с. 230 – 236].

Необходимо тщательно разобраться в механизме влияния пространственного заряда электронов на величину анодного тока диода и на этой основе уяснить сущность режимов распределения пространственного заряда и насыщения.

Из-за наличия между катодом и анодом пространственного (объемного) заряда, созданного электронами, движущимися к аноду, анодный ток не прямо пропорционален анодному напряжению, а подчиняется закону степени

трех вторых. При изучении параметров диодов основное внимание следует уделять физическому смыслу и математической записи формул статических параметров. Необходимо четко представлять разницу между сопротивлением диода постоянному току и переменному току. Нужно уметь определять параметры диода по статическим характеристикам лампы и аналитически. Привести достоинства и недостатки двухэлектродных ламп по сравнению с полупроводниковыми диодами. В заключение необходимо ознакомиться с основными конструкциями и областями применения ЭВП.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроена и работает двухэлектродная лампа?
2. Напишите формулу закона степени $3/2$ и объясните смысл входящих в нее величин. При каких условиях выполняется этот закон в диоде?
3. Дайте определение основных статических параметров диода. Каков их физический смысл?
4. Чем ограничен максимальный анодный ток диода?
5. Какие факторы влияют на работу диода на высоких частотах?

Трехэлектродные лампы [1, с. 236 – 247]

Изучить принцип электростатического управления током с помощью сетки и понятие действующего потенциала.

Подробно разобраться в вопросах токораспределения в триодах при положительной сетке, четко представить связь токораспределения в режимах прямого перехвата и возврата электронов.

Уделить особое внимание изучению статических характеристик и параметров триода. В результате изучения необходимо понимать физический смысл, знать соотношение между основными статическими параметрами S , R_i , μ , а также уметь определять их по характеристикам.

Вопросы для самопроверки

1. Какую роль играет сетка в триоде?
2. Что такое действующий потенциал в триоде и как он определяется? Напишите формулу закона степени $3/2$.
3. Нарисуйте анодные, анодно-сеточные, сеточные и сеточно-анодные характеристики. Поясните ход характеристик.
4. Расскажите о токораспределении в триоде.
5. Дайте определение статических параметров триода, поясните их физический смысл.
6. Что такое рабочий режим триода?

7. Как графически построить рабочую (динамическую) анодно-сеточную характеристику, используя семейство статических анодных характеристик и уравнение нагрузочной прямой?

8. Какими параметрами характеризуется работа триода в режиме усиления напряжения?

9. Какие междуэлектродные емкости существуют в триоде?

Электронно-лучевые приборы [1, с. 282 – 336; 2, с. 201 – 213; 3, с. 107 – 124]

Изучить принцип действия, конструкции прожекторов ЭЛТ с электростатической фокусировкой и прожектора с магнитной фокусировкой луча, экраны электронно-лучевых приборов: устройство и их параметры.

Изучить электронно-лучевые трубки специального назначения: индикаторные, кинескопы.

Вопросы для самопроверки

1. Расскажите об устройстве трубки с электростатической фокусировкой и электростатическим отклонением луча.

2. Расскажите об устройстве трубки с электромагнитной фокусировкой и с магнитным отклонением луча.

3. Как устроен прожектор современной осциллографической трубки?

4. Каковы преимущества и недостатки системы магнитной фокусировки по сравнению с системой электростатической фокусировки?

5. Как отводится электрический заряд с экрана трубки?

6. Назовите основные параметры экранов ЭЛТ.

7. Как устроен кинескоп? Чем отличаются конструкции монохромных и цветных кинескопов?

Рекомендуемая литература

1. Электронные приборы / А. Л. Булычев [и др.]. – М. : ЛайтЛтд, 2000. – 416 с. : ил.

2. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 1991. – 622 с. : ил.

3. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : Учеб. пособие / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.

Тема 17. Электровакуумные и лучевые приборы

Термины: *ЭВП, ГРП, баллон, подогреватель, сетка, работа выхода, эмиссия, накал, закон степени трех вторых, триод, проникаемость, ЭЛТ, фокусировка, ускоряющий электрод, люминофор, кинескоп, отклоняющая система.*

17.1. Введение в эмиссионную электронику

17.2. Основы эмиссионной электроники

17.3. Электровакуумный диод, устройство и принцип действия

17.4. Основные параметры электровакуумного диода

17.5. Триоды

17.6. Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим управлением

17.7. ЭЛТ с электромагнитным управлением

17.8. Кинескопы

17.9. Цветные кинескопы

17.1. Введение в эмиссионную электронику

Электровакуумным прибором называется устройство, в котором рабочее пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой (баллоном), имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (парами или газами) и действие которого основано на электрических явлениях, связанных с движением заряженных частиц в вакууме или газе.

В соответствии с характером рабочей среды электровакуумные приборы подразделяются на электронные и ионные (газоразрядные).

Электронный электровакуумный прибор (ЭВП) – это прибор, в котором электрический ток обусловлен движением только свободных электронов в вакууме.

Семейство электронных вакуумных приборов весьма обширно и объединяет такие группы приборов, как электронные лампы, электронно-лучевые приборы, электровакуумные фотоэлектронные приборы и др.

Ионный электровакуумный прибор – это прибор, принцип действия которого основан на использовании свойств электрического разряда в газе или парах металлов. Эти приборы называют также *газоразрядными (ГРП)*. К ним относятся газоразрядные приборы дугового, тлеющего, высокочастотного разрядов и др.

Любой электровакуумный и газоразрядный прибор состоит из системы электродов, предназначенных для управления физическими процессами внутри баллона, отделяющего внешнюю среду от рабочего внутреннего пространства прибора.

В каждом типе электровакуумных и газоразрядных приборов создаются свои специфические системы электродов. Однако ряд электродов имеется во всех типах электровакуумных и большинстве типов газоразрядных приборов. К таким электродам относятся *катоды* – электроды, испускающие (эмитирующие) электроны, и *аноды* – электроды, собирающие электроны. Для управления потоками заряженных частиц во многих приборах используются управляющие электроды, которые выполняются в виде сеток или профилированных пластин, и специальные электромагнитные элементы конструкции (катушки). В приборах отображения информации в наглядной (визуальной) форме (электронно-лучевые трубки, индикаторы и др.) широко используются специальные конструктивные элементы, которые называют *экранами*. С помощью экранов энергия электронного потока или электрического поля преобразуется в оптическое излучение (свечение) тела. Конструкции электродов очень разнообразны и определяются назначением приборов и условиями их работы.

Баллоны электровакуумных и газоразрядных приборов изготавливают самой разнообразной формы из стекла, металла, керамики, а также из различных комбинаций этих материалов. Выводы от электродов делаются через цоколь, торцевые и боковые поверхности баллонов.

17.2. Основы эмиссионной электроники

Работа выхода. Чтобы сформировать поток свободных электронов, перемещающихся в вакууме или газе под действием электрических и магнитных полей, необходимо обеспечить выход электронов из твердого тела, чаще всего металла или полупроводника. Испускание электронов твердым телом называется *эмиссией* и осуществляется путем подведения к телу энергии от внешнего источника. Энергия, равная разности энергии E_0 электрона, покоящегося в свободном пространстве на расстоянии, где силами, действующими на электрон со стороны поверхности твердого тела, можно пренебречь, и энергии E_ϕ , соответствующей уровню электрохимического потенциала системы электронов в твердом теле (уровню Ферми), $A = E_0 - E_\phi$, называется *работой выхода* (выражается в вольтах).

Для уменьшения работы выхода на поверхность металлической основы (керна) наносят вещество с меньшей работой выхода, электроны которого переходят в керн. Вследствие этого на поверхности катода появля-

ются положительные ионы, которые вместе с электронами, ушедшими в керн, формируют внутренний двойной электрический слой. Электрическое поле, создаваемое этим слоем, ускоряет вылетающие электроны, т.е. уменьшает работу выхода электронов. Например, при нанесении одноатомного слоя бария на поверхность вольфрама работа выхода уменьшается с 4,5 (чистый W) до 1,56 эВ (активированный W).

В зависимости от вида энергии, подводимой к веществу, различают термо-, фото-, электростатическую и вторичную электронные эмиссии частиц.

Термоэлектронная эмиссия. Осуществляется за счет нагрева вещества. При некоторой температуре вещества тепловая энергия, полученная электронами, будет достаточной для совершения ими работы выхода.

Зависимость плотности тока термоэмиссии I_e от температуры тела (катода) T определяется следующим выражением:

$$I_e = A_0 T_e^2 \frac{-(E_0 - E_\phi)}{kT},$$

где $A_0 = 10 \dots 300 \text{ A}/(\text{см}^2 \text{ K}^2)$ – константа, зависящая от материала катода; k – постоянная Больцмана.

Фотоэлектронная эмиссия. Обусловлена действием внешнего электромагнитного излучения, воздействующего на поверхность вещества. Катод, использующий фотоэлектронную эмиссию, называют *фотоэлектронным или фотокатодом*. В основе фотоэлектронной эмиссии лежат законы А.Г. Столетова и А. Эйнштейна. Согласно закону Столетова фототок

$$I_\phi = k\Phi$$

пропорционален световому потоку Φ , облучающему тело. Здесь k – коэффициент пропорциональности.

Кинетическая энергия эмитированных электронов определяется частотой оптических колебаний ν и в соответствии с законом Эйнштейна может быть вычислена с помощью следующего выражения:

$$\frac{m\nu^2}{2} = h\nu - A,$$

где h – постоянная Планка; A – работа выхода; ν – скорость эмитированных электронов.

Частота падающего света, при которой кинетическая энергия равна нулю ($h\nu_{кр} = A$), называется *пороговой частотой фотоэлектронной эмиссии*; $\nu_{кр}$ – *длинноволновая граница фотоэффекта*. Поскольку различные

вещества имеют различную работу выхода, то фотоэлектронная эмиссия для разных фотокатодов возникает при определенной $\nu_{кр}$. Чувствительность фотокатода оценивается отношением числа эмитированных электронов к числу падающих фотонов (квантовый выход).

Электростатическая (автоэлектронная) эмиссия. Обусловлена сильным электрическим полем, воздействующим на поверхность катода. При большом положительном относительно катода потенциале электрода, расположенного рядом с катодом, у поверхности последнего происходит значительное понижение энергетического барьера и его толщины. В результате этого уменьшается работа выхода электронов и при некотором значении напряженности электрического поля может возникнуть значительный ток эмиссии за счет туннельного перехода через барьер электронов с поверхности катода во внешнее пространство. Это явление называется электростатической (автоэлектронной) эмиссией. Напряженности электрических полей, необходимые для этого вида эмиссии, должны достигать 10^6 В/см и более.

Вторичная электронная эмиссия. Происходит при бомбардировке поверхности тела потоками быстрых заряженных частиц. Если используются электронные потоки, то отношение общего числа вторичных, выбитых с поверхности тела электронов n_2 к числу первичных электронов n_1 , попадающих на поверхность тела из электронного потока, называют *коэффициентом вторичной эмиссии* σ . Для большинства металлов и полупроводников максимальное значение $\sigma \approx 1$. У сложных соединений, включающих элементы с малой работой выхода, σ может достигать нескольких единиц.

Катоды электронных ламп. Термокатодеы. В большинстве электровакуумных приборов применяют термоэлектронные катоды (термокатодеы), использующие термоэмиссию. Наиболее распространенными термокатадедами являются однородные металлические, активированные металлические, полупроводниковые и металлополупроводниковые. По способу нагрева термокатадеды делятся на прямонакальные и подогревные.

Прямонакальные катоды выполняют различной формы из тонкой проволоки или ленты, которую закрепляют в массивных держателях, подсоединяемых к источнику тока накала. Прямонакальные катоды из чистых металлов используются относительно редко, например, в электрометрических и мощных электронных лампах с высоким анодным напряжением, так как они наиболее стойки к разрушению под действием бомбардировки ионами, возникающими за счет ионизации остаточных газов в рабочем пространстве.

Подогревные катоды (косвенного накала) содержат изолированную нить подогрева (подогреватель) и собственно катод, выполняемый обычно в виде металлического цилиндра с активированной внешней поверхностью. Прямонакальные катоды, как правило, запитываются постоянным током накала, а подогревные могут нагреваться и переменным током.

Активированные металлические катоды имеют достаточно много конструктивных модификаций. В любом из них поверхность W или Mo активируется металлами с малой работой выхода: барием, торием, стронцием и др. Для увеличения активированной поверхности и, следовательно, эмиссионной способности поверхностные слои или весь катод изготавливают: из пористого вольфрама; путем прессования или спекания порошков оксида металла (никель, вольфрам и др.) и карбонатов щелочноземельных металлов; путем нанесения гексаборида лантана или гексаборида бария на молибденовую или танталовую подложку. Активированные металлические катоды применяются в самых разнообразных электронных приборах. Они обладают существенно большей плотностью тока эмиссии (до 10 А/см^2) и имеют меньшую рабочую температуру: $T_{\text{раб.}} \approx 1700 \text{ }^\circ\text{С}$.

17.3. Электривакуумный диод, устройство и принцип действия

Вакуумный диод имеет два основных электрода – катод и анод. Катод – это электрод, с которого происходит термоэлектронная эмиссия. Катоды бывают двух видов – с прямым и косвенным накалом. Катоды с косвенным накалом (рис. 17.1) обычно выполняются в виде трубки, внутри которой расположена спираль, называемая нитью накала (рис. 17.2). На нее подается напряжение накала, она разогревает катод для получения термоэлектродной эмиссии. Катоды прямого накала – это катоды, у которых напряжение накала подается непосредственно на катод.

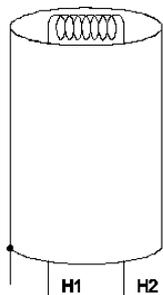


Рис. 17.1. Конструкция катода с косвенным накалом

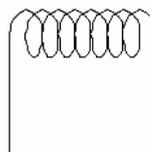


Рис. 17.2. Конструкция нити накала

Анод – это электрод, находящийся обычно под положительным потенциалом, к которому стремятся электроны, вылетевшие из катода.

Принцип действия диода

На рис. 17.3 приведены условное обозначение, схема включения и ВАХ диода.

При подаче на анод положительного напряжения между катодом и анодом создается ускоряющее электрическое поле для электронов, вылетающих из катода. Они прилетают к аноду, и через диод протекает прямой ток анода I_a . При подаче на анод отрицательного напряжения относительно катода для электронов, вылетающих из катода, образуется тормозящее электрическое поле, они будут прижиматься к катоду и ток анода будет равен нулю. Отличие электровакuumных диодов от полупроводниковых заключается в том, что обратный ток в них полностью отсутствует.

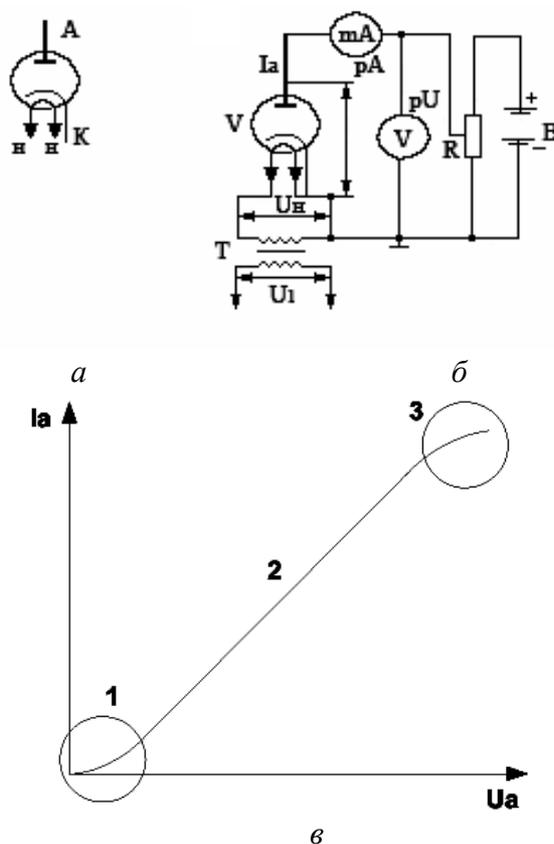


Рис. 17.3. Условное обозначение (а), схема включения (б) и ВАХ (в) диода

1. Нелинейный участок (см. рис. 17.3, в). Ток медленно возрастает, что объясняется противодействием полю анода объемного отрицательного электрического заряда, который образуется электронами, вылетающими из катода за счет эмиссии.

2. Линейный участок (см. рис. 17.3, в). При достаточно сильном электрическом поле анода объемный электрический заряд уменьшается и не оказывает значительного влияния на поле анода. На этом участке характер изменения анодного тока описывается законом степени трех-вторых:

$$I_a = GU_a^{\frac{3}{2}},$$

где $G = \frac{2,33 \cdot 10^{-6} S_a}{r_a^2}$ – величина, постоянная для каждой лампы.

3. Участок насыщения (см. рис. 17.3, в). Рост тока при увеличении напряжения замедляется, а затем полностью прекращается, т.к. все электроны, вылетающие из катода, достигают анода.

ВАХ анода прямо пропорционально зависит от напряжения накала (рис. 17.4).

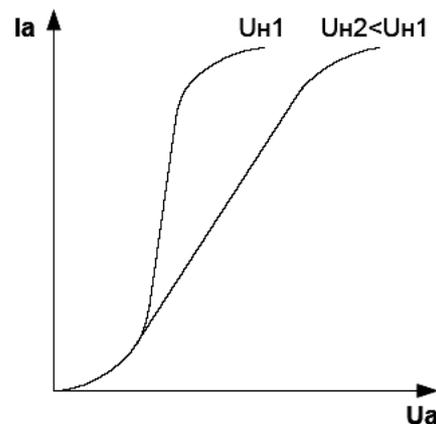


Рис. 17.4 Зависимость ВАХ диода от напряжения накала

17.4. Основные параметры электровакуумного диода

Основными параметрами диодов, характеризующими свойства большинства двухэлектродных ламп, являются крутизна анодной характеристики S , внутреннее сопротивление R_i , сопротивление постоянному току R_o , междуэлектродные емкости, предельное обратное напряжение $U_{обр.}$ и максимальная мощность, рассеиваемая анодом, $P_{a \max}$.

- Крутизна ВАХ (рис. 17.5).

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}, \frac{\text{мА}}{\text{В}}.$$

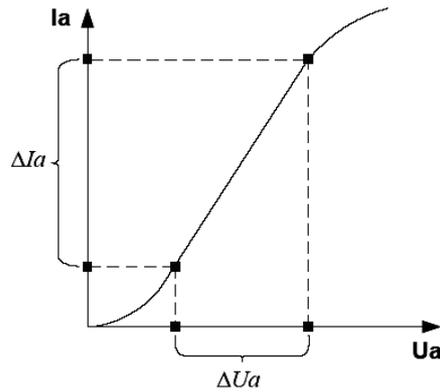


Рис. 17.5. Определение параметров по ВАХ

Крутизна характеристики лампы показывает, насколько изменится анодный ток при изменении анодного напряжения на 1 В. Для диодов $S = 1 \dots 10$ мА/В в наиболее крутом участке вольт-амперной характеристики. Из закона степени трех вторых $S = (3/2) G U_a^{1/2}$.

- Дифференциальное внутреннее сопротивление

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{1}{S}$$

можно рассматривать как сопротивление диода переменному току ($10 \dots 10^5$ Ом).

- Сопротивление лампы при постоянном токе (статическое сопротивление) $R_0 = U_a / I_a$, где I_a и U_a – ток и напряжение в заданной точке анодной характеристики. Для идеализированного диода

$$R_0 = \frac{3R_i}{2}.$$

Для реального диода R_0 может быть как больше, так и меньше R_i .

- Междуэлектродные емкости формируются за счет того, что электроды прибора, разделенные вакуумным промежутком, представляют собой пластины эквивалентного конденсатора.

К этой емкости добавляются еще емкость между выводами и емкость, обусловленная наличием неоднородно распределенных в междуэлектродном пространстве зарядов. Междуэлектродную емкость при отсутствии зарядов в междуэлектродном пространстве (катод не накален) называют холодной, а при их наличии – горячей. Согласно расчетам горячая емкость больше холодной на 30...50 %.

- Наибольшее обратное напряжение $U_{обр. \max}$ определяет предельное (максимальное) значение амплитуды переменного напряжения, подводимого к диоду. При $U_{обр} > U_{обр. \max}$ возможен электрический пробой между электродами и их выводами.

Максимальная мощность, рассеиваемая анодом, $P_{a \max}$ относится, как и наибольшее обратное напряжение, к параметрам предельно допустимого режима. При бомбардировке анода электронами он разогревается до значительных температур. Общая мощность, получаемая анодом в результате этого процесса, $P_{a. \max} = I_{a. \max} \cdot U_{a. \max}$.

Система маркировки

Маркировка представляет собой систему обозначений, содержащую четыре элемента:

6	Д	20	П
1	2	3	4

1. Напряжение накала, округленное до целого числа.

2. Тип электровакуумного прибора. Для диодов:

Д – одинарный диод.

Х – двойной диод, т.е. содержащий два диода в одном корпусе с общим накалом.

С – высоковольтный диод или кенотрон.

3. Порядковый номер разработки ЭВП.

4. Конструктивное выполнение:

- С – стеклянный баллон с пластмассовым цоколем (очень старое исполнение, не менее чем 24 мм – диаметр баллона).

- П – пальчиковые лампы (стеклянный баллон диаметром 19 или 22,5 мм с жесткими штыревыми выводами без цоколя).

- Б – миниатюрная серия с гибкими выводами и с диаметром корпуса менее 10 мм.

- А – миниатюрная серия с гибкими выводами и с диаметром корпуса менее 6 мм.

- К – серия ламп в керамическом корпусе.

- Четвертый элемент отсутствует (6К4) – это говорит об отсутствии металлического корпуса.

17.5. Триод

17.5.1. Устройство и принцип действия триода

Триодом называется электровакуумный прибор, у которого помимо анода и катода имеется третий электрод, который называется сеткой.

Сетка в триоде имеет вид спирали и располагается между анодом и катодом, ближе к катоду. УГО триода – на рис. 17.6.

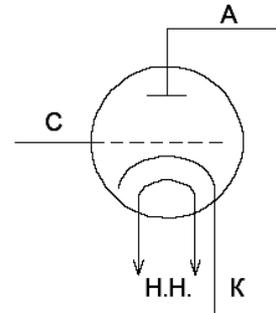


Рис. 17.6. УГО триода

Рассмотрим влияние сетки на работу триода.

1. $U_c = 0; I_{a1} > 0$ (рис.17.7).

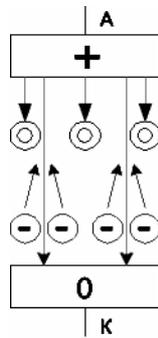


Рис. 17.7. Влияние сетки на работу триода, $U_c = 0; I_{a1} > 0$

При напряжении на сетке, равном нулю, сетка не оказывает воздействия на поле анода и в цепи анода будет протекать ток.

2. $U_c > 0; I_{a2} > I_{a1}; I_c > 0$ (рис. 17.8).

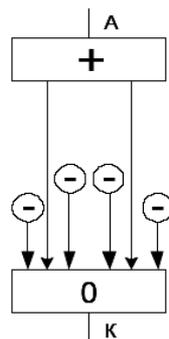


Рис. 17.8. Влияние сетки на работу триода, $U_c > 0; I_{a2} > I_{a1}; I_c > 0$

При положительных напряжениях на сетке между нею и катодом возникает поле сетки, линии напряженности которого направлены так же, как и у анода. Результирующее действие поля на электроны усиливается, и

ток анода возрастает. Положительно заряженная сетка перехватывает часть электронов, за счет чего возникает ток сетки I_c .

3. $U_c < 0; I_{a3} < I_{a1}$. (рис. 17.9).

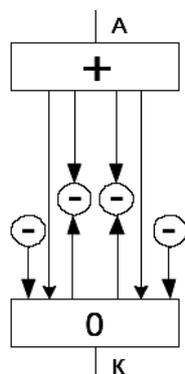


Рис. 17.9. Влияние сетки на работу триода, $U_c < 0; I_{a3} < I_{a1}$.

При подаче отрицательного напряжения на сетку поле сетки будет противодействовать полю анода, за счет чего анодный ток уменьшается.

4. $U_c \ll 0; I_{a4} = 0$ (рис. 17.10).

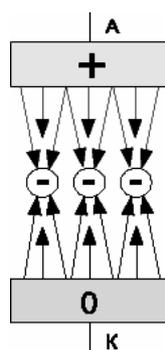


Рис. 17.10. Влияние сетки на работу триода, $U_c \ll 0; I_{a4} = 0$

При достаточно больших отрицательных напряжениях на сетке между катодом и сеткой создается настолько сильное тормозящее электрическое поле, что электроны, вылетающие из катода, будут прижиматься опять к катоду и ток анода будет равен нулю.

Напряжение на сетке, при котором I_a становится равным нулю, называется напряжением запираения или напряжением отсечки.

Вывод: изменяя напряжение на сетке, можно управлять током анода, и поэтому сетка в триоде получила название управляющей.

Система маркировки триодов аналогична системе маркировки электровакуумных диодов. Определенная буква во второй группе показывает, что данный прибор – триод. Буква С – одинарный триод, Н – двойной триод.

17.5.2. ВАХ и основные параметры триода

- Анодносеточная характеристика (рис. 17.11). $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$.

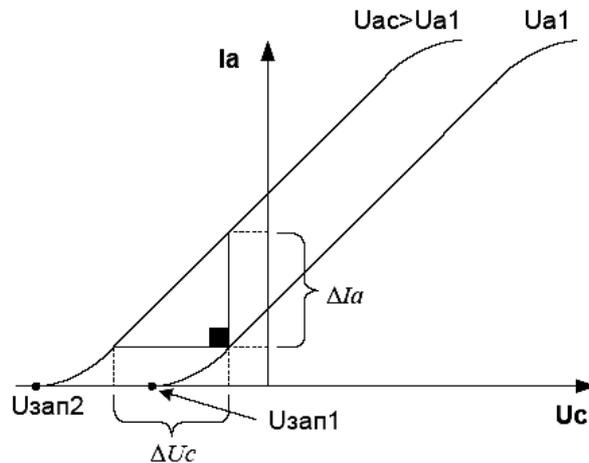


Рис. 17.11. Анодносеточные характеристики

- Анодная характеристика (рис. 17.12). Это зависимость тока анода от напряжения анода при постоянном напряжении на сетке.

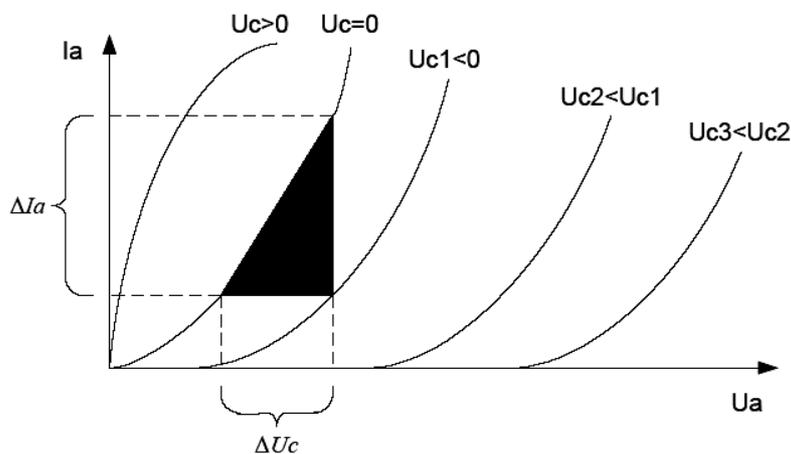


Рис. 17.12. Анодная характеристика

К основным параметрам триода относятся:

1. Крутизна анодно-сеточной характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}.$$

2. Внутреннее сопротивление

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

3. Коэффициент усиления

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

4. Проницаемость триода

$$D = \frac{1}{\mu} = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a}.$$

Теперь проведем несложный расчет.

$$S \cdot R_i \cdot D = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \cdot \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \cdot \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} = 1;$$

$$\frac{S \cdot R_i}{\mu} = 1;$$

$$\mu = S \cdot R_i.$$

Последнее уравнение получило название основного уравнения триода.

5. Межэлектродные емкости (рис. 17.13).

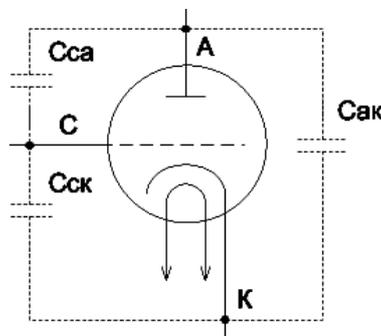


Рис. 17.13. Внутренние емкости триода

Так как электроды триода выполняются из металла, а между ними – вакуум, то в триоде образуются три межэлектродные емкости. Входной сигнал на триод подается между сеткой и катодом, а выходной сигнал снимается между анодом и катодом. Поэтому емкость сетка – катод называется входной емкостью, емкость сетка – анод называется проходной емкостью, так как напрямую связывает вход с выходом, емкость анод – катод называется выходной емкостью. Эти емкости влияют на частотные свойства триода. Наиболее сильное влияние оказывает проходная емкость.

17.6. Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим управлением

Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим управлением, т.е. с фокусировкой и отклонением луча электрическим полем, называются электростатическими трубками и особенно широко применяются в осциллографах.

Конструкция ЭЛТ (рис. 17.14). Баллон трубки имеет цилиндрическую форму с расширением в виде конуса или в виде цилиндра большего диаметра. На внутреннюю поверхность основания расширенной части нанесен люминесцентный экран – слой веществ, способных излучать свет под ударами электронов. Внутри трубки расположены электроды, имеющие выводы, в основном, на жесткие металлические штырьки цоколя. Катод изготавливают оксидным, с косвенным накалом, в виде цилиндра с подогревателем. Вывод катода иногда совмещен с одним из выводов подогревателя. Оксидный слой нанесен на доньшко катода. Вокруг катода располагается управляющий электрод, называемый модулятором, цилиндрической формы с отверстием в доньшке. Этот электрод служит для управления плотностью электронного потока и для предварительной его фокусировки. На модулятор подается отрицательное напряжение в несколько десятков вольт. Чем это напряжение больше, тем больше электронов возвращается на катод. При определенном отрицательном напряжении модулятора трубка запирается. Другие электроды, также цилиндрической формы, являются анодами. В ЭЛТ их минимум два. На втором аноде напряжение бывает от 500 В до нескольких киловольт (порядка 20 кВ), а на первом аноде напряжение в несколько раз меньше. Внутри анодов имеются перегородки с отверстиями (диафрагмы). Под действием ускоряющего поля анодов электроны приобретают значительную скорость. Окончательная фокусировка электронного потока осуществляется с помощью неоднородного электрического поля в пространстве между анодами, а также благодаря диафрагмам. Более сложные фокусирующие системы содержат большее число цилиндров. Система, состоящая из катода, модулятора и анодов, называется электронным прожектором (электронной пушкой) и служит для создания электронного луча, т.е. тонкого потока электронов, летящих с большой скоростью от второго анода к люминесцентному экрану. На пути электронного луча поставлены под прямым углом друг к другу две пары отклоняющих пластин P_x и P_y . Напряжение, подведенное к ним, создает электрическое поле, отклоняющее электронный луч в сторону положи-

тельно заряженной пластины. Поле пластин является для электронов поперечным. В таком поле электроны движутся по параболическим траекториям, а выйдя из него, далее движутся по инерции прямолинейно, т.е. электронный луч получает угловое отклонение. Чем больше напряжение на пластинах, тем сильнее отклоняется луч и тем больше смещается на люминесцентном экране светящееся, так называемое электронное пятно, возникающее от ударов электронов. Пластины P_y , отклоняющие луч по вертикали, называются пластинами вертикального отклонения, а пластины P_x – пластинами горизонтального отклонения. Одна пластина каждой пары иногда соединяется с общим проводом. Такое включение пластин называется несимметричным. Для того чтобы между вторым анодом и корпусом не создавалось электрическое поле, влияющее на полет электронов, второй анод обычно также бывает соединен с корпусом. Тогда при отсутствии напряжения на отклоняющих пластинах между ними и вторым анодом не будет никакого поля, действующего на электронный луч.

Поскольку второй анод соединен с корпусом, то катод, имеющий высокий отрицательный потенциал, равный напряжению второго анода, должен быть хорошо изолирован от корпуса. Так как на электронный луч могут влиять посторонние электрические и магнитные поля, то трубку часто помещают в экранирующий чехол из мягкой стали.

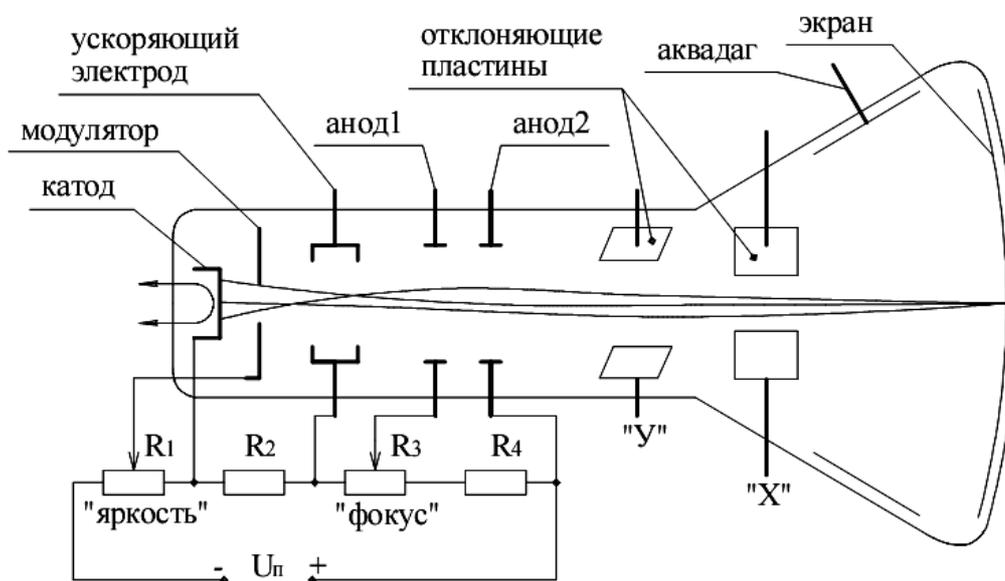


Рис. 17.14. Электронно-лучевая трубка с электростатическим отклонением

Свечение люминесцентного экрана объясняется возбуждением атомов вещества экрана. Электроны, ударяя в экран, передают свою энергию

атомам экрана, в которых один из электронов переходит на более удаленную от ядра орбиту. При возвращении электрона обратно, на свою орбиту, выделяется квант световой энергии, называемый фотоном, и наблюдается свечение. Это явление называется катодолюминесценцией, а вещества, светящиеся под ударами электронов, называются катодолуминофорами или просто люминофорами. Электроны, попадающие на экран, могут зарядить его отрицательно и создать тормозящее поле, уменьшающее их скорость. От этого уменьшится яркость свечения экрана и может вообще прекратиться попадание электронов на экран. Поэтому необходимо снимать отрицательный заряд с экрана. Для этого на внутреннюю поверхность баллона наносится проводящий слой. Он обычно бывает графитовым и называется аквадагом. Аквадаг соединяется со вторым анодом. Вторичные электроны, выбиваемые из экрана ударами первичных электронов, летят к проводящему слою. После ухода вторичных электронов потенциал экрана обычно близок к потенциалу проводящего слоя. В некоторых трубках имеется вывод от проводящего слоя, который можно использовать в качестве дополнительного анода с более высоким напряжением. При этом электроны дополнительно ускоряются после отклонения в системе отклоняющих пластин, что называется послеускорением. Проводящий слой также исключает образование на стенках баллона отрицательных зарядов от попадающих туда электронов. Эти заряды могут создавать дополнительные поля, нарушающие нормальную работу трубки. Если в трубке проводящего слоя нет, то вторичные электроны уходят с экрана на отклоняющие пластины и второй анод. Питание электронного прожектора осуществляется через делитель напряжения.

Чтобы регулирование яркости меньше влияло на фокусировку, первый анод делают без диафрагм. На него электроны не попадают, т.е. ток первого анода равен нулю. Современные электронные прожекторы дают на экране светящееся пятно с диаметром менее 0,002 от диаметра экрана.

Отклонение электронного луча электростатическим методом с образованием светящегося пятна на экране пропорционально напряжению на отклоняющих пластинах. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называется чувствительностью трубки. Если обозначить отклонение пятна по вертикали через y , а напряжение на пластинах U_y , то

$$y = S_y \cdot U_y,$$

где S_y – чувствительность трубки для пластин y .

Подобно этому отклонение светящейся точки по горизонтали

$$x = S_x \cdot U_x.$$

Таким образом, чувствительность электростатической трубки – это отношение отклонения светящейся точки на экране к соответствующему отклоняющему напряжению:

$$S_x = x/U_x \text{ и } S_y = y/U_y.$$

Чувствительность ЭЛТ – это отклонение светящейся точки при изменении на 1 В отклоняющего напряжения. Выражают чувствительность в миллиметрах на вольт. Иногда под чувствительностью понимают величину, обратную S_x или S_y , и выражают ее в вольтах на миллиметр.

Преыдушие формулы не означают, что чувствительность обратно пропорциональна отклоняющему напряжению. Если увеличить в несколько раз U_y , то во столько же раз возрастет y , а значение S_y останется без изменения. Следовательно, S_y не зависит от U_y . Чувствительность бывает в пределах 0,1 – 1,0 мм/В. Она зависит от режима работы и геометрических размеров трубки.

17.7. ЭЛТ с электромагнитным управлением

ЭЛТ с электростатическим управлением применяются в виде индикаторных (экраны радиолокаторов и гидролокаторов, дисплеи, устройства обработки воздушной и надводной информации) устройств.

Электромагнитные трубки имеют электронную пушку, такую же, как и электростатические. Разница состоит в том, что напряжение на первом аноде не изменяется и аноды предназначены только для ускорения электронного потока.

Фокусировка электронного луча осуществляется при помощи фокусирующей катушки – Ф.К. Фокусирующая катушка имеет рядовую намотку и одевается прямо на колбу трубки. Фокусирующая катушка создает магнитное поле, магнитные силовые линии которого воздействуют на электронный пучок. Если электроны движутся по оси, то угол между вектором скорости и магнитными силовыми линиями будет равен 0 ($\alpha = 0^\circ$), следовательно, сила Лоренца равна нулю. Если электрон влетает в магнитное под углом, то за счет силы Лоренца траектория электрона будет отклоняться к центру катушки (рис. 17.15). В результате все траектории электронов будут пересекаться в одной точке. Изменяя ток через фокусирующую катушку, можно изменять местоположение этой точки (рис. 17.16). Добиваются того, чтобы эта точка находилась в плоскости экрана. Это и есть фокусировка. Отклонение луча осуществляется при помощи магнитных полей (рис. 17.17), формируемых двумя парами отклоняющих катушек. Одна

пара – катушки вертикального отклонения, другая – катушки горизонтального отклонения. Катушки имеют сложную форму и располагаются таким образом, что их магнитные силовые линии на осевой линии будут взаимно перпендикулярны.

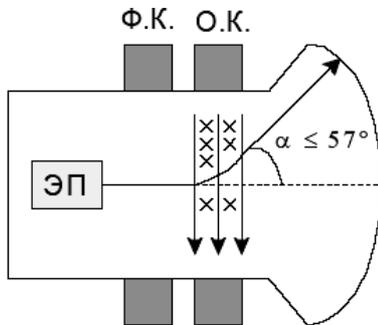


Рис. 17.15. Отклонение электронного луча

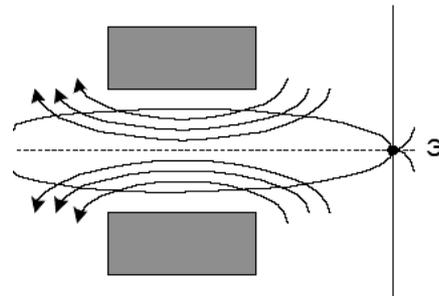


Рис. 17.16. Магнитное поле, создаваемое фокусирующей катушкой

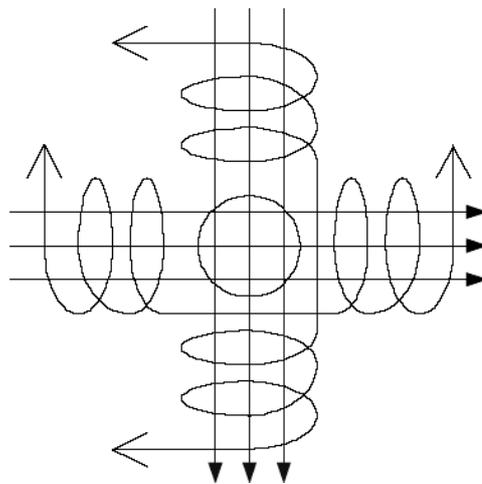


Рис. 17.17. Направление магнитных полей в отклоняющих системах

Когда электрон пролетает между катушками и попадает под воздействие их магнитных полей, так как угол между траекторией электрона и магнитных силовых линий составляет 90° ($\sin \alpha = 1$), то сила Лоренца, воздействующая на электрон, будет максимальной. Под действием этой силы Лоренца электроны будут двигаться по дуге окружности, за счет чего угол отклонения и, следовательно, чувствительность электромагнитных ЭЛТ будет значительно выше, чем у электростатических. Все остальное – люминофор, экран, аквадаг – как у электростатических ЭЛТ.

17.8. Кинескопы

Кинескопы относятся к комбинированным ЭЛТ, то есть они имеют электростатическую фокусировку и электромагнитное отклонение луча для увеличения чувствительности. Основным отличием кинескопов от ЭЛТ является следующее: электронная пушка кинескопов имеет дополнительный электрод, который называется ускоряющим электродом. Он располагается между модулятором и первым анодом, на него подается положительное напряжение в несколько сотен вольт относительно катода и он служит для дополнительного ускорения электронного потока. Вторым отличием является то, что экран кинескопа, в отличие от ЭЛТ, покрыт трехслойной структурой (рис. 17.18).

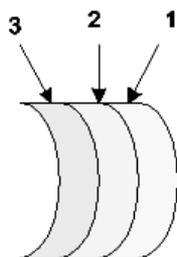


Рис. 17.18. Конструкция экрана

1-й слой – наружный – стекло. К стеклу экрана кинескопа предъявляются повышенные требования по параллельности стенок и по отсутствию посторонних включений.

2-й слой – люминофор.

3-й слой – тонкая алюминиевая пленка. Эта пленка выполняет две функции:

- увеличивает яркость свечения экрана, действуя как зеркало;
- основная функция состоит в защите люминофора от тяжелых ионов, которые вылетают из катода вместе с электронами.

17.9. Цветные кинескопы

Принцип действия основан на том, что любой цвет и оттенок можно получить смешиванием трех цветов – красного, синего и зеленого. Поэтому цветные кинескопы имеют три электронных пушки и одну общую отклоняющую систему. Экран цветного кинескопа состоит из отдельных

участков, каждый из которых содержит три ячейки люминофора, которые светятся красным, синим и зеленым цветами. Причем размеры этих ячеек настолько малы и они расположены настолько близко друг к другу, что их свечение воспринимается глазом как суммарное. Это общий принцип построения цветных кинескопов.

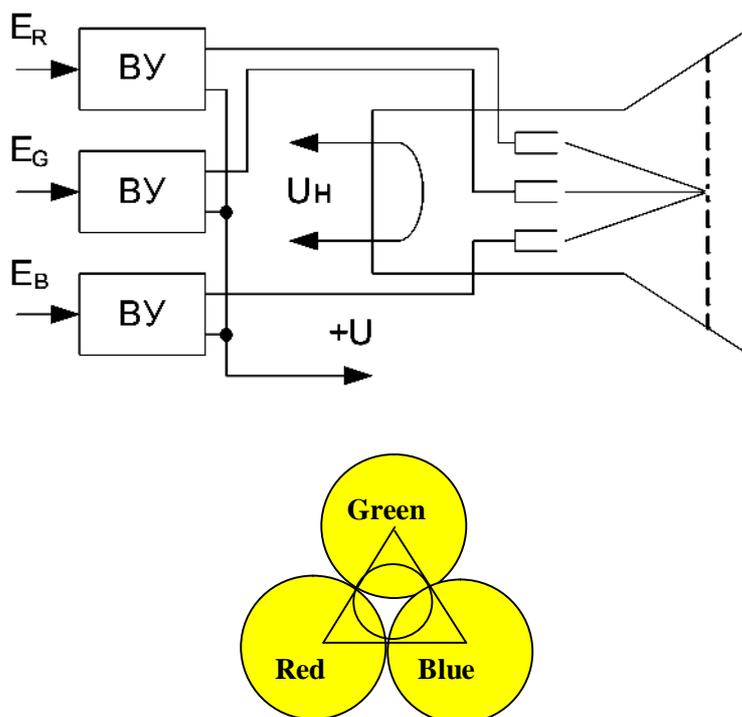


Рис. 17.19. Структура цветного кинескопа и классический вариант треугольника цвета

В кинескопах (вообще) отклоняющие катушки получили название строчной и кадровой. При прохождении через строчную катушку пилообразного импульса тока луч (или лучи в цветном кинескопе) прочерчивает на экране горизонтальную линию, которая называется строкой. Затем под действием импульса тока через кадровую катушку луч смещается на величину, приблизительно равную ширине одной строки, и под действием тока строчной катушки прочерчивает следующую строку, и так далее. В результате этого происходит полная засветка экрана кинескопа, которая называется растром. Общее количество строк равно 625. Полезный сигнал, обработанный схемой телевизора, поступает на катод или модулятор кинескопа, модулируя луч по яркости, за счет чего и формируется изображение на экране.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение термину «электровакуумный прибор». Какие разновидности электровакуумных приборов вам известны?
2. Что такое работа выхода?
3. Расскажите о видах эмиссии.
4. Опишите основные элементы конструкции электровакуумных приборов.
5. Приведите схему включения и расскажите о параметрах электровакуумного диода.
6. Расскажите о принципе работы триода и приведите его ВАХ. Какие параметры по ним определяют?
7. Расскажите о принципе работы, применении и разновидностях ЭЛТ.

Список использованных литературных источников

1. Электронные приборы : учеб. для вузов / В. Н. Дулин [и др.] ; под ред. Г. Г. Шишкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 496 с. : ил.
2. Жеребцов, И. П. Основы электроники. – 5-е изд., перераб. и доп. / И. П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с. : ил.
3. Москатов, Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
4. Электронные приборы / А. Л. Булычев [и др.]. – М. : ЛайтЛтд, 2000. – 416 с. : ил.

РАЗДЕЛ 10. ШУМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Содержание раздела

Шумы электронных приборов. Источники шумов: тепловое движение, дробовой эффект, процессы генерации и рекомбинации, токораспределение, поверхностные явления. Спектральная характеристика шумов. Методы оценки шумовых свойств. Эквивалентные шумовые схемы полупроводниковых приборов.

Методические указания [1, с. 105 – 108, 308 – 311; 2, с. 352 – 364]

Изучив основные характеристики и параметры шумов в электронных системах, разобраться в разновидностях и механизмах возникновения шумов в электронных приборах.

Научиться на примерах эквивалентных шумовых моделей анализировать поведение групп электронных приборов и синтезировать пути улучшения шумовых параметров и характеристик.

Уметь по шумовым параметрам выбирать группы электронных приборов для использования в различных условиях по частотному, эксплуатационному, усилительному и другим критериям.

Вопросы для самопроверки

1. Какие виды шумов преобладают в различных видах групп электронных приборов: диодах, транзисторах, ЭВП?
2. Какой из видов транзисторов обладает наилучшими шумовыми характеристиками?
3. Как устранить тепловой шум?
4. Что является природой фликкер-шума?
5. Как выбрать малошумящий усилительный элемент?

Рекомендуемая литература

1. Жеребцов, И. П. Основы электроники. – 5-е изд., перераб. и доп. / И. П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с. : ил.
2. Электронные приборы / А. Л. Булычев [и др.]. – М. : ЛайтЛтд, 2000. – 416 с. : ил.

Лекция 18. Шумы электронных приборов

Термины: *флуктуации, дисперсия шума, спектральная плотность мощности, тепловой шум, дробовой шум, 1/f-шум (избыточный шум), фликкер-шум, генерационно-рекомбинационный шум, шумы токораспределения, коэффициент шума.*

18.1. Общие сведения

18.2. Источники шумов в электронных приборах

18.3. Коэффициент шума. Шумы биполярных транзисторов

18.4. Шумы полевых транзисторов

18.5. Выбор малошумящих транзисторов

18.1. Общие сведения

Даже при идеальном постоянстве питающих напряжений количество поступающих в выходную цепь прибора свободных носителей заряда в единицу времени изменяется, при этом выходной ток электронного прибора беспорядочно колеблется около своего среднего значения $I_{\text{ср.}}$. Эти беспорядочные отклонения тока от среднего значения называют *флуктуациями*. Флуктуации тока невелики и составляют 10^{-7} А. Несмотря на малую величину, флуктуации оказывают существенное влияние на работу радиотехнических устройств. Будучи усилены, флуктуации на выходе, например, усилителей звуковой частоты создают в громкоговорителе характерное шипение и шум. В радиолокации и телевидении флуктуации токов электронных приборов проявляются на экранах ЭЛТ в виде беспорядочно перемещающихся точек различной яркости. Флуктуации токов принято называть *собственными шумами* электронных приборов. Собственные шумы определяют минимальную (пороговую) величину сигнала, при которой он еще не заглушается шумами и может быть воспроизведен без искажений или обнаружен на фоне шумов. Шумы присущи всем электронным приборам без исключения и принципиально неустранимы. Причины возникновения шумов различны: спонтанные флуктуации скоростей генерации и рекомбинации носителей заряда, захват носителей ловушками, случайные

распределения носителей по электродам прибора, флуктуации скоростей диффузии, плотности носителей, случайные изменения тока из-за хаотической модуляции проводимости различных областей прибора и др. Шумы приборов ограничивают нижний предел сигналов, которые можно обнаружить, усилить и измерить, т.е. шумами определяется пороговая чувствительность прибора. Частотный спектр шумов всегда превышает диапазон рабочих частот прибора.

В электронных приборах шумы рассматриваются как случайно изменяющаяся функция времени: $x(t)$ – стохастический процесс, который стационарен. Основными статистическими характеристиками шумов являются:

- дисперсия шума $\sigma_x^2 = \overline{x^2(t)}$ – средний квадрат флуктуации, характеризующий энергию шума $x(t)$ с математическим ожиданием $x(t) = 0$;
- автокорреляционная функция $\varphi_x(\tau)$, характеризующая меру «памяти» процесса, т.е. статистическую связь между двумя значениями функции $x(t)$, отделенными интервалом τ . Чем медленнее развивается процесс $x(t)$, тем на большем интервале τ наблюдается взаимосвязь между мгновенными значениями случайной величины $x(t)$. При $\tau = 0$ $\varphi_x(0) = \sigma_x^2$;
- спектральная плотность мощности, определяющая среднюю спектральную составляющую шума на частоте ω в полосе частот 1 Гц.

Для оценки взаимосвязи между стационарными процессами $x(t)$ и $y(t)$ на входе и выходе прибора вводят:

- функцию взаимной спектральной плотности, характеризующую подобие двух сигналов в частотной области;
- функцию взаимной корреляции;
- функцию когерентности, показывающую, какая часть мощности процесса $x(t)$ эффективно связана с мощностью процесса $y(t)$;
- коэффициент корреляции, оценивающий сходство двух стационарных процессов во временной области.

Функция когерентности может рассматриваться как эквивалент в частотной области коэффициента корреляции. Преимущество функции когерентности перед функцией взаимной корреляции заключается в возможности эффективного распознавания сходных частотных составляющих в процессах $x(t)$ и $y(t)$.

18.2. Источники шумов в электронных приборах

К наиболее часто встречающимся видам шумов в электронных приборах относят тепловой, дробовой, генерационно-рекомбинационный, $1/f$ -шум, шум токораспределения, лавинного умножения, микроплазменный, взрывной, фотонный, вторичной эмиссии, ионный и др.

Тепловой шум – это флуктуации тока или напряжения, обусловленные тепловым движением свободных носителей. В результате хаотического движения свободных носителей происходит случайное перераспределение носителей в среде, приводящее к флуктуации концентрации носителей, а, следовательно, и тока, протекающего через нее. Электронные приборы часто представляют в виде эквивалентного шумового резистора.

Спектральная плотность теплового шума резистора по всей полосе частот – величина постоянная, т.е. $S_{U_T}(\omega) = 4kTR$, где R – сопротивление резистора. При комнатной температуре $T = 293\text{ K}$ значение $4kT \approx 1,6 \cdot 10^{-20}$ Дж, соответственно $S_{U_T}(\omega) = 1,6 \cdot 10^{-14}$ В²·Гц⁻¹ для сопротивления $R = 10^6$ Ом. Среднеквадратическое значение шумовой ЭДС на резисторе или шумового тока через резистор в полосе частот Δf определяется соотношением

$$\bar{u}_{ш}^2 = 4kTR\Delta f = S_{U_T}(\omega)\Delta f ; \bar{i}_{ш}^2 = 4kTR^{-1}\Delta f = S_{I_T}(\omega)\Delta f. \quad (18.1)$$

Здесь $S_{I_T}(\omega)$ – спектральная плотность шумового тока при коротком замыкании выводов резистора. Введение источников шумовой ЭДС или шумового тока позволяет изобразить эквивалентную схему резистора на рис. 18.1, где R – идеальный (нешумящий) резистор.

Во многих случаях шумы удобно оценивать мощностью, отдаваемой шумящим сопротивлением в согласованную нагрузку $R_n = R \cdot T$. С учетом соотношений (18.1) получим формулу Найквиста:

$$P_{ш} = kT\Delta f,$$

из которой следует, что мощность шума не зависит от сопротивления R , если оно согласовано с нагрузкой. В полосе частот $\Delta f = 1$ Гц минимально возможная мощность шума $P_{ш.min} = kT$. При комнатной температуре $T = 293\text{ K}$ $P_{ш.min} \approx 4 \cdot 10^{-21}$ Дж и определяет минимальную мощность сигнала, усиливаемую прибором, или предельную чувствительность прибора по мощности. Тепловые флуктуации поддерживают тепловое равновесие но-

сителей в резисторе, обеспечивая в среднем возвращение к нему при случайных отклонениях. Поэтому тепловой шум – неустранимое явление в любом резистивном материале.

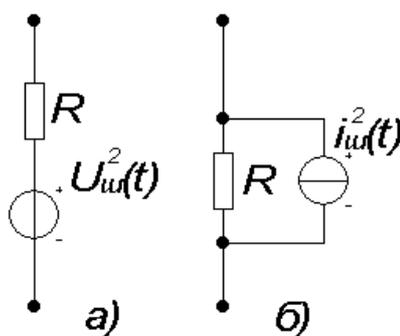


Рис. 18.1. Эквиваленты шумовых генераторов напряжения (а) и тока (б)

Дробовой шум электронных приборов связан со статистическим характером процесса преодоления носителями потенциального барьера. В полупроводниковых приборах этот барьер возникает при контактах материалов с различным типом проводимости. В электронных лампах барьер образуется на границе катод – вакуум и определяется работой выхода электронов. Акты прохождения носителей через потенциальный барьер представляют последовательность независимых случайных событий, а за одинаковый промежуток времени число носителей, преодолевших барьер, оказывается различным. Появляются флуктуации тока, обусловленные случайным распределением скоростей частиц и их энергий, моментов начала их движения.

Дробовой шум имеет равномерный спектр. Из-за конечного времени пролета носителей на высоких частотах появляется частотная зависимость спектральной плотности дробового шума.

Генерационно-рекомбинационный шум наблюдается в основном в полупроводниковых средах и обусловлен флуктуациями концентрации носителей в результате статистического характера актов генерации и рекомбинации. При каждом акте генерации или рекомбинации изменений в общем распределении зарядов в полупроводнике не возникает, поскольку одновременно исчезают или появляются пары носителей, а релаксацион-

ный процесс, связанный с нарушением электрической нейтральности, отсутствует. Наличие глубоких уровней в запрещенной зоне приводит к захвату одного из носителей (электрона или дырки), который становится связанным, т.е. появляется отклонение заряда свободных носителей от первоначального значения. Возникает процесс релаксации заряда свободных носителей и, следовательно, ток, направленный либо к центру рекомбинации (для электронов), либо из центра генерации (для дырок). Для восстановления равновесного распределения неосновных носителей в полупроводнике появляются локальные диффузионные токи, а через внешнюю цепь протекает суммарный ток $I_{дф}$. При среднем числе актов генерации и рекомбинации N_0 , среднеквадратическом отклонении от среднего числа актов генерации и рекомбинации $\overline{\Delta N^2}$ и времени жизни носителей τ_0 спектральная плотность генерационно-рекомбинационного шума в примесном полупроводнике

$$S_{I_{гр}}(\omega) = 4I_{дф}^2 \left(\frac{\overline{\Delta N^2}}{N_0^2} \right) \tau_0 / [1 + (\omega\tau_0)^2]. \quad (18.2)$$

Генерационно-рекомбинационный шум в обедненной области идеального р-п-перехода отсутствует. Однако в реальных переходах, и особенно в кремниевых диодах, он существует и вызван актами генерации и рекомбинации на центрах рекомбинации с одиночными уровнями в запрещенной зоне полупроводника. Механизм возникновения этого шума состоит в следующем. Носитель, диффундирующий в обедненную область перехода, попадает на центр рекомбинации, захватывается им и остается там некоторое время. Во внешней цепи при исчезновении носителя возникает элементарный импульс тока. Совокупность таких импульсов образует ток рекомбинации. Он содержит среднюю составляющую I_p , определяемую средним числом захватов носителей, и случайную – как отклонение от среднего, т.е. шум. При генерации носителя центром рекомбинации поле электрического перехода переводит носитель в область, где он становится основным. Этому процессу также соответствует элементарный импульс во внешней цепи, но противоположной полярности. Сумма таких импульсов образует генерационный ток, имеющий среднюю I_g и флуктуационную составляющие. Если р-п-переход несимметричный и находится под внешним

напряжением, спектральные плотности токов генерации и рекомбинации определяют из соотношений $S_{I_g}(\omega) = 2qI_g$ и $S_{I_p}(\omega) = 2qI_p$. Эти формулы по форме записи совпадают с выражением для дробового шума, но отличаются по значению спектральных плотностей.

1/f-шум (избыточный шум, фликкер-шум) наблюдается в области низких частот практически во всех материалах и элементах электронных приборов, собственных полупроводниках, электрических переходах: металлических пленках, электролитах, сверхпроводниках, лампах с термокатадами и др. Механизм возникновения шума во всех этих материалах и элементах приборов точно не установлен. Однако спектральная плотность шума уменьшается приблизительно обратно пропорционально частоте по закону A/f^a , где A – некоторая константа; $a = 0,8 \dots 1,4$ – коэффициент. Отсюда происходит название *1/f-шум*. В области низких частот до $10^5 - 10^6$ Гц для большинства электронных приборов *1/f-шум* на 1 – 2 порядка превышает шумы других видов. Поэтому *1/f-шум* часто называют избыточным. Механизм возникновения *1/f-шума* обусловлен медленными случайными флуктуациями физико-химического состояния отдельных областей материалов.

В полупроводниковых приборах *1/f-шум* можно рассматривать как суперпозицию генерационно-рекомбинационных составляющих. Дефекты кристалла, наличие примесей на его поверхности, образование тонкой инородной поверхностной пленки, наличие на поверхности влаги, загрязнений, адсорбированных газов и других включений приводит к появлению в поверхностном слое полупроводника генерационно-рекомбинационных центров (ловушек). Случайный характер процессов генерации и рекомбинации носителей на этих центрах вызывает медленные флуктуации тока через полупроводник. Из-за изменения концентрации свободных носителей в объеме полупроводника хаотически изменяется скорость рекомбинации носителей в его поверхностном слое.

Флуктуации в процессе заполнения носителями ловушек приводят к изменению проводимости полупроводников и скорости поверхностной рекомбинации. Появляется поверхностный шум.

Для р-п-переходов с границей на поверхности кристалла флуктуации скорости поверхностной рекомбинации создают шумовой ток неосновных носителей. Случайный характер исчезновения носителей заряда на по-

верхности кристалла вызывает флуктуации тока через р-п-переход и хаотическое изменение его дифференциального сопротивления.

В полупроводниковых приборах с обратным включенным р-п-переходом возникает другая составляющая $1/f$ -шума – шум тока утечки. Утечка тока создается проводящей пленкой по периметру перехода на поверхности кристалла. Спонтанные флуктуации сопротивления пленки приводят к шуму тока утечки, среднеквадратическое значение которого также зависит от параметров окружающей среды.

Таким образом, $1/f$ -шум, как и дробовой, связан с прохождением тока через полупроводник или другой материал. Но в отличие от дробового $1/f$ -шум не генерируется этим током.

Шумы токораспределения являются результатом статического характера процесса распределения носителей между электродами прибора.

В многоэлектродных лампах и других вакуумных приборах флуктуации поперечной составляющей скорости электронов приводят к изменению количества электронов, попадающих на сетки и прошедших через них. Поэтому в цепи анода лампы возникают флуктуации тока. Коэффициент токораспределения k_n пентода в режиме усиления характеризует процесс распределения электронов между анодом и экранирующей сеткой. Спектральная плотность шума токораспределения в анодной цепи пентода

$$S_{Imp}(\omega) = \frac{2qk_n}{k_n + 1} (\Gamma^2 I_A + I_{C2}). \quad (18.3)$$

В биполярном транзисторе по схеме ОБ шумы токораспределения обусловлены случайными флуктуациями коэффициента переноса эмиттерного тока из-за отклонения числа актов рекомбинации в его базе от среднего значения. Этому случайному процессу соответствует спектральная плотность тока коллектора

$$S_{IKmp}(\omega) = 2q(1 - \kappa)\kappa I_{\mathcal{E}}. \quad (18.4)$$

По форме записи спектральные плотности шума токораспределения (18.3) и (18.4) совпадают со спектральной плотностью дробового тока. Но в электронных приборах коэффициенты k_n и κ частотно-зависимы, поэтому спектр шума отличен от равномерного.

Шумы лавинного умножения наблюдаются при ускорении носителей в сильных электрических полях, где носители приобретают энергию, необ-

ходимую для ионизации атома кристаллической решетки при соударении. Из-за статистического разброса длины свободного пробега носителей между соударениями моменты возникновения новых носителей заряда и их количество флуктуируют во времени, что приводит к появлению шумового тока. Для обратно включенного р-п-перехода эти флуктуации определяют случайный процесс изменения коэффициента лавинного умножения носителей M . В р-п-переходе спектральная плотность шума лавинного умножения $S_{In}(\omega) = 2qI_{обр}M^3$, где $I_{обр}$ – обратный ток через переход.

Микроплазменный шум наблюдается в виде ступенчатого сигнала с амплитудой порядка 10^{-5} А. Он возникает в сильном электрическом поле, например, в р-п-переходе при напряжении, близком к напряжению электрического пробоя. Шум локализуется внутри перехода на малом участке размером $10^{-6} \dots 10^{-7}$ м, где имеются трещины и другие дефекты кристалла, образующие ловушки. Захваченные ловушками заряды увеличивают электрическое поле на этом участке, что способствует локальному лавинному пробую, образованию электронно-дырочной плазмы, а затем ее исчезновению. Процессы образования и разрушения микроплазмы случайны, что и приводит к возникновению шумового тока через переход.

Взрывной шум проявляется в виде хаотических импульсов с мало изменяющейся амплитудой порядка 10^{-11} А, но случайной и относительно большой длительностью импульсов и интервалов между ними. Предполагается, что этот шум в обратновключенном р-п-переходе приборов обусловлен нерегулярным появлением и исчезновением поверхностных каналов, а в прямовключенных – дефектами кристалла в области перехода, в частности дислокациями, приводящими к образованию крупномасштабных рекомбинационных центров.

Фотонный шум наблюдается в фотоэлектрических и оптоэлектронных приборах и обусловлен дискретной природой принимаемого излучения и фона. Число квантов энергии, попадающих на чувствительную площадь фотоприемника, флуктуирует, что в итоге является причиной шума даже в идеальном (нешумящем) фотоприемнике. Если фотоприемник принимает поток излучения Φ от «черного тела» с температурой T , плотность фотонов которого $N(\nu)$, то спектральная плотность фотонного шума потока

$$S_{\Phi}(\nu) = 2\Phi \exp h\nu / (kT) / [\exp h\nu / (kT) - 1], \quad (18.5)$$

где поток фотонов $\Phi = cS_n N(\nu)/4$; $N(\nu) = 8\pi(\nu^2/c^3)/[\exp h\nu/(kT) - 1]$; S_n – площадь чувствительной поверхности фотоприемника; c – скорость света.

Шумы вторичной эмиссии наблюдаются, как правило, в вакуумных приборах – лампах, фотоэлектронных умножителях и др. Источником шумов являются флуктуации числа вторичных электронов, выбитых с анода, динода или других электродов. Процесс вторичной эмиссии, в результате которого случайно флуктуирует анодный ток лампы, является статистическим. Спектральная плотность шума анодного тока при вторичной эмиссии вычисляется из соотношения

$$S_{I_{\text{в.э.}}}(\omega) = 2q\sigma I_A(1,5\sigma\Gamma^2 + 1), \quad (18.6)$$

где σ – коэффициент вторичной эмиссии электронов с анода.

Ионные шумы наблюдаются в приборах с несовершенным вакуумом. Эти шумы обусловлены статистическим характером процесса ионообразования в вакуумных приборах. При бомбардировке катода ионы выбивают электроны и (или) частично компенсируют пространственный заряд у катода. Флуктуации выходящих с катода электронов, а, следовательно, пространственного заряда и тока эмиссии являются причиной появления шумов анодного тока лампы.

Кроме рассмотренных, в электронных приборах имеются и другие источники шума.

18.3. Коэффициент шума. Шумы биполярных транзисторов

Шумовые свойства транзисторов принято оценивать *коэффициентом шума*, который определяется как отношение полной мощности шумов на выходе транзистора к той ее части, которая вызвана усилением шумов генератора сигнала:

$$F_{ш} = \frac{P_{ш.вх}}{P_{ш.с.вх}K_p} = \frac{P_{ш.с.вх}K_p + P_{ш.мп}}{P_{ш.с.вх}K_p} = 1 + \frac{P_{ш.мп}}{P_{ш.с.вх}K_p}, \quad (18.7)$$

где $P_{ш.с.вх}$ – мощность шумов источника входного сигнала; K_p – коэффициент усиления по мощности транзистора.

Для расчета коэффициента шума транзистора можно воспользоваться его физической эквивалентной схемой. Считая элементы эквивалентной схемы нешумящими, дополним ее генераторами шумовых токов и напряжений, отражающими определенные источники шума.

Тепловые шумы в распределенном сопротивлении базы r_{σ}' можно учесть, включив в цепь генератор напряжения с внутренним сопротивлением r_{σ}' .

Для учета дробовых шумов тока базы $(1 - h_{21\sigma})I_3$ и избыточных шумов эмиттерного р-п-перехода в эквивалентную схему необходимо включить генератор шумового тока $\bar{i}_{3,\sigma}$:

$$\bar{i}_{3,\sigma}^{-2} = 2q(1 - h_{21\sigma})I_3\Delta f + \frac{A_3}{f}\Delta f = \left(2q(1 - h_{21\sigma})I_3 + \frac{A_3}{f} \right) \Delta f.$$

Дробовые и избыточные шумы обратного тока коллектора учитываются включением между базой и коллектором генератора шумового тока $\bar{i}_{\sigma,k}$:

$$\bar{i}_{\sigma,k}^{-2} = (2qI_{k\sigma,o} + A_k / f)\Delta f.$$

Дробовые шумы управляемой составляющей тока коллектора $h_{21\sigma}I_3$ можно учесть, если включить между коллектором и эмиттером генератор шумового тока $\bar{i}_{k,\sigma}$:

$$\bar{i}_{k,\sigma}^{-2} = 2qh_{21\sigma}I_3\Delta f.$$

В результате эквивалентная схема транзистора с учетом указанных шумовых генераторов и генератора теплового шума сопротивления источника сигнала $U_{m,c}^2 = 4rTR_c\Delta f$ принимает вид, приведенный на рис. 18.2.

Можно считать, что мощность шумов в резисторе нагрузки равна сумме мощностей шумов от каждого генератора шума. Если обозначить через $i_{шн}$ шумовой ток в нагрузке, обусловленный одним из шумовых генераторов, то мощность шумов в нагрузке, создаваемая этим током, $P_{ш.н} = \bar{i}_{ш.н}^{-2} R_n$. С учетом этого выражения для коэффициента шума (18.7) можно записать:

$$F_{ш} = \frac{\sum_{n=1}^m \bar{i}_{шн}^{-2} \cdot R_n}{\bar{i}_{ш.с}^{-2} R_n} = 1 + \frac{\sum_{n=2}^m \bar{i}_{шн}^{-2}}{\bar{i}_{ш.с}^{-2}}, \quad (18.8)$$

где $\bar{i}_{ш.с}^{-2}$ – шумовой ток в резисторе нагрузки, вызванный действием на входе транзистора генератора шума.

Из выражения (18.8) следует, что коэффициент шума не зависит от сопротивления нагрузки и его можно рассчитать для случая короткого замыкания на выходе. При этом сопротивлением r_k в эквивалентной схеме можно пренебречь, что приведет к упрощению расчетов.

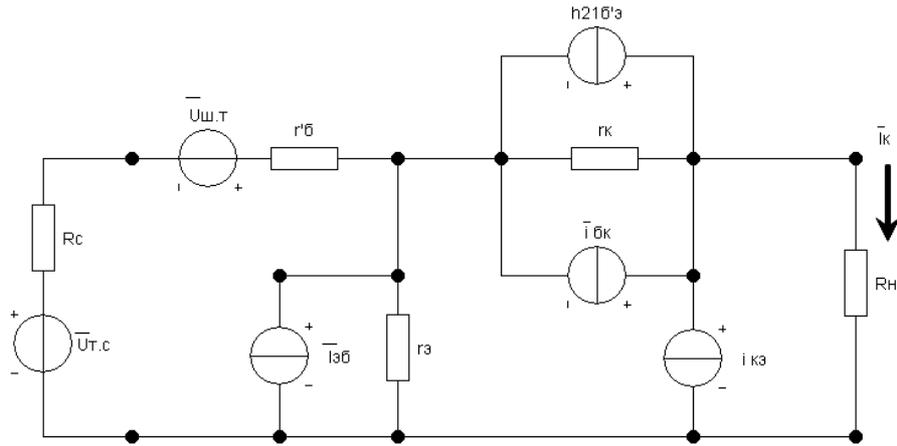


Рис. 18.2. Шумовая эквивалентная схема биполярного транзистора

Шумовой ток в нагрузке создается всеми шумовыми составляющими, поэтому для его определения можно воспользоваться методом суперпозиции, в соответствии с которым в схеме оставляют один генератор шума, исключая все остальные, и определяют первую компоненту шумового тока \bar{i}_1^2 в нагрузке. Для расчета второй компоненты шумового тока \bar{i}_2^2 в нагрузке эквивалентная схема представляется с другим генератором шума и т.д. Эти преобразования отражены на рис. 18.3, а...д.

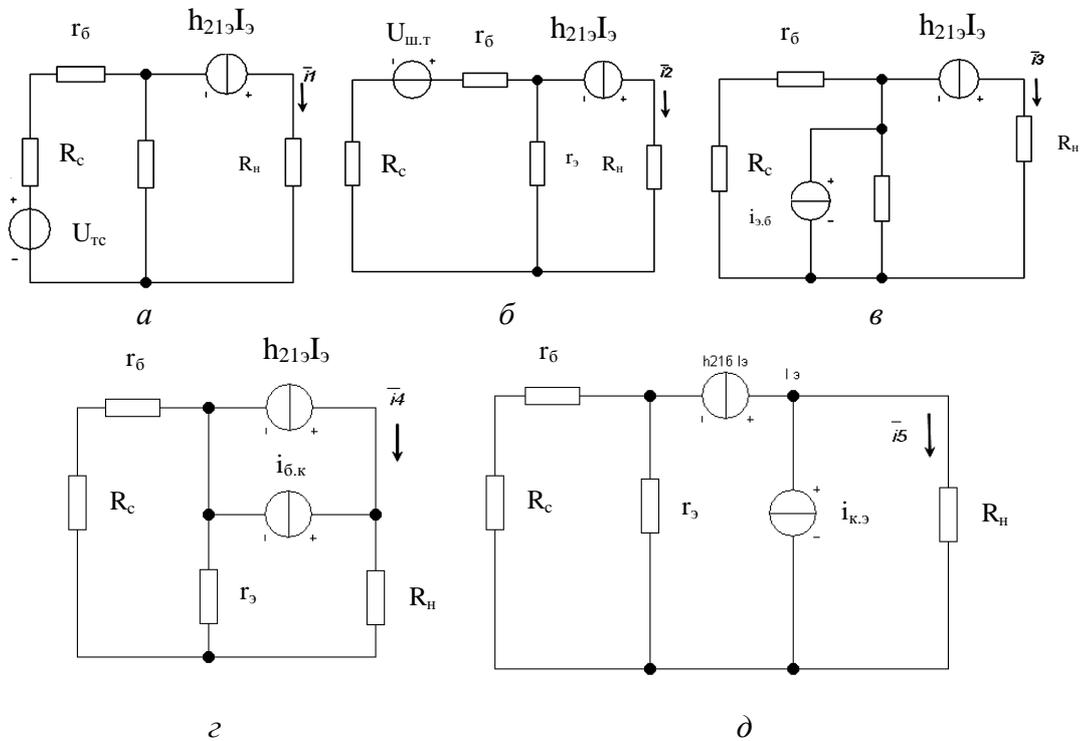


Рис. 18.3. Шумовые эквивалентные схемы биполярного транзистора для определения составляющих шумового тока

Определив шумовые компоненты $\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3, \bar{i}_4$ и \bar{i}_5 шумового тока коллектора и подставив их значения в уравнение (18.8), получим окончательное выражение для коэффициента шума в виде

$$F'_{ш} = 1 + \frac{r'_b}{R_c} + \frac{q(R_c + r'_b)^2}{2kTR_c} \left(I_{кб.о} + (1 - h_{21б})I_3 + \frac{A_3}{2qf} \right).$$

Исследования показывают, что коэффициент шума слабо зависит от схемы включения транзистора.

18.4. Шумы полевых транзисторов

Шумы полевых транзисторов определяются тремя основными составляющими: тепловыми шумами, дробовым эффектом и избыточными шумами.

Источником теплового шума в полевых транзисторах являются сопротивление канала и объемные сопротивления истока и стока. Однако вследствие малых значений объемных сопротивлений истока и стока по сравнению с сопротивлением канала можно считать, что тепловые шумы определяются только сопротивлением канала и выражаются формулой Найквиста:

$$\bar{U}_{ш.т}^2 = 4kTR_k \Delta f \quad \text{или} \quad \bar{i}_{ш.т}^2 = 4kTG_k \Delta f,$$

где G_k – электропроводность канала.

Источником дробового шума являются флуктуации тока затвора, проходящего через обратносмещенный р-п-переход затвор – канал в полевых транзисторах с управляющим р-п-переходом, или тока утечки затвора в МДП-транзисторах. Обычно эти шумы оценивают средним значением дробового шума, определяемого по формуле

$$\bar{i}_{ш.др}^2 = 2qI_3 \Delta f.$$

Вследствие малого значения тока затвора эта составляющая шума в полевых транзисторах незначительна, и ее часто не учитывают.

На высоких частотах тепловая составляющая шума через емкость обратной связи $C_{з.с}$ проникает в цепь затвора и вместе с сигналом усиливается транзистором. Поэтому на высоких частотах шумы полевых транзисторов возрастают. Однако это явление наблюдается на частотах, близких к граничным, и поэтому большого практического значения не имеет.

На низких частотах наиболее важной составляющей шума в полевых транзисторах является избыточный шум, или $1/f$ -шум. Источником его могут быть произвольные локальные изменения электрических свойств материалов и их поверхностных состояний. У современных полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом $1/f$ -шум преобладает над тепловым на частотах, меньших 100 Гц. У МДП-транзисторов $1/f$ -шум более интенсивен и проявляется на частотах 1...5 МГц и менее.

Эквивалентная шумовая схема полевого транзистора показана на рис. 18.4. Для удобства расчетов действие шумов моделируется включением в цепь затвора генераторов напряжения и тока. Генератор тока $\bar{i}_{ш.д}$ отражает дробовой шум затвора. Генераторы напряжения $\bar{U}_{ш.т}$ и \bar{U}_f отражают соответственно тепловой шум сопротивления канала, пересчитанный в цепь затвора, и избыточный шум. Генератор тока $\bar{i}_{ш.т.инд}$ отражает индуцированный шум затвора, возникающий вследствие проникновения в цепь затвора на высоких частотах (через емкость $C_{з.с}$) теплового шума сопротивления канала.

Часто шумовые свойства полевого транзистора оцениваются коэффициентом шума (в децибелах):

$$F_{ш} = 10 \lg \left(1 + \frac{P_{ш.мп}}{K_p P_{ш.с.вх}} \right)$$

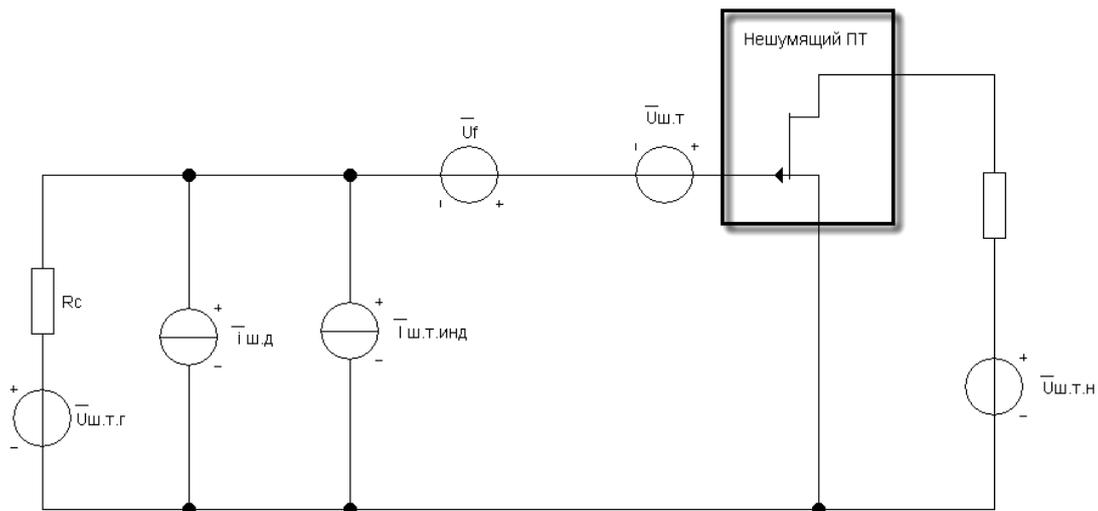


Рис. 18.4. Эквивалентная схема полевого транзистора

Коэффициент шума характеризует ухудшение отношения сигнал/шум на выходе усилительного каскада за счет внутренних шумов полевого транзистора. В современных полевых транзисторах с управляющим р-п-переходом коэффициент шума не превышает 1...2 дБ (рис. 18.5, а). Коэффициент шума полевых транзисторов, так же как и биполярных, зависит от внутреннего сопротивления источника сигнала R_c и имеет минимальное значение (порядка 1 дБ) при R_c в несколько мегаом (см. рис. 18.5, б).

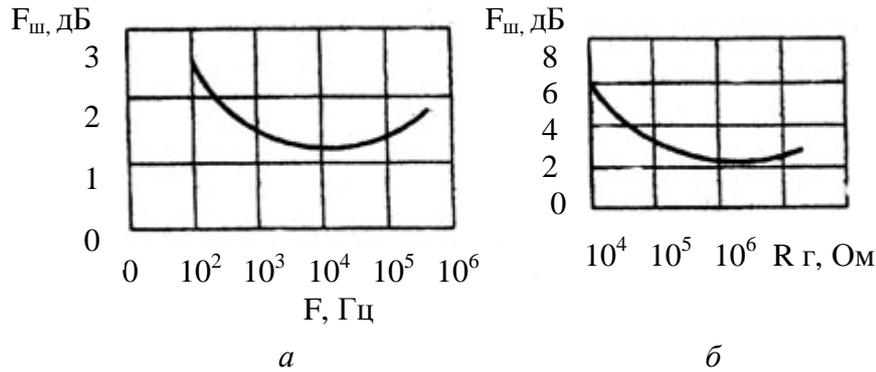


Рис. 18.5. Зависимость коэффициента шума полевого транзистора: а – от частоты; б – от внутреннего сопротивления источника сигнала

На рис. 18.6 показаны типовые зависимости спектральной плотности шумовых токов от частоты $\bar{i}_{ш}/(\Delta f)$, т.е. шум, приходящийся на полосу $\Delta f = 1$ Гц, для полевых и биполярных транзисторов. Из этих зависимостей видно, что в области низких частот шумы полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом (кривая 1) значительно меньше шумов биполярных транзисторов (кривая 2). На высоких частотах меньшими шумами обладают МДП-транзисторы с индуцированным каналом (кривая 3).

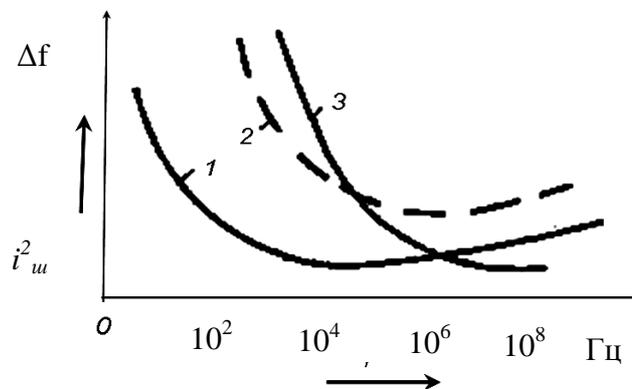


Рис. 18.6. Зависимость спектральной плотности шумовых токов от частоты

18.5. Выбор малошумящих транзисторов

Как упоминалось раньше, биполярные транзисторы из-за малого входного шума напряжения имеют наилучшие шумовые параметры при малых значениях сопротивления источника. Шум напряжения $e_{ш}$ уменьшается путем выбора транзистора с малым объемным сопротивлением базы r_b и режима работы с большим током коллектора (пока $h_{21э}$ остается большим). При больших сопротивлениях источника надо, наоборот, уменьшать шум тока путем снижения тока коллектора.

При большом сопротивлении источника лучшим выбором является полевой транзистор (ПТ). Его шум напряжения может быть уменьшен увеличением тока стока до такого значения, когда крутизна будет наибольшей.

ПТ, предназначенные для работы в малошумящих устройствах, имеют большое значение k (что обычно означает большую входную емкость). Например, у малошумящего 2N6483 емкость $C_{зи} = 20$ пФ, а у слаботочного ПТ 2N5902 емкость $C_{зи} = 2$ пФ.

На рис. 18.7 и 18.8 показаны сравнительные шумовые характеристики некоторых распространенных и широко используемых зарубежных транзисторов.

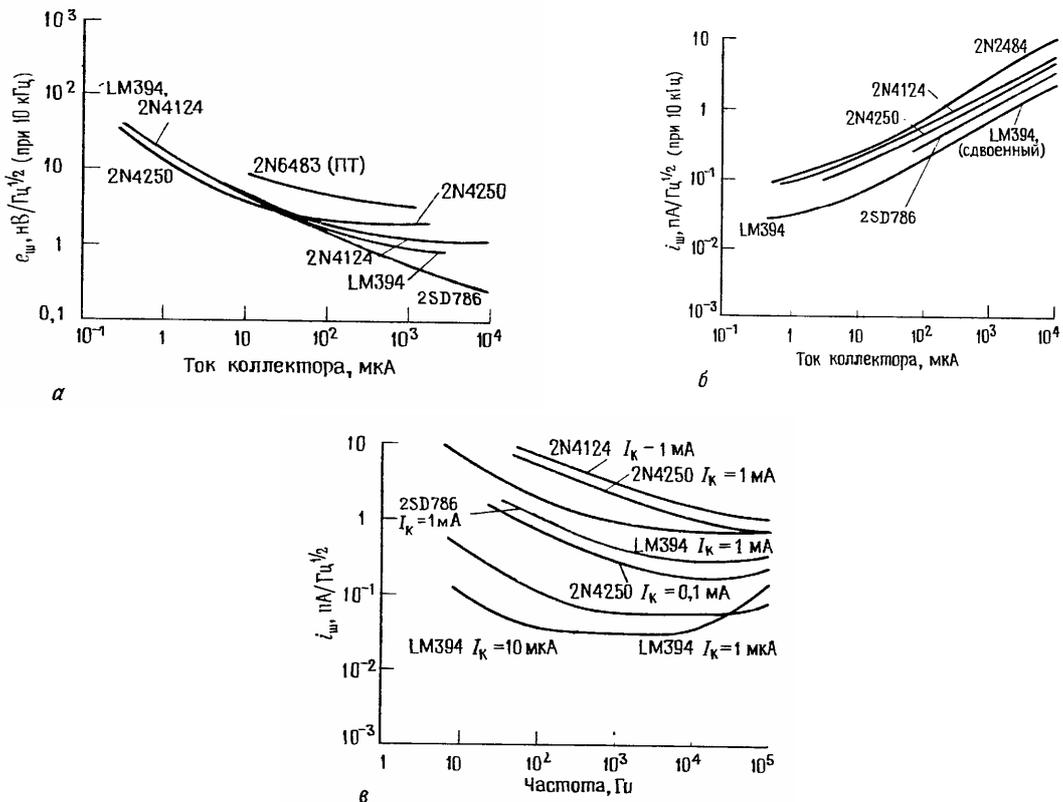


Рис 18.7. Входные шумы для транзисторов: *a* – зависимость входного напряжения шума $e_{ш}$ от тока коллектора; *б* – зависимость входного тока шума $i_{ш}$ от тока коллектора; *в* – зависимость входного тока шума от частоты

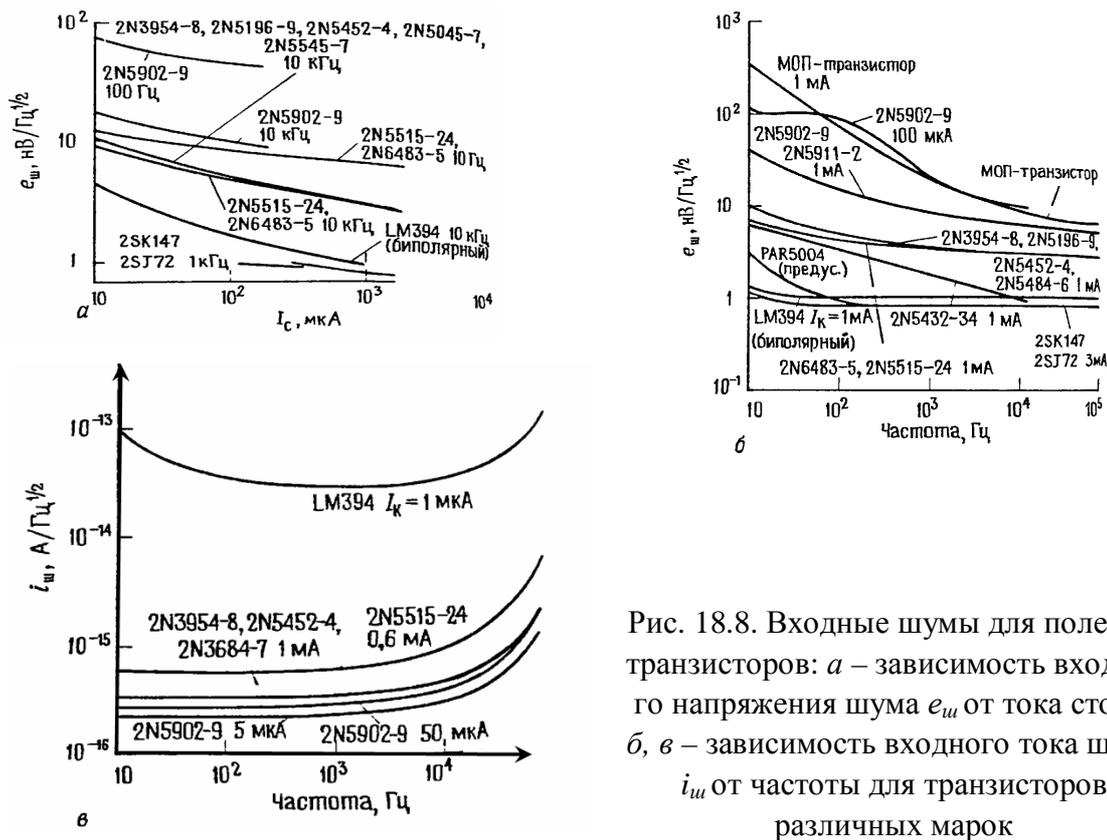


Рис. 18.8. Входные шумы для полевых транзисторов: а – зависимость входного напряжения шума e_u от тока стока; б, в – зависимость входного тока шума i_u от частоты для транзисторов различных марок

Контрольные вопросы

1. Что такое флуктуации?
2. Приведите характеристики шумов.
3. Приведите примеры источников шумов и расскажите о природе их происхождения.
4. Приведите шумовые эквивалентные схемы биполярного и полевого транзистора. Объясните происхождение их элементов.
5. Что такое коэффициент шума, чем он оценивается и от чего зависит?
6. Как выбрать транзистор исходя из его шумовых свойств?
7. Сравните по шумовым свойствам полевые и биполярные транзисторы.
8. Что вам известно о шумовых свойствах ЭВП?

Список использованных литературных источников

1. Электронные приборы : учеб. для вузов / В. Н. Дулин [и др.] ; под ред. Г. Г. Шишкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 496 с. : ил.
2. Электронные приборы / А. Л. Булычев [и др.]. – М. : ЛайтЛтд, 2000. – 416 с. : ил.
3. Хоровиц, П. Искусство схемотехники. Т. 1 / П. Хоровиц., У. Хилл. – М. : Мир, 1986. – 599 с. : ил.

Учебное издание

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ
И УСТРОЙСТВА**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
для студентов специальностей
1-39 01 01, 1-39 02 01, 1-40 01 01, 1-40 02 01

В двух частях

Часть 1

Составитель
АБРАМЕНКО Сергей Николаевич

Редактор *Т. В. Булах*

Дизайн обложки *И. С. Васильевой*

Подписано в печать 11.03.08 Формат 60x84/16 Бумага офсетная Гарнитура Таймс
Печать трафаретная Усл.-печ. л. 20,88 Уч.-изд. л. 20,5 Тираж 150 экз. Заказ 476

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»
ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04 ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04
211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29