

**Д.И. Бринкевич, С.А. Вабищевич,  
В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский**

**РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ  
КРЕМНИИ**

Новополоцк 2003

УДК 621.315.592:546.28

ББК 31.233

Р 33

Рецензенты

доктор физ.-мат. наук, профессор В.Б. Оджаяев,  
доктор техн. наук А.Г. Дутов

**Р 33 Редкоземельные элементы в монокристаллическом кремнии / Д.И. Бринкевич, С.А. Вабищевич, В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский – Новополоцк: ПГУ, 2003. – 204 с.**

ISBN 985-418-193-6

Приведен обзор поведения примесей редкоземельных элементов в монокристаллическом кремнии. Описаны процессы, протекающие при ионном внедрении лантаноидов и последующем отжиге ионно-имплантированных слоев. Освещены возможности использования редкоземельных элементов в технологии изготовления интегральных схем и дискретных полупроводниковых приборов.

Предназначена для специалистов в области материаловедения полупроводников и производства полупроводниковых приборов, а также аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Табл. 26. Ил. 79. Библиогр.: 301 назв.

УДК 621.315.592:546.28

ББК 31.233

ISBN 985-418-193-6

© Д.И. Бринкевич, С.А. Вабищевич,  
В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский, 2003

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
Глава 1. ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ .....	9
1.1. Общая характеристика редкоземельных элементов .....	9
1.2. Выращивание монокристаллов кремния, легированных редкоземельными элементами .....	11
1.3. Структура и форма включений РЗЭ в монокристаллах кремния .....	16
1.4. Геттерирующая способность лантановидов в расплаве кремния.....	23
1.5. Прочностные свойства монокристаллов Si:РЗЭ.....	27
1.6. Электрофизические и фотоэлектрические свойства кремния, легированного лантанонидами.....	31
1.6.1. Магнитосопротивление.....	32
1.6.2. Магнитная восприимчивость Si:Gd.....	35
1.6.3. Фотопроводимость .....	38
1.7. Оптическая поляризация ядер.....	41
Глава 2. ТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В Si:РЗЭ.....	45
2.1. Генерация термодоноров в Si:РЗЭ.....	46
2.1.1. Взаимодействие лантановидов с кислородом при термообработке монокристаллов .....	53
2.1.2. Влияние предварительного нагрева, фоновых технологических примесей и дислокаций на процессы генерации термодоноров в Si:РЗЭ.....	55
2.2. Формирование высокотемпературных термодоноров в Si:РЗЭ.....	59
2.3. Поведение примесей кислорода и углерода при высокотемпературной обработке Si:РЗЭ .....	62
2.4. Термическое дефектообразование в кремнии, легированном одновременно германием и гадолинием .....	65
2.5. Закалочные термодфекты в кремнии, легированном редкоземельными элементами .....	67
Глава 3. ПОВЕДЕНИЕ Si:РЗЭ В ПОЛЯХ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	72
3.1. Облучение $\gamma$ -квантами и электронами.....	72
3.1.1. Накопление радиационных дефектов.....	72
3.1.2. Отжиг радиационных дефектов в Si:РЗЭ, облученном гамма-квантами и быстрыми электронами .....	79
3.2. Влияние редкоземельных элементов на свойства нейтронно-облученного кремния.....	85
3.2.1. Подавление генерации "избыточных" доноров в нейтронно-облученном Si:РЗЭ .....	93
3.3. Радиационно-ускоренная диффузия редкоземельных элементов в кремнии.....	95

Глава 4. ИМПЛАНТАЦИЯ ЛАНТАНОИДОВ В КРЕМНИЙ .....	102
4.1. Процессы радиационного дефектообразования в кремнии при внедрении низкоэнергетичных ионов лантановидов .....	103
4.2. Отжиг радиационных дефектов в облученном низкоэнергетичными ионами РЗЭ кремнии .....	109
4.2.1. Перераспределение легирующих примесей и лантановидов в процессе отжига .....	113
4.2.2. Использование имплантации лантановидов для геттерирования фоновых технологических примесей .....	121
4.3. Высокоэнергетическая имплантация редкоземельных элементов ...	122
4.3.1. Электрофизические свойства имплантированных слоев Si:РЗЭ ...	126
4.3.2. Фотопомыесценция .....	130
Глава 5. ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ Si: РЗЭ .....	135
5.1. Жидкофазная эпитаксия .....	135
5.1.1. Эпитаксиальные слои Si:Er,In, выращенные из растворов-расплавов на основе индия .....	136
5.1.2. Эпитаксиальные слои Si:Yb, выращенные из растворов-расплавов на основе олова .....	139
5.1.3. Влияние облучения на свойства эпитаксиальных слоев Si:РЗЭ ...	147
5.2. Слои, выращенные молекулярно-лучевой эпитаксией .....	150
Глава 6. СТРУКТУРЫ И ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ .....	158
6.1. Детекторы ионизирующих излучений на основе Si:РЗЭ .....	159
6.2. Р-п-структуры, созданные совместной имплантацией ионов лантановидов и основных легирующих примесей .....	164
6.3. Перспективы использования РЗЭ в базовой технологии изготовления КМОП-микросхем .....	170
6.4. Светодиоды на основе Si:РЗЭ .....	176
ЛИТЕРАТУРА .....	179

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БМТП	–	быстродиффундирующая металлическая технологическая примесь
ВАХ	–	вольт-амперные характеристики
ВИМС	–	масс-спектроскопия вторичных ионов
ВТД	–	высокотемпературные термодоноры
ЗТД	–	закалочный термодфект
ИКП	–	инфракрасное поглощение
ДЦ	–	донорные центры
ЗТД	–	закалочные термодфекты
КМОП	–	комплиментарные металл-диэлектрик-полупроводник схемы
КНЗ	–	концентрация носителей заряда
МДК	–	максимально достижимая концентрация
МС	–	магнитосопротивление
МЛЭ	–	молекулярно-лучевая эпитаксия
МТ	–	микротвердость
ОПЗ	–	область пространственного заряда
ПТО	–	предварительная термообработка
РД	–	радиационные дефекты
РЗЭ	–	редкоземельный элемент
РЗЛМ	–	рентгеновский локальный зондовый микроанализ
ТД	–	термодонор
ТО	–	термообработка
ФЛ	–	фотолюминесценция
ЭЛ	–	электролюминесценция
ЭПР	–	электронный парамагнитный резонанс
ЭС	–	эпитаксиальный слой
DLTS	–	емкостная спектроскопия глубоких уровней
$N_d$	–	концентрация дислокаций
$N_{ЗТД}$	–	концентрация закалочных термодфектов
$N_{РЗЭ}$	–	концентрация редкоземельного элемента
$N_{Au}$	–	концентрация примеси золота
$N_C$	–	концентрация примеси углерода
$N_{Cu}$	–	концентрация примеси меди
$N_{Ge}$	–	концентрация германия
$N_{Na}$	–	концентрация примеси натрия
$N_O$	–	концентрация примеси кислорода
$\mu_n$	–	холловская подвижность носителей заряда
$\rho$	–	удельное сопротивление

## ВВЕДЕНИЕ

Возрастающая роль современной электроники в научно-техническом прогрессе обуславливает повышение требований к надежности полупроводниковых приборов как в обычном, так и микроинтегральном исполнении. Одним из основных путей решения данной задачи является поиск методов получения полупроводниковых материалов со специальными свойствами для использования их в качестве активных элементов новейших электронных систем. Электронные процессы в полупроводниковых структурах в значительной степени определяются как дефектами в объеме полупроводника, так и на поверхности и границах раздела. Нейтрализация их негативного влияния является одной из основных задач современной полупроводниковой электроники. В связи с этим в последние годы значительно возрос интерес к разработке методик управления дефектно-примесным взаимодействием в монокристаллах посредством легирования их редкоземельными элементами (РЗЭ) [1 – 5].

Основное преимущество РЗЭ определяется, прежде всего, тем, что непосредственно после выращивания монокристаллов они не проявляют электрической активности, однако могут существенно воздействовать на процессы дефектообразования и на состояние дефектно-примесного ансамбля кристалла в целом [2, 5 – 8]. Исследования, выполняемые в данной области, в основном ориентированы на решение вопросов повышения термической и радиационной стойкости полупроводников, на получение материалов с прецизионно контролируруемыми и управляемыми свойствами, на изучение процессов взаимодействия РЗЭ с технологическими примесями в кремнии как при его выращивании из расплава, так и при последующих технологических обработках монокристаллов кремния.

Интерес к исследованию поведения редкоземельных элементов в полупроводниках обусловлен также перспективой создания на основе таких материалов светобизлучающих оптоэлектронных приборов в области  $\sim 1,0$  и  $1,54$  мкм [5, 9, 10], соответствующей минимуму потерь и минимальной дисперсии в волоконно-оптических линиях связи. Наилучшим способом достижения высокой концентрации лантаноидов в кристалле, необходимой для создания указанных выше приборов, является ионная имплантация. Поскольку основным материалом современной микроэлектроники является кремний, весьма актуально исследование процессов генерации, отжига и трансформации дефектов, поведения внедренных основных легирующих и технологиче-

ских примесей как при ионном внедрении РЗЭ в Si, так и при последующих высокотемпературных обработках ионно-имплантированных слоев.

Весьма актуальными с практической точки зрения являются исследования возможности использования РЗЭ в технологии изготовления больших интегральных микросхем, составными элементами которых являются р-п-переходы и МОП-структуры. Дефекты в исходном материале, их перегруппировка и размножение при производстве приборов в условиях уменьшения геометрических размеров элементов делают объем полупроводника активным участником деградационных процессов, оказывающих существенное влияние на надежность приборов. Одна из главных проблем в этом случае связана с возрастанием токов утечки, вызывающих нестабильность работы как биполярных, так и полевых приборов. С объемными эффектами связаны и так называемые "мягкие" ошибки или сбои в микросхемах памяти, возникающие в результате воздействия ядерных частиц, излучаемых радиоактивными элементами, содержащимися в материалах корпусов и конструктивных элементов приборов. Изучение механизмов деградации параметров приборов должно осуществляться с учетом как внутренних физических процессов, происходящих в них, так и внешних воздействующих факторов. В данном аспекте перспективно легирование кремния редкоземельными элементами на той или иной стадии производства полупроводниковых приборов. Для Республики Беларусь также весьма актуальна проблема разработки высокочувствительных детекторов ядерных излучений в связи с ликвидацией последствий аварии на Чернобыльской АЭС и необходимостью проведения постоянного мониторинга окружающей среды и качества продуктов питания и воды, что может быть осуществлено на основе кремния, легированного редкоземельными элементами.

Исходные монокристаллы, используемые для изготовления полупроводниковых приборов, не являются бездефектными. Точечные и объемные нарушения кристаллической решетки возникают в монокристалле еще при его выращивании. На последующих операциях производства приборов эти нарушения дополняются другими дефектами различных частей полупроводниковой структуры. Особо негативное воздействие на эксплуатационные параметры приборов оказывают технологические примеси, попадающие в материал на различных технологических стадиях производства приборов, включая процессы выращивания слитков кремния, обработки пластин, высокотемпературных термообработок и т.д. В этих условиях становится исключительно важной разработка способов целенаправленного

управления примесно-дефектным ансамблем полупроводниковых структур на основе монокристаллического кремния посредством введения РЗЭ.

Важное место в технологии изготовления полупроводниковых приборов занимают эпитаксиальные и МОП-структуры. Однако до настоящего времени окончательно не решена проблема структурного совершенства эпитаксиальных слоев, что обуславливает снижение эксплуатационных параметров изготавливаемых на эпислоях приборов. Надежность и стабильность работы МОП-структур ограничивается наличием поверхностных состояний на границах раздела и зарядами в окислах. Указанные выше проблемы могут быть решены использованием в качестве дополнительной легирующей примеси редкоземельных элементов.

Далее будут представлены результаты исследований поведения редкоземельных элементов в монокристаллическом кремнии, проведенных авторами настоящей монографии, а также другими исследователями.

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (проект № Ф01-235).



## ГЛАВА 3. ПОВЕДЕНИЕ Si:PЗЭ В ПОЛЯХ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

### 3.1. Облучение $\gamma$ -квантами и электронами

Облучение монокристаллов кремния высокоэнергетическими частицами приводит к образованию вакансий и собственных междоузельных атомов, которые эффективно взаимодействуют как с легирующими, так и с остаточными технологическими примесями, образуя различные комплексы [127 – 130]. Характер взаимодействия, а следовательно, и эффективность введения тех или иных радиационных дефектов зависит от ряда факторов, в том числе и от примесного состава исходных монокристаллов.

К настоящему времени исследованиями различных авторов [6, 8, 28, 50, 131 – 140] однозначно установлено, что редкоземельные элементы повышают устойчивость электрических и рекомбинационных параметров монокристаллов Si к воздействию  $\gamma$ -квантов и быстрых электронов. Тип конкретной примеси РЗЭ не оказывает заметного влияния на процессы подавления генерации радиационных дефектов.

#### 3.1.1. Накопление радиационных дефектов

Установлено, что уменьшение концентрации свободных носителей заряда в Si:Gd при облучении быстрыми электронами (рис. 3.1) начинается при более высоких дозах, чем в контрольных материалах, причем указанный эффект усиливается при увеличении концентрации РЗЭ [28].

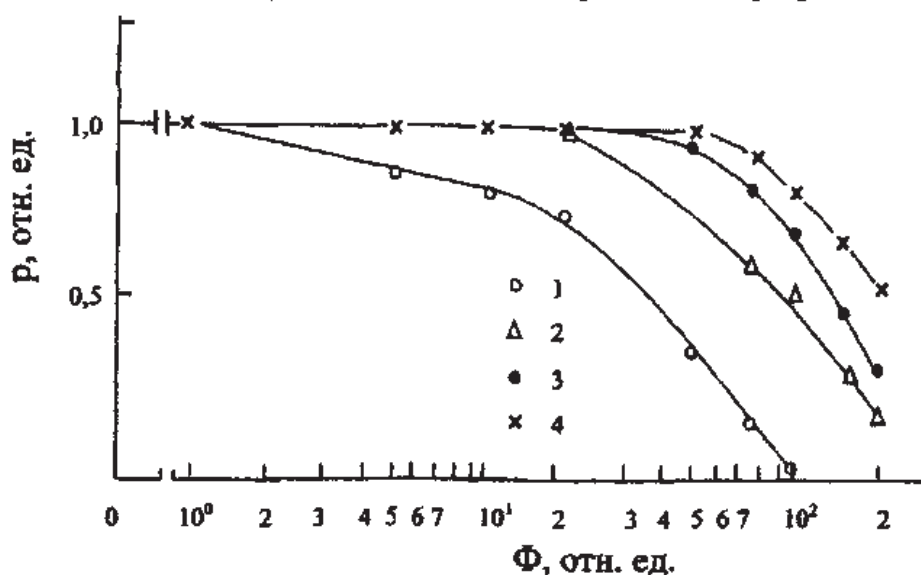


Рис. 3.1. Зависимость концентрации дырок при  $T = 300$  К и p-Si с разными концентрациями гадолиния от дозы электронного облучения.  
 $N_{Ga} \cdot 10^{-16}, \text{ см}^{-3}$ : 1 – 0; 2 – 0,05; 3 – 1; 4 – 100

При облучении Si:Er,B  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  дозами ниже  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  концентрация дырок практически не изменяется. При увеличении флюенса она уменьшалась, но заметные различия в скоростях удаления носителей заряда в Si:(Er,B) и Si:B проявлялись только при облучении  $\Phi_\gamma = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  [133]. Аналогичные результаты (табл. 3.1, 3.2) были получены при исследовании кремния, легированного другими редкоземельными элементами (Dy, Lu, Yb, Ho).

Таблица 3.1

Начальные скорости удаления носителей заряда в кремнии n-типа при  $\gamma$ - и электронном облучении

РЗЭ	$N_{\text{прз}}$ $\text{см}^{-3}$	$n(p) \cdot 10^{-13}$ , $\text{см}^{-3}$	$\mu_n$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$\gamma$ -кванты $^{60}\text{Co}$		Электроны $E = 4,2 \text{ МэВ}$	
				$\Delta n / \Delta \Phi \cdot 10^3, \text{ см}^{-1}$		$\Delta n / \Delta \Phi \cdot 10^4, \text{ см}^{-1}$	
				100 К	300 К	100 К	300 К
—	—	7,2	1750	3,3	1,0	6,8	2,7
—	—	44	1755	3,9	1,3	7,3	3,5
Er	$2,3 \cdot 10^{14}$	6,3	1730	1,9	0,63	3,5	1,7
Er	$1,5 \cdot 10^{13}$	7,7	1745	2,5	0,90	—	—
Dy	$7,1 \cdot 10^{15}$	11	1620	1,1	0,28	2,8	1,2
Lu	$5,4 \cdot 10^{14}$	8,4	1710	1,5	0,46	—	—
Gd	$9,3 \cdot 10^{11}$	40	1550	0,75	0,21	1,9	0,93

Таблица 3.2

Начальные скорости удаления носителей заряда в кремнии p-типа при  $\gamma$ - и электронном облучении

РЗЭ	$N_{\text{прз}}$ $\text{см}^{-3}$	$n(p) \cdot 10^{-13}$ , $\text{см}^{-3}$	$\mu_n$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$\gamma$ -кванты $^{60}\text{Co}$		Электроны $E = 4,2 \text{ МэВ}$	
				$\Delta n / \Delta \Phi \cdot 10^3, \text{ см}^{-1}$		$\Delta n / \Delta \Phi \cdot 10^4, \text{ см}^{-1}$	
				100 К	300 К	100 К	300 К
—	—	1,2	365	1,5	1,3	11	6,5
—	—	27	350	2,3	1,9	—	—
Dy	$9,2 \cdot 10^{16}$	29	305	1,1	0,96	—	—
Er	$4,9 \cdot 10^{16}$	1,8	320	0,83	0,77	6,5	3,8
Er	$2,3 \cdot 10^{17}$	0,96	295	0,41	0,33	—	—
Er	$6,7 \cdot 10^{17}$	0,73	280	0,44	0,35	4,4	2,6
Yb	$1,3 \cdot 10^{17}$	35	270	0,88	0,63	—	—
Lu	$1,0 \cdot 10^{14}$	1,1	350	1,2	0,98	9,0	6,2
Lu	$1,2 \cdot 10^{14}$	1,2	355	0,98	0,90	9,0	6,2
Ho	$3,0 \cdot 10^{15}$	13	320	1,6	1,2	—	—

Из данных, приведенных в табл. 3.1, 3.2, видно, что введение лантаноидов в кремний существенно уменьшает скорость удаления носителей

заряда при  $\gamma$ - и электронном облучении. Характерно, что при комнатной температуре дозовая зависимость концентрации носителей заряда для Si:PЗЭ носит пороговый характер [132]: чем выше концентрации лантаноида в образце, тем при большей дозе облучения становится заметным удаление носителей тока.

В облученном Si:PЗЭ не обнаружено радиационных дефектов, которые можно было бы связать с примесью PЗЭ: в кристаллах p-типа проводимости доминирует образование центра ( $C_i + O_i + W$ ) с энергетическим уровнем  $E_v + 0,35$  эВ, а в n-Si были обнаружены два уровня:  $E_c - 0,17$  эВ (A – центр) и  $E_c - 0,40$  эВ (E – центр,  $W^-$ ) [129].

Результаты исследования влияния примесей PЗЭ на деградацию времени жизни неосновных носителей заряда ( $\tau$ ) приведены в табл. 3.3 [132]. Видно, что лантаноиды существенно уменьшают скорость деградации  $\tau$  в кремнии при  $\gamma$ -облучении. Присутствие PЗЭ снижает также эффективность накопления центров прилипания для неосновных носителей тока при  $\gamma$ - и электронном облучении [132].

Таблица 3.3

Влияния примесей PЗЭ  
на время ( $\tau$ ) жизни неосновных носителей заряда

Тип проводимости	PЗЭ	Концентрация PЗЭ, $\text{см}^{-3}$	$\tau_0 \cdot 10^6$ , с	$K_\tau$ , $\text{см}^2 \cdot \text{с}$
n	Gd	$8,0 \cdot 10^{16}$	10	$2,7 \cdot 10^{-12}$
	–	–	4	$7,6 \cdot 10^{-11}$
p	Gd	$1,2 \cdot 10^{18}$	80	$2,6 \cdot 10^{-12}$
	–	–	95	$5,4 \cdot 10^{-11}$
	Yb	$2,5 \cdot 10^{14}$	8	$8,7 \cdot 10^{-12}$
	Yb	$> 1 \cdot 10^{14}$	14	$1,1 \cdot 10^{-11}$
	–	–	5	$1,7 \cdot 10^{-11}$

В Si:Er,B на начальных этапах облучения скорость изменения величины ( $1/\tau$ ) меньше, чем в контрольном материале (рис. 3.2). При увеличении потока  $\gamma$ -квантов до  $\sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  изменения  $\tau$  в обоих материалах были сравнимы по величине. При  $\Phi_\gamma \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  в обоих материалах  $\tau_{\text{обл}} \ll \tau_{\text{исх}}$  и обе кривые выходили на плато ( $\tau_{\text{обл}}$ ,  $\tau_{\text{исх}}$  – время жизни неравновесных носителей, измеренное до и после облучения). При реакторном облучении быстрыми нейтронами различия в константах деградации времени жизни между контрольным кремнием и Si:PЗЭ не превышают 30 %. Это свидетельствует о том, что лантаноиды замедляют образование только точечных радиационных дефектов и не влияют на образование разупорядоченных областей.

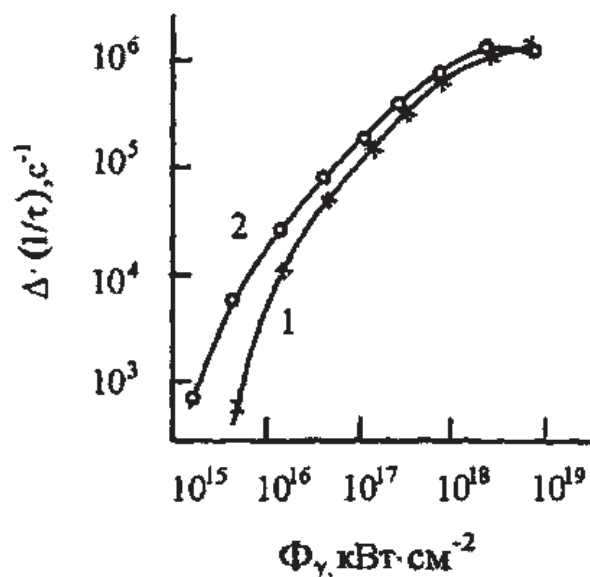


Рис. 3.2. Зависимость изменения величины обратного времени жизни неравновесных носителей заряда от флюенса облучения гамма-квантами.  
1 – Si:(Er, B); 2 – Si : B.  $N_{Er} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

По спектрам ИК поглощения и фотолюминесценции не было обнаружено радиационных дефектов, включающих в свой состав атомы лантаноидов. Их присутствие, однако, проявлялось в уширении линий, обусловленных РД. Например, полуширина узкой бесфонной А-полосы (0,969 эВ) фотолюминесценции, связанной с углеродосодержащим радиационным дефектом, в Si:(Er,B) при  $N_{Er} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  была примерно в два раза больше, чем в контрольном материале. Этот эффект может быть использован для определения содержания лантаноидов в кремнии [51].

Скорость накопления А-центров и центров, ответственных за близкромное поглощение, снижается при введении в монокристаллы РЗЭ. Скорость же накопления дивакансий при этом несколько увеличивается. Это связано с тем, что лантаноиды являются эффективными стоками для первичных радиационных дефектов. При этом средняя концентрация равновесных вакансий в объеме Si:РЗЭ уменьшается, что приводит к снижению эффективности их взаимодействия с легирующими и технологическими примесями, т.е. к подавлению генерации А- и Е-центров и комплексов С-О;-W. Вокруг примесных скоплений РЗЭ, являющихся стоками для вакансий, их концентрация увеличивается, в результате чего возрастает вероятность образования дивакансий [132]. Существование в Si:РЗЭ эффективных стоков для первичных радиационных дефектов подтверждает и поведение микротвердости при облучении. Чем выше концентрация РЗЭ в кремнии, тем меньше увеличение его микротвердости при облучении [41].

тов использовать диффузионное приближение. В этом приближении, считая, что скопления РЗЭ распределены равномерно по кристаллу, справедливо следующее выражение для относительного изменения подвижности, обусловленного скоплениями лантаноидов:

$$\Delta\mu = \frac{\mu_0 - \mu'}{\mu_0} = \frac{4\pi}{9} \chi \left[ r_2^3 + \frac{3r_2^2}{2\lambda} \right], \quad (3.1)$$

где  $\mu_0$  и  $\mu'$  – подвижности в Si и Si:РЗЭ соответственно;  $\chi$  – концентрация примесных скоплений РЗЭ;  $\lambda^{-1}$  – дебаевский радиус экранирования;  $r_2$  – радиус области пространственного заряда, не пронизываемой для носителей тока.

Параметр  $r_2$  находится из решения уравнения Пуассона, соответствующего конкретной модели неоднородности. Для необлученного Si:РЗЭ получено выражение [132]

$$r_2 = \lambda^{-1} \left[ \left( 1 + \frac{3\lambda r_0}{kT} A \right)^{1/3} - 1 \right], \quad (3.2)$$

где  $r_0$  – геометрический радиус примесных скоплений;  $A$  – разность работ выхода из матрицы кремния и скопления РЗЭ.

Анализ выражений (3.1) и (3.2) показывает, что увеличение концентрации лантаноида приводит к уменьшению эффективной подвижности, поскольку при этом увеличивается либо концентрация скоплений, либо их размер.

При облучении в запрещенную зону кремния вводится глубокий компенсирующий уровень, в результате чего при понижении температуры ниже 300 К концентрация носителей экспоненциально уменьшается. Это приводит к резкому увеличению размеров областей пространственного заряда при понижении температуры, а значит, и к резкому понижению эффективной подвижности носителей тока. Этим объясняется появление максимума на температурной зависимости подвижности в облученном Si:РЗЭ. При увеличении дозы облучения вводится больше радиационных дефектов, поэтому увеличение размеров областей пространственного заряда становится заметным при более высокой температуре, вследствие чего максимум  $\mu_n$  сдвинется в область более высоких температур.

Для объяснения факта увеличения подвижности при облучении высокоомного p-Si:РЗЭ авторами [28, 132] было сделано предположение о том, что вокруг примесных скоплений лантаноидов при облучении может образовываться область с повышенной концентрацией дефектов акцепторного типа. Это предположение основывается на экспериментальном факте

увеличения эффективности образования дивакансий при введении в кремний примесей РЗЭ. С учетом указанного предположения выражение (3.2) трансформируется в следующее:

$$r_2' = \lambda^{-1} \left[ \left( 1 + \frac{3\lambda' r_0}{kT} A' \right)^{1/3} - 1 \right], \quad (3.3)$$

где

$$A' = A - \frac{1}{2} kT (\gamma R)^2; R = r_1 - r_0; \gamma = \sqrt{\frac{4\pi e^2}{ekT} (N_d + N_a')}; \lambda' = \sqrt{\frac{4\pi e^2}{ekT} (N_d - N_a')};$$

$A'$  – разность работ выхода из кремния и включения РЗЭ при облучении;  $N_a'$  – концентрация введенных в область  $r_1 - r_0$  заряженных акцепторов;  $N_d, N_a$  – концентрации компенсирующих радиационных доноров и акцепторов соответственно.

Поскольку в высокоомном p-Si:РЗЭ  $A' < A$ , то и величина  $r_2' < r_2$ , значит, эффективная подвижность в результате облучения должна увеличиваться. В низкоомных образцах p-Si:РЗЭ протяженность областей пространственного заряда вокруг скоплений лантаноидов меньше, чем в высокоомных, следовательно, в область  $r_1 - r_0$  попадает меньше заряженных акцепторов  $N_a'$ , которые уменьшают величину  $A'$ , что снижает рассматриваемый эффект.

### 3.1.2. Отжиг радиационных дефектов в Si:РЗЭ, облученном гамма-квантами и быстрыми электронами

В кремнии n-типа проводимости на кривых изменения концентрации носителей заряда при изохронном отжиге Si:Gd,P и Si:P, облученных электронами с энергией 4,2 МэВ, можно выделить три основные стадии (рис. 3.4). Первая обусловлена отжигом E-центров. Стадию "отрицательного" отжига обычно связывают с дообразованием кислородсодержащих РД; третью, на которой происходит восстановление концентрации носителей заряда, – с отжигом A-центров, дивакансий и других радиационных дефектов [128]. E-центры в Si:Gd отжигались при более высоких температурах, хотя энергия активации этого процесса, установленная по данным изотермического отжига методом сечений, для обоих материалов составляла  $(0,91 \pm -0,05)$  эВ. Таким образом, затягивание отжига E-центров в Si:Gd можно связать с изменением частотного фактора в соответствующей кинетике реакции [144]:

$$\frac{dN}{dt} = -v_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kt}\right) \cdot f(N), \quad (3.4)$$

где  $N$  – концентрация дефектов;  $\nu_0$  – частотный фактор;  $E_a$  – энергия активации отжига;  $kT$  – тепловая энергия;  $f(N)$  – монотонно возрастающая функция, не зависящая от  $T_{отж}$ .

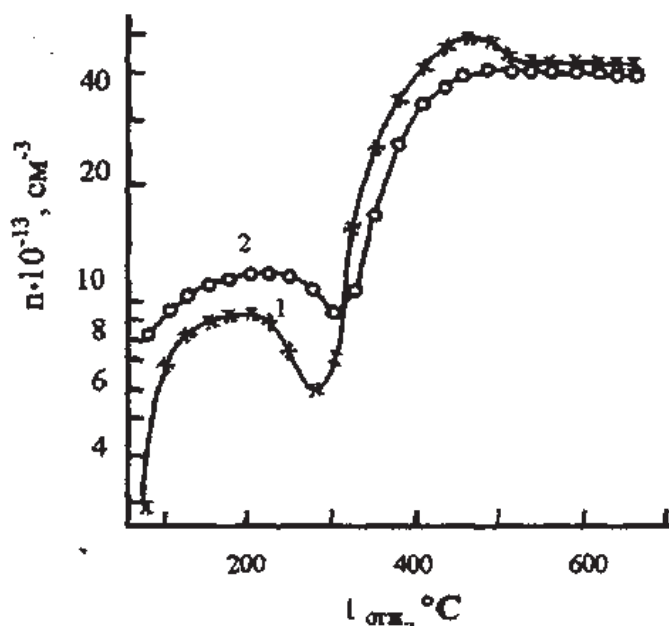


Рис. 3.4. Зависимость концентрации носителей заряда от температуры отжига в Si:P (1) и в Si:(Gd, P) – (2).  
 $N_{Gd} = 9,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .  $\Phi_e = 2,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Наиболее вероятный механизм отжига E-центра заключается в его диффузии как целого ассоциата с последующей аннигиляцией на несовершенствах междоузельного типа [128]. Существующие вокруг включений РЗЭ поля упругих напряжений способствуют перераспределению радиационных дефектов: центры вакансионного типа концентрируются вокруг включений, а междоузельного – в периферийной области. Замедление отжига E-центров можно связать с увеличением расстояния, на которое они должны мигрировать для аннигиляции.

Отжиг E-центров на первой стадии позволяет оценить их количество по разности значений концентрации носителей заряда, измеренных непосредственно после облучения и после отжига при 200 °C. Присутствие Gd подавляет образование данных радиационных дефектов: их концентрация в Si:Gd и в контрольном материале составляла  $3,0 \cdot 10^{13}$  и  $6,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Эти результаты дополнительно подтверждают вывод о подавлении генерации дефектов вакансионного типа в Si:PЗЭ.

Смещение стадий "отрицательного" отжига в Si:Gd в высокотемпературную область может быть связано с затяжкой отжига E-центра. С умень-

шением флюенса облучения "удельный вес" этой стадии отжига падал, причем в Si:PЗЭ она начинала проявляться при более высоких флюенсах электронов по сравнению с контрольным материалом. Учитывая, что в состав соответствующих дефектов входит кислород [128], полученные результаты можно объяснить взаимодействием атомов кислорода с редкоземельными элементами.

Восстановление исходной концентрации носителей заряда происходило в Si:PЗЭ при более высокой температуре, причем в диапазоне 450...500 °С концентрация электронов в контрольном материале была выше ее исходного значения (рис. 3.4). Как показали исследования кристаллов с концентрацией кислорода  $(2,0...7,5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , данная особенность объясняется образованием термодоноров, генерацию которых PЗЭ подавляли и в облученном материале. Смещения заключительной стадии отжига не наблюдалось, что обусловлено особенностями механизма отжига А-центра: диссоциация пары кислород – вакансия [128]. В данном случае поля упругих напряжений не должны изменять ни частотный фактор, ни энергию активации процесса диссоциации. Аналогичные закономерности были получены и при отжиге кристаллов, облученных гамма-квантами.

Типичные кривые изменения концентрации носителей заряда в контрольном p-Si, подвергнутом воздействию  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$ , представлены на рис. 3.5, а. Для образцов, облученных дозой до  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ , при температурах ниже 125 °С наблюдалась стадия "отрицательного" отжига (кривые 4, 5). Возрастание концентрации дырок связано с отжигом четырехвакансионных комплексов (Si-PЗЭ-центров) [128]. Восстановление исходного значения концентрации носителей заряда происходило для всех доз облучения в одну стадию: 350...550 °С. Ступенька при  $T_{\text{отж}} \sim 450 \text{ °С}$ , наблюдавшаяся при облучении  $\Phi_{\gamma} = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (кривая 5), как показали исследования образцов с разным содержанием кислорода, связана с генерацией термодоноров.

Для Si:PЗЭ картина заметно усложнялась (рис. 3.5, б). Первые две стадии отжига наблюдались и в этом материале. Расчет доли неотожженных дефектов для температуры, равной 200 °С:

$$f = (p_{\text{исх}} - p_{\text{отж}}) / (p_{\text{исх}} - p_{\text{обл}}), \quad (3.5)$$

где  $p_{\text{исх}}$ ,  $p_{\text{обл}}$ ,  $p_{\text{отж}}$  – концентрация дырок до облучения, после него и после отжига соответственно дает для  $\Phi_{\gamma} = 5 \cdot 10^{18} \dots 1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  следующие значения  $f$ : 0,993...0,989 – для Si:Er,B и 0,986...0,982 – для контрольного кремния.



Меньший – "удельный вес" стадия отжига при 150...200 °С в Si:Er,B обусловлен тем, что PЗЭ подавляют образование четырехвакансионных Si-PЗЭ-центров.

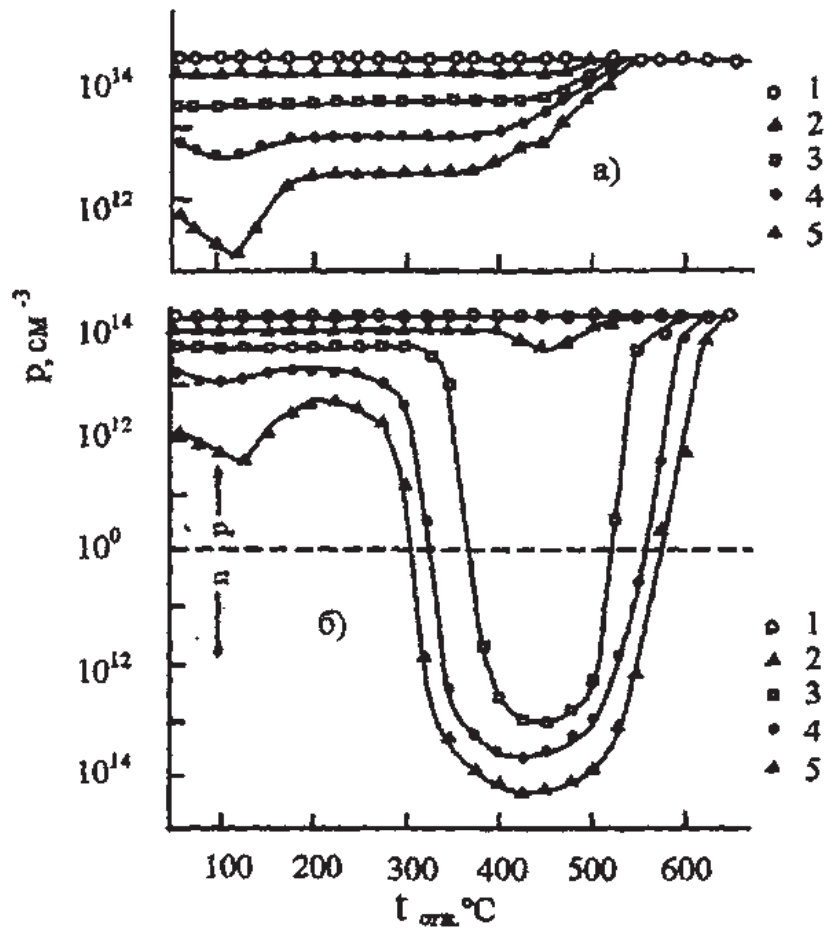


Рис. 3.5. Зависимость концентрации носителей заряда от температуры отжига в Si : B – (а) и в Si: (Er,B) – (б).  $\Phi_{\gamma} \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-2}$ : 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1,0; 4 – 5,0; 5 – 13,0

Эти данные не противоречат результатам работы [137], в которой согласно измерениям спектров ИК поглощения было установлено, что дивакансий в Si:Er,B вводится больше, чем в контрольном материале. Как отмечалось ранее, вероятность образования дивакансий и других многовакансионных комплексов увеличивается в области, окружающей примесные скопления PЗЭ [132]. Однако эти дефекты электрически пассивны, поскольку находятся внутри области пространственного заряда контакта Si – включение PЗЭ. Вдали от включений, где многовакансионные дефекты проявляют электрическую активность, их концентрация существенно ниже, чем в контрольном кремнии.

В температурной области 325...350 °С происходила р-п-конверсия типа проводимости в образцах Si:Er,B, облученных  $\Phi_\gamma = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (кривые 3 – 5), обусловленная дообразованием мелких (энергия активации < 0,04 эВ) донорных центров [158], не являющихся кислородсодержащими термодонорами. Во-первых, расчет концентрации термодоноров [90] для использованного режима термообработки дает концентрацию термодоноров в пределах  $(5,0 \pm 1,0) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , что значительно меньше концентрации центров, образующихся при отжиге облученного Si:Er,B. Во-вторых, так как лантаноиды подавляют генерацию термодоноров, то р-п-конверсию типа проводимости нельзя связать с образованием этих центров. В-третьих, при анализе температурных зависимостей концентрации носителей заряда после отжига облученного Si:Er,B не было обнаружено известного уровня термодоноров  $E_C - (0,13 \dots 0,15) \text{ эВ}$ , хотя локализация уровня Ферми, изменяющаяся от  $E_C - 0,03$  до  $E_C - 0,32 \text{ эВ}$  при увеличении температуры от 20 до 350 К, позволяла его зафиксировать.

При отжиге р-кремния, легированного Yb, Ho, Dy, Gd, также наблюдалось образование донорных центров. Максимальному значению их концентрации при изохронном отжиге Si:Er соответствовала температура 450 °С, а в кремнии, легированном другими лантаноидами, максимум их введения соответствовал более низким температурам: в Si:Yb и Si:Gd – 300 °С; в Si:Ho и Si:Dy – 325 °С. Отжиг донорных центров происходил в Si:Er,B при температурах свыше 450 °С, а восстановление исходных значений концентрации носителей заряда – в диапазоне 600...650 °С. Температура отжига, при которой достигалась максимальная концентрация указанных центров, коррелировала с величинами плотности и температуры плавления лантаноидов, т.е. проявлялась зависимость от энергий связи атомов (минимальная – для Yb, максимальная – для Er) [107]. При исследовании Si:PЗЭ, облученного электронами, были получены аналогичные результаты.

При проведении изотермического отжига облученных образцов было установлено, что температура нагрева не влияет на величину максимально достижимой концентрации указанных донорных центров в Si:PЗЭ; наблюдалось лишь изменение длительности термообработки, необходимой для ее достижения (рис. 3.6). Энергия активации их образования, определенная методом сечений, составила 1,7...1,9 эВ, что значительно отличается от соответствующей величины для термодоноров (2,5...2,8 эВ) [6]. Эти данные подтверждают, что образующиеся при отжиге облученного Si:PЗЭ донорные центры не являются кислородсодержащими термодонорами. Из измерений температурных зависимостей концентрации носителей заряда установлено [6, 139], что донорным центрам в Si:(Er,B) соответствует энерге-

тический уровень  $E_C - 0,035$  эВ. Их концентрация возрастала с ростом содержания лантаноида (рис. 3.6), что подтверждает участие атомов лантаноида в формировании указанных дефектов.

Представленная на рис. 3.7 зависимость максимально достижимой концентрации данных центров от флюенса облучения свидетельствует об их радиационном происхождении.

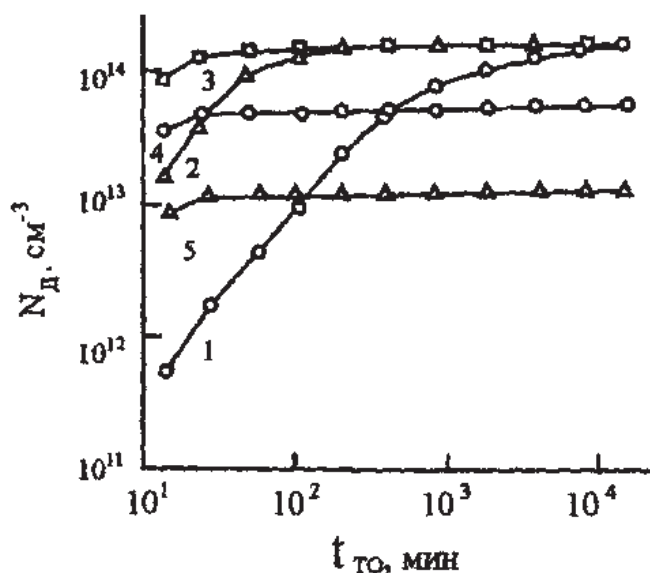


Рис. 3.6. Кинетика накопления донорных центров при изотермическом отжиге Si: (Er,B), облученного гамма-квантами ( $\Phi_\gamma = 1,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ).  
 $t_{\text{отж}}$ , °C: 1 – 350; 2 – 400; 3 – 5 – 450.  $N_{Er} \cdot 10^{15}$ ,  $\text{см}^{-3}$ : 1 – 3 – 230; 4 – 49; 5 – 2

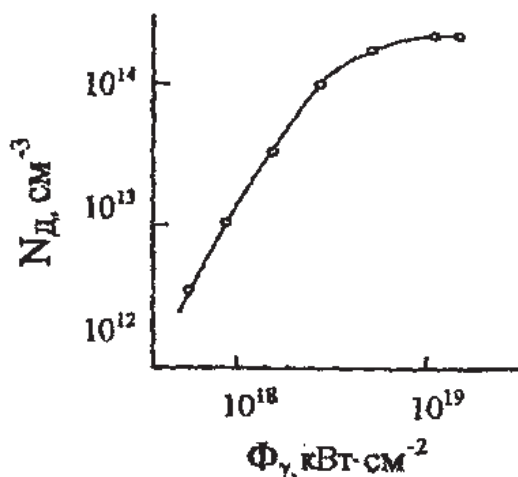


Рис. 3.7. Зависимость максимально достижимой концентрации донорных центров в Si:(Er,B) от флюенса облучения гамма-квантами.  $N_{Er} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

По всей вероятности, при температурах свыше 300 °С вследствие повышенной концентрации вакансий вокруг включений атомы лантаноидов приобретают возможность для миграции по кристаллу. При этом они могут взаимодействовать с радиационными дефектами и примесями, образуя примесно-дефектные комплексы. В слабооблученном ( $\Phi, < 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^2$ ) Si:PЗЭ подобная миграция затруднена из-за малой концентрации вакансий. Различия в характере отжига в р- и п-кремнии позволяют предположить, что в состав данных центров, кроме лантаноидов, входят атомы бора.

Методами растровой электронной микроскопии и рентгеновского локального зондового микроанализа при отжиге Si:PЗЭ, облученного  $\gamma$ -квантами и быстрыми электронами, не было обнаружено заметных изменений размеров и формы включений редкоземельных элементов, а также профилей распределения лантаноидов вблизи их видимой границы. Это позволяет сделать вывод о том, что в образовании донорных центров в облученном и термообработанном материале участвуют в основном атомы PЗЭ, находящиеся в периферийной части включения. Не следует, однако, исключать, что лантаноиды распределены в решетке Si не однородно, а образуют комплексы в виде двоек, троек и т.д. атомов, а также микроскопления [43] с размерами, меньшими предельно разрешаемых методом растровой электронной микроскопии, которые и играют доминирующую роль. Разница в величине температур, при которых достигается максимальная концентрация данных донорных центров в кремнии, легированном различными лантаноидами, также свидетельствует о том, что образование указанных дефектов контролируется миграцией атомов редкоземельных элементов, а не диффузией других примесей.

### **3.2. Влияние редкоземельных элементов на свойства нейтронно-облученного кремния**

При облучении быстрыми нейтронами образуются области с повышенной концентрацией радиационных дефектов (области разупорядочения), что обуславливает специфическое изменение ряда электрофизических, оптических и других свойств кремния [127 – 129, 154].

Непосредственно после облучения Si:PЗЭ реакторными нейтронами не было обнаружено дефектов, включающих в свой состав атомы лантаноидов. Начальные скорости удаления носителей заряда в Si:PЗЭ и в контрольном материале различаются весьма незначительно (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Начальные скорости удаления носителей заряда  
при облучении быстрыми нейтронами

Тип проводимости	РЗЭ	$N_{\text{РЗЭ}}, \text{см}^{-3}$	Концентрация носителей заряда $\cdot 10^{-14}, \text{см}^{-3}$	$\Delta n(\Delta p)/\Delta \Phi, \text{см}^{-3}$	
				100 К	300 К
п	–	–	0,72	3,1	2,0
п	–	–	4,3	3,5	2,4
п	Er	$2,3 \cdot 10^{14}$	0,63	3,0	1,9
п	Gd	$9,5 \cdot 10^{17}$	4,1	3,0	2,0
р	–	–	1,2	3,3	2,8
р	–	–	27	4,2	3,9
р	Er	$2,3 \cdot 10^{17}$	0,92	3,1	2,6
р	Yb	$1,3 \cdot 10^{17}$	33	3,9	3,5
р	Ho	$3,0 \cdot 10^{15}$	13	4,0	3,6
р	Gd	$1,2 \cdot 10^{15}$	11	4,0	3,6
р	Dy	$9,2 \cdot 10^{16}$	29	3,8	3,4

Согласно результатам работы [134], примеси РЗЭ практически не влияют на образование областей разупорядочения, которые в основном определяют компенсацию кремния.

Из измерений спектров ИК поглощения установлено, что присутствие лантаноидов влияет на образование некоторых видов радиационных дефектов [146, 147]. После нейтронного облучения в спектрах появились полосы однофононного поглощения (ОФП) при 20,5 мкм; колебательная полоса А-центра при 11,98 мкм; широкий хвост околорадиационного поглощения (ОКП). Наряду с полосой поглощения дивакансии 1,8 мкм при температуре измерения ниже 150 К наблюдались также ассоциируемые с данным дефектом полосы при 3,62; 3,46 и 3,3 мкм, обусловленные его оптической перезарядкой. Следует отметить, что процессы генерации и отжига оптически активных центров в п- и р-кремнии были идентичны; не проявлялись также и индивидуальные свойства отдельных лантаноидов.

Интенсивности полос ИК поглощения, связанных с собственными радиационными дефектами (дивакансия, ОКП, ОФП), в Si:РЗЭ несколько ниже, чем в контрольном кремнии, что можно связать с захватом части вакансий включениями РЗЭ. В данном случае количественный анализ затруднен, так как отмеченные отличия лишь в 3 – 4 раза превышали погрешность эксперимента. Наиболее существенно лантаноиды замедляли генерацию А-центров (рис. 3.8). С другой стороны, атомы кислорода эффективнее удаляются из междоузельного положения в Si:РЗЭ (см. рис. 3.8, кривые 1, 2).

Так, при флюенсах нейтронов свыше  $5 \cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup> интенсивность полосы ИК поглощения А-центра не изменяется, хотя концентрация кислорода продолжает убывать.

Так как при нейтронном облучении возрастает диффузионная способность примесей, в том числе и кислорода [126, 145], то не исключено, что имеет место приводящее к подавлению генерации кислородсодержащих радиационных дефектов (в том числе и А-центров) формирование оптически пассивных комплексов, содержащих примеси РЗЭ и кислорода. Аналогичный эффект был обнаружен и для К-центра (полоса при 11,5 мкм). Таким образом, присутствие РЗЭ, незначительно уменьшая количество собственных радиационных дефектов, в большей степени подавляет генерацию центров, содержащих атомы примеси, т.е. при нейтронном облучении процесс внутреннего геттерирования примесей, и в первую очередь кислорода, должен быть более эффективен, чем захват компонент пар Френкеля.

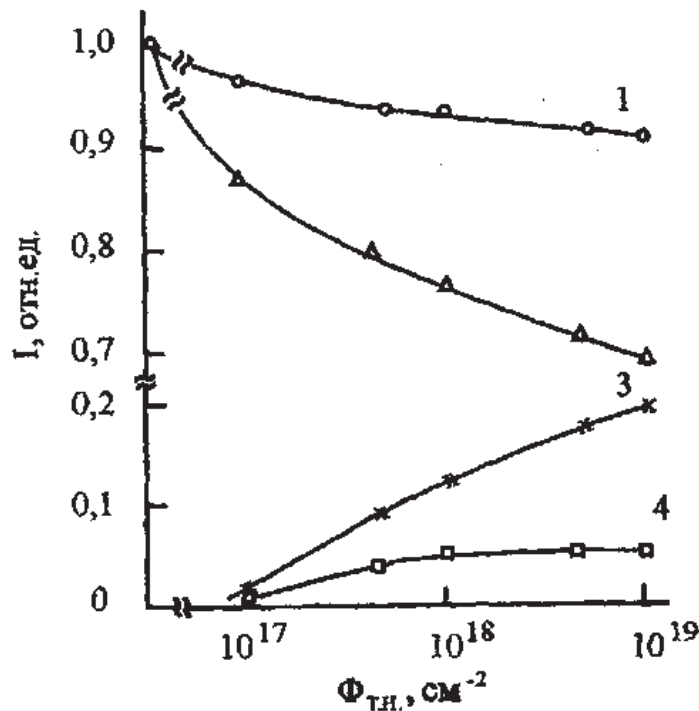


Рис. 3.8. Зависимость интенсивности полос поглощения междуузельного кислорода (1, 2) и А-центра (3, 4) от флюенса облучения нейтронами ( $R_{сд} = 10$ ).  
 $N_{Ег}, \text{см}^{-3}$ : 1, 3 — 0; 2, 4 —  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

На рис. 3.9 представлены типичные кривые изменения концентрации носителей заряда в р-Si:РЗЭ при изохронном отжиге. Увеличение удельного сопротивления в температурном интервале 125...200 °С связано с отжигом дивакансий и с распадом областей разупорядочения, что подтверждается данными измерений околор краевого поглощения и полос однофононного по-

глощения. В контрольных кристаллах с исходной концентрацией дырок  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , облученных  $\Phi_n \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ , после термообработки при  $350^\circ\text{C}$  имела место р-п-конверсия типа проводимости, обусловленная проявлением электрической активности трансмутационного фосфора, а при температурах  $500 \dots 600^\circ\text{C}$  проявлялась стадия отжига [7], соответствующая образованию "600-градусных" акцепторов (рис. 3.9, а, кривые 2, 3), которая смещалась в низкотемпературную область при увеличении флюенса нейтронов. После термообработки при  $600 \dots 700^\circ\text{C}$  устанавливался окончательный уровень легирования, не изменявшийся при нагреве вплоть до  $950^\circ\text{C}$ .

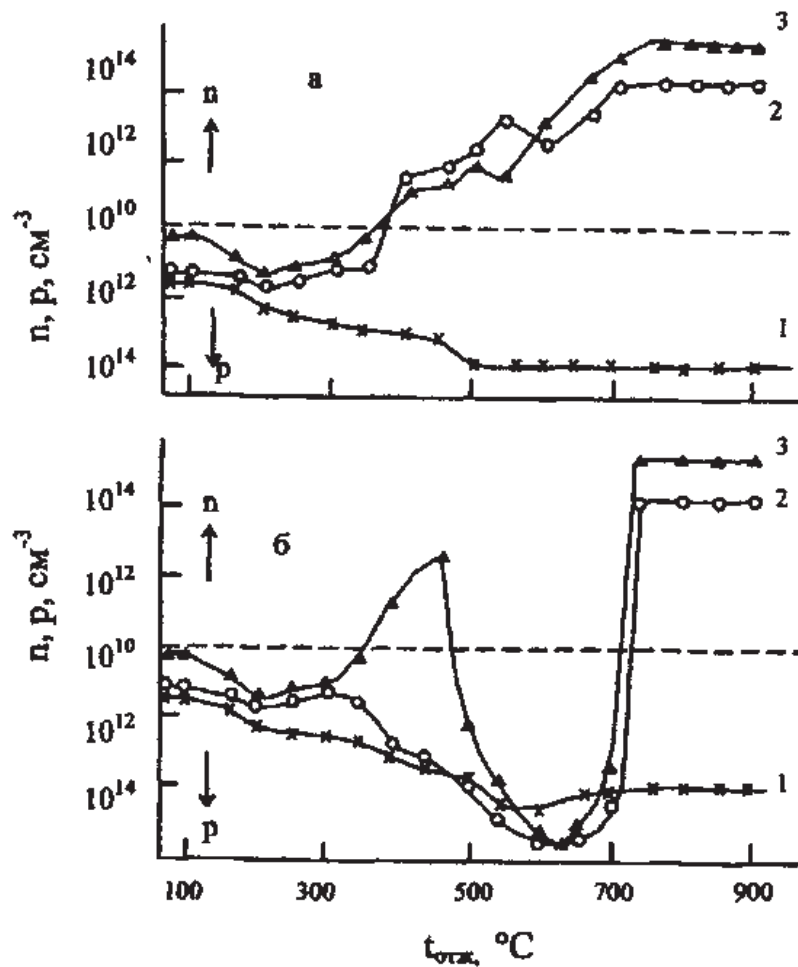


Рис. 3.9. Изменение концентрации носителей заряда при изохронном отжиге в облученных нейтронами Si:B – (а) и Si:Er,B – (б).  $\Phi_n, \text{ см}^{-2}$ : 1 –  $5,0 \cdot 10^{14}$ ; 2 –  $1,0 \cdot 10^{18}$ ; 3 –  $1,0 \cdot 10^{19}$ .  $R_{\text{Cd}} = 10$ .  $N_{\text{Er}} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

При изохронном отжиге Si:PЗЭ до температур  $\leq (300 \dots 350^\circ\text{C})$  (см. рис. 3.9, б) качественных отличий от контрольного материала замечено не было. При более высоких температурах отжига ( $350 \dots 650^\circ\text{C}$ ) во всех кристаллах Si:PЗЭ имело место дообразование акцепторных центров, кон-

центрация которых значительно превосходила концентрацию бора и "600-градусных" акцепторов. Характерно, что формирование данных дефектов в Si:PЗЭ наблюдалось даже после облучения флюенсом  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (кривая 1), при котором "600-градусные" акцепторы в заметной концентрации в контрольный материал не вводились. В образцах Si:PЗЭ, облученных  $\Phi_n = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ , вблизи температуры отжига  $\sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$  имела место р-п-конверсия типа проводимости, связанная с активацией фосфора. При дальнейшем увеличении температуры преваляло образование новых акцепторных дефектов, и тип проводимости вновь изменялся. Отметим, что формирование данных центров имело место как в n-, так и в p-Si, легированном различными лантаноидами. По данным изотермического отжига, проведенного в диапазоне  $550 \dots 650 \text{ }^\circ\text{C}$ , их максимально достижимая концентрация возрастает с ростом флюенса облучения, достигая насыщения при  $\Phi_n \sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (рис. 3.10). Увеличение концентрации лантаноидов также приводило к росту максимально достижимой концентрации данных центров, что свидетельствует об участии атомов лантаноидов в их формировании.

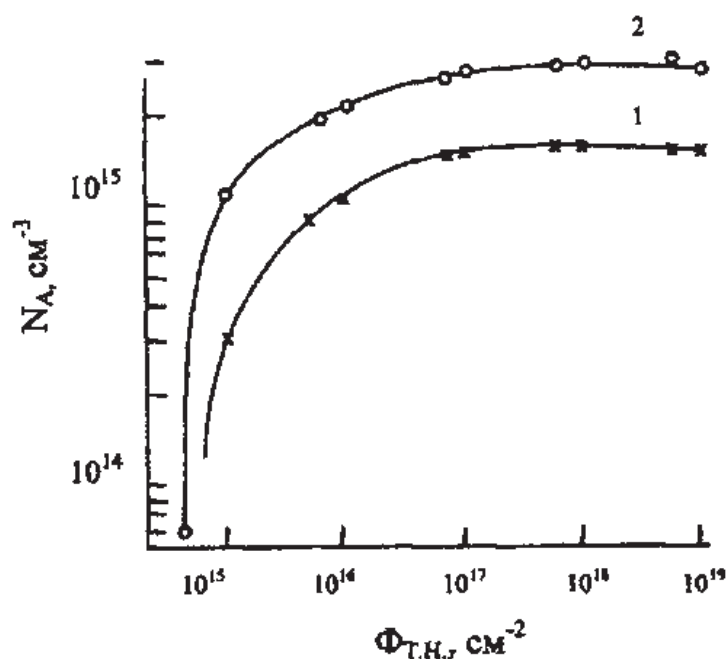


Рис. 3.10. Зависимость максимально достижимой концентрации акцепторных центров в Si : Er, В от флюенса нейтронного облучения.  $N_{Er}, \text{ см}^{-3}$ : 1 –  $5,6 \cdot 10^{16}$ ; 2 –  $2,3 \cdot 10^{17}$

Энергия активации образования дефектов ( $1,9 \pm 0,1$ ) эВ совпадает с соответствующей величиной для донорных центров, формирующихся при отжиге Si:PЗЭ, облученного  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  и быстрыми электронами, что сви-



детельствует о сходстве механизмов их генерации. Характерно, что в гамма-облученных кристаллах центры, обусловленные присутствием в материале лантаноидов, формируются в температурном интервале, соответствующем отжигу простых вакансионных дефектов (дивакансии, К- и А-центры), а в нейтронно-облученных образцах – после отжига многовакансионных комплексов [146]. Не исключено, что вышеуказанные доноры формируются и в нейтронно-облученном Si:PЗЭ, но их присутствие маскируется присутствием других радиационных дефектов.

Использование метода Хоффмана [148] позволило установить из температурной зависимости концентрации носителей заряда энергию ионизации акцепторных центров. Им соответствует энергетический уровень  $E_v + (0,11 \pm 0,01)$  эВ. Следует подчеркнуть, что данное значение было получено для всех исследовавшихся примесей лантаноидов [50].

В спектрах ИК поглощения в температурной области существования центра с уровнем  $E_v + 0,11$  эВ были обнаружены две новые полосы при  $781$  и  $789$   $\text{см}^{-1}$  (рис. 3.11, а), интенсивность которых возрастала с увеличением концентрации редкоземельных элементов.

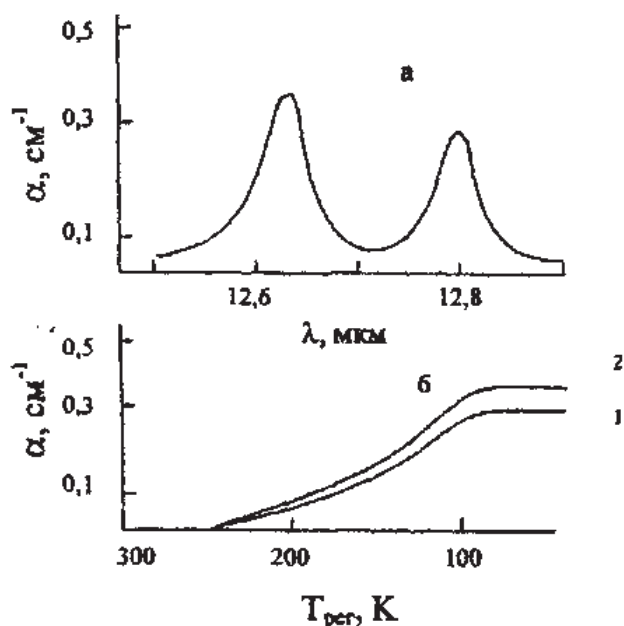


Рис. 3.11. Полосы ИК поглощения (а), обусловленные акцепторными дефектами, вводимыми при отжиге нейтронно-облученного Si:Er,B, и температурные зависимости их интенсивности (б).  
 $\nu, \text{см}^{-1}$ : 1 – 781; 2 – 789

При облучении флюенсами нейтронов примерно до  $10^{17}$  см<sup>-2</sup> их интенсивность возрастала, а в процессе дальнейшего увеличения флюенса не изменялась. При температурах регистрации свыше 250 К данные полосы не проявлялись. Их интенсивность в температурном интервале 250...100 К возрастала; в диапазоне 100...50 К оставалась неизменной (рис. 3.11, б). Анализ температурных зависимостей интенсивности полос позволяет заключить, что они обусловлены не локальными колебаниями, а электронными переходами в области одного и того же центра. Указанные дефекты отжигаются при температурах свыше 650°C. Не исключено, что данный центр представляет собой атом лантаноида, локализованный в узле кристаллической решетки, хотя не следует исключать возможности образования сложных примесно-дефектных комплексов с участием лантаноидов. Вследствие малой интенсивности полос ИК поглощения было невозможно провести пьезоспектроскопические исследования с целью установления симметрии центра.

В ходе изохронного отжига в температурном диапазоне 125...250 °С происходит значительное уменьшение интенсивности околокраевого поглощения и полосы однофононного поглощения, которые исчезают после нагрева при 600 и 400 °С соответственно. Присутствие РЗЭ не оказывает заметного влияния на их поведение при термообработке. При исследовании полосы ИК поглощения дивакансии при 1,8 мкм (рис. 3.12, кривые 1, 1') было установлено, что для Si:РЗЭ имеет место смещение отжига указанного дефекта в высокотемпературную область. Учитывая, что энергия активации отжига дивакансий для обоих материалов совпадает и составляет 1,25 эВ, данный эффект можно связать с изменением расстояния между центрами вакансионного и междоузельного типа, обусловленным влиянием упругих полей, создаваемых металлическими включениями второй фазы РЗЭ. Указанные поля упругих напряжений определяют преимущественную локализацию дефектов вакансионного типа вблизи скоплений, а междоузельного -- в периферийной области. Следствием дополнительного пространственного разделения компонент является увеличение частотного фактора в кинетике соответствующей реакции аннигиляции радиационных дефектов [149], определяющее смещение в высокотемпературную область отжига последних.

Стадия отрицательного отжига А-центра (кривые 2, 2') в температурном интервале 100...175 °С в обоих материалах обусловлена освобождением при отжиге областей разупорядочения вакансий, которые затем взаимодействуют с кислородом [150]. В кремнии, легированном редкоземельными

элементами, была обнаружена дополнительная стадия увеличения интенсивности полосы ИК поглощения, связанной с А-центром, что, по всей вероятности, обусловлено освобождением атомов кислорода при распаде комплексов РЗЭ-кислород и последующим формированием А-центров. Данное предположение подтверждается наблюдавшимся в Si:PЗЭ (кривая 3') увеличением интенсивности полосы междоузельного кислорода, отсутствующим в контрольном материале (кривая 3). Заключительная стадия восстановления концентрации кислорода в Si:PЗЭ была смещена в низкотемпературную область. В контрольном материале часть примеси кислорода дополнительно принимает участие в формировании акцепторных центров, появление и отжиг которых обуславливают наличие минимума при 650 °С в кинетике изменения интенсивности полосы ИК поглощения междоузельного кислорода. Что касается дообразующихся при термообработке спутников А-центра [151] и дефектов, ответственных за полосы высокого порядка [50], то интенсивность соответствующих им полос ИК поглощения в Si:PЗЭ была на 30...50 % меньше, чем в контрольном материале. Это свидетельствует о подавлении процессов генерации оптически активных дефектов, формирующихся при отжиге нейтронно-облученного Si:PЗЭ.

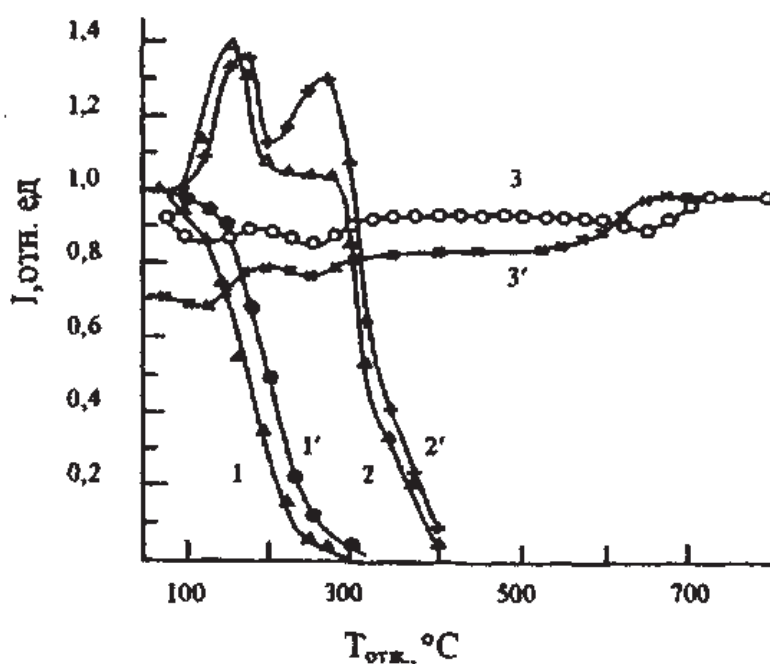


Рис. 3.12. Изменение в процессе изохронного отжига интенсивности полос ИК поглощения дивакансии (1, 1'), А-центра (2, 2') и междоузельного кислорода (3, 3') в нейтронно-облученном материале (1 - 3) и Si:Er (1' - 3').  
 $\Phi_{т.н.} = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ;  $R_{Cd} = 10$ .  $N_{Er} = 1,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

### 3.2.1. Подавление генерации "избыточных" доноров в нейтронно-облученном Si:PЗЭ

Кремний, выращенный по методу Чохральского, представляет интерес для электронной промышленности вследствие возможности получения его в слитках большого диаметра. Однако нейтронно-трансмутационное легирование такого материала затруднено вследствие значительного расхождения реально получаемого уровня легирования с расчетным при облучении тепловыми нейтронами флюенсами  $10^{17} \dots 10^{19} \text{ см}^{-2}$ , обусловленного формированием в процессе отжига кислородсодержащих "избыточных" доноров [152]. Необходимость установления оптимальных режимов технологии получения нейтронно-легированного кремния, позволяющих получать материал с заданными параметрами, требует проведения исследований для разработки методов снижения концентрации вышеуказанных доноров. Поскольку редкоземельные элементы эффективно подавляют генерацию электрически активных кислородсодержащих термических и радиационных дефектов, а также преципитацию кислорода, представляется возможным, используя легирование кремния лантаноидами, снизить эффективность образования "избыточных" доноров в нейтронно-легированном кремнии.

В табл. 3.6 представлены экспериментальные значения концентрации "избыточных" доноров и коэффициента  $K$ , характеризующего превышение уровня легирования над концентрацией введенного облучением фосфора:

$$K = \frac{n(p) \pm n_0(p_0)}{N_p}, \quad (3.6)$$

где  $N_p$  – концентрация трансмутационного фосфора;  $n(p)$  – концентрация носителей заряда после нейтронного облучения и отжига в интервале температур 700 – 800 °С;  $n_0(p_0)$  – исходная концентрация электронов (дырок).

Знак "+" в данном выражении соответствует случаю, когда исходный кремний р-типа после облучения и отжига изменял тип проводимости. В остальных случаях для определения коэффициента  $K$  использовался знак "-".

Из анализа данных, приведенных в табл. 3.6, видно, что присутствие редкоземельных элементов в кремнии существенно снижает эффективность образования "избыточных" доноров. При этом видно, что с увеличением концентрации РЗЭ величина эффекта возрастает. Однако, когда появляются включения размерами свыше 5 мкм с четко очерченной границей, эффективность воздействия на генерацию данных дефектных центров

снижается. Как уже было сказано выше (см. главу 2), лантаноиды вследствие взаимодействия с кислородом подавляют генерацию термодиффектов. Данный процесс, очевидно, имеет место и при отжиге нейтронно-облученного материала, вызывая снижение концентрации в Si:PЗЭ кислородсодержащих "избыточных" доноров. Движущим фактором данного процесса являются поля упругих напряжений, присутствующие в кремнии, содержащем лантаноиды. Этим можно объяснить и снижение эффективности подавления процесса генерации "избыточных" донорных центров при появлении в матрице кристалла крупных включений, окруженных дислокациями, компенсирующими поля упругих напряжений. Причем в Si:Gd подобные скопления появляются при более низких концентрациях, чем в Si:Er. При примерно равных концентрациях (табл. 3.6, образцы 3 и 5) эффективность подавления генерации "избыточных" доноров в последнем случае выше.

Таблица 3.6

Концентрация "избыточных" доноров ( $N_{\text{доб}}$ ) и коэффициент К в нейтронно-легированном кремнии

№ образцов	Тип проводимости	PЗЭ	$N_{\text{PЗЭ}}, \text{см}^{-3}$	Флюенс медленных нейтронов, $\text{см}^{-2}$					
				$1 \cdot 10^{18}$		$5 \cdot 10^{18}$		$1 \cdot 10^{19}$	
				$N_{\text{доб}}, \text{см}^{-3}$	К	$N_{\text{доб}}, \text{см}^{-3}$	К	$N_{\text{доб}}, \text{см}^{-3}$	К
1	п	—	—	$1,5 \cdot 10^{14}$	1,88	$1,6 \cdot 10^{14}$	1,19	$1,8 \cdot 10^{14}$	1,11
2	п	Er	$2,3 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{14}$	1,59	$1,0 \cdot 10^{14}$	1,12	$1,2 \cdot 10^{14}$	1,07
3	п	Gd	$9,5 \cdot 10^{17}$	$7,3 \cdot 10^{13}$	1,44	$7,3 \cdot 10^{13}$	1,09	$7,5 \cdot 10^{13}$	1,04
4	р	—	—	$5,3 \cdot 10^{13}$	1,31	$5,0 \cdot 10^{13}$	1,06	$5,0 \cdot 10^{13}$	1,03
4*	р	—	—	$3,1 \cdot 10^{13}$	1,18	$3,0 \cdot 10^{13}$	1,04	$3,0 \cdot 10^{13}$	1,02
5	р	Er	$2,3 \cdot 10^{17}$	$7,4 \cdot 10^{12}$	1,04	$7,6 \cdot 10^{12}$	1,01	$7,5 \cdot 10^{12}$	1,00
6	р	Yb	$1,3 \cdot 10^{17}$	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,07	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,02	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,01
7	р	Ho	$3,0 \cdot 10^{15}$	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,12	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,02	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,01
8	р	Gd	$1,2 \cdot 10^{15}$	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,12	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,02	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,01
9	р	Dy	$9,2 \cdot 10^{16}$	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,06	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,01	$< 2 \cdot 10^{13}$	1,00

Примечание. Образец 4\* был предварительно отожжен при 1000 °С в течение 34 часов.

Известно [152, 153], что проведение предварительной термообработки также оказывает влияние на процессы образования "избыточных" доноров. Для сравнения эффективности обоих методов были дополнительно проведены исследования образцов контрольного материала, подвергнутых предварительному отжигу в течение 34 часов при 430, 700 и 1000 °С.

Как было установлено, термообработки при 430 и 700 °С не влияли на генерацию "избыточных" доноров, а отжиг при 1000 °С, как видно из табл. 3.6 (образец 4\*), подавляет их образование. Сравнение данных для указанного материала с результатами для Si:PЗЭ показывает, что легирование кремния лантаноидами позволяет добиться более эффективного подавления генерации "избыточных" доноров и достигнуть лучшего согласия с расчетным значением. Это связано, вероятно, с эффектом подавления редкоземельными элементами формирования как электрически активных, так и нейтральных кислородных комплексов. Не следует также исключать из рассмотрения того факта, что РЗЭ подавляют образование собственных радиационных дефектов (дивакансия; центры, ответственные за появление полос ИК поглощения высокого порядка и др.), которые, как считают авторы [152], адсорбируясь на электрически неактивных кислородных кластерах, участвуют в формировании "избыточных" доноров. В данном случае необходимо учитывать подавление редкоземельными элементами формирования как кислородных кластеров, так и собственных дефектов решетки.

### 3.3. Радиационно-ускоренная диффузия редкоземельных элементов в кремнии

Диффузия редкоземельных элементов в кремнии изучена недостаточно. В опубликованных к настоящему времени работах [155, 159 – 164] имеются существенные расхождения в вопросах возможного механизма диффузии, энергии миграции редкоземельных элементов и предельной растворимости лантаноидов (табл. 3.7). Вероятнее всего это обусловлено тем, что диффузионные параметры сильно зависят от состава источника примесей и условий диффузии.

При этом необходимо учитывать влияние растягивающих термоупругих напряжений, что приводит к торможению диффузионного потока и к эффективному увеличению растворимости РЗЭ [155]. Кроме того, в процессе диффузии лантаноиды в приповерхностном слое в местах с повышенной плотностью дефектов могут формировать примесные скопления размерами до 0,3 мкм [155, 165]. О наличии в диффузионных слоях Si:Tm и Si:Yb областей разупорядочения (кластеров) свидетельствует вид температурных зависимостей коллоидной подвижности носителей заряда [168]. Следует также отметить, что значения энергий активации диффузии лантаноидов, полученные авторами [163], явно завышены даже по сравнению

с энергией активации самодиффузии кремния, равной 4,7 эВ [159]. При анализе данных следует также учитывать следующее: в монокристалле Si ловушками для РЗЭ являются фоновые технологические примеси и дефекты, образующие с ними комплексы с большой энергией связи. По мере заполнения ловушек изменяется эффективный коэффициент диффузии – в этом случае  $D$  максимально у поверхности кристалла [162].

Таблица 3.7

Значения энергии активации  $\Delta E$  и предэкспоненциального множителя  $D_0$  для диффузии редкоземельных элементов в кремнии

РЗЭ	$\Delta E$ , эВ	$D_0$ , $\text{см}^2 \text{с}^{-1}$	Источник диффузии	Литература
Ть	9,03	$4 \cdot 10^{-1}$	Ть <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (атм. Ar + O <sub>2</sub> )	[163]
	4,0	$1,4 \cdot 10^3$		[155]
Ho	4,48	$1,2 \cdot 10^{-1}$	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (атм. Ar + O <sub>2</sub> )	[163]
	4,1	$4,9 \cdot 10^3$		[155]
Yb	$0,95 \pm 0,5$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	Yb (атм. Ar)	[160]
	4,0	$1,2 \cdot 10^2$	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (атм. Ar)	[162]
Er	3,0	$5 \cdot 10^{-3}$	ErCl <sub>3</sub> (воздух)	[161]
	2,9	$2 \cdot 10^{-3}$	ErCl <sub>3</sub> (воздух)	[159]
	4,96			[163]
Tm	6,08	$8 \cdot 10^{-3}$	TmCl <sub>3</sub> (воздух)	[163]
	3,0			[159]
Gd	8,62	$10^3$	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (атм. Ar)	[163]
	4,3			[162]
Eu	3,5	$10^2$	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (атм. Ar)	[162]
Dy	4,0	$1,5 \cdot 10^2$	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (атм. Ar)	[162]

Данные о диффузии РЗЭ Pt ограничены. Известно [204], что его коэффициент диффузии  $D$  изменяется от  $\sim 9 \cdot 10^{-14}$  (1100 °C) до  $\sim 6 \cdot 10^{-13}$   $\text{см}^2 \text{с}^{-1}$  при 1280 °C. Значения  $D_0$  и  $\Delta E$  авторами [204] не рассчитывались. Сведения о диффузии остальных лантаноидов (Ce, Pm, La, Nd, Sm, Lu) в доступной нам литературе отсутствуют.

Ряд авторов [161, 163] использовали косвенный метод – метод электропроводности, что вызывает сомнения в достоверности результатов, поскольку до настоящего времени вопрос электрической активности РЗЭ в диффузионно-легированном кремнии остается открытым. Так, авторы [166] показали, что диффузия Er в кремний из пленок на основе тетраэтоксисилана, содержащего хлорид эрбия, при температурах 1100...1250 °C приводит к образованию мелких акцепторных центров с энергией  $E_v + 0,045$  эВ. Причем полная концентрация примесных атомов Er ( $N_{Er}$ ) на несколько порядков превышает концентрацию формирующих электрически активных центров, ко-

торая практически не зависит от  $N_{Er}$ , а определяется в основном средой термообработки. Диффузия (или последующая высокотемпературная обработка) в потоке аргона повышала, а в кислородной среде – снижала эффективность образования акцепторных центров, которые, по мнению авторов [166], принадлежат замещающим примесным атомам эрбия. О присутствии мелких акцепторных центров в кремнии, диффузионно-легированном Er, Yb, Gd, Tm, Dy и Lu, утверждают также авторы [161, 163, 164, 167, 168].

В ряде других работ [160, 165, 169] наблюдалось введение донорных уровней при диффузии иттербия из газовой фазы. Обнаружено два донорных уровня ( $E_C - 0,23$  и  $E_C - 0,31$  эВ) в кремнии, выращенном по методу Чохральского. В бескислородных образцах наблюдался лишь уровень  $E_C - 0,31$  эВ. Концентрация электрически активных центров Yb в кремнии зависит от концентрации и типа исходной легирующей примеси. С ростом содержания бора концентрация донорных центров Yb увеличивалась и достигала значений  $(1,5...2,0) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> при температуре 1250 °С. В n-Si максимальная концентрация донорных центров иттербия равна  $(4...5) \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Указанные донорные центры термически нестабильны: они распадаются при температурах свыше 150 °С; энергия активации распада –  $0,50 \pm 0,02$  эВ.

Нет однозначного мнения и по механизму диффузии редкоземельных элементов в кремнии. Авторами [160] предполагается, что диффузия Yb происходит по междоузлиям с образованием твердого раствора внедрения. Другие исследователи [161] утверждают, что атомы лантаноидов (Er, Pr, Tm), подобно другим элементам III группы Периодической системы, диффундируют по узлам кристаллической решетки. О вакансионном механизме диффузии PЗЭ Tb и Ho с участием химической реакции свидетельствуют результаты работы [155]. Авторами [102, 162] предполагается смешанный механизм диффузии PЗЭ с захватом на ловушках, в роли которых могут выступать фоновые технологические примеси и дефекты.

В диффузионных слоях Si:Yb (как и в монокристаллах Si:PЗЭ) наблюдался эффект подавления генерации радиационных дефектов – скорости удаления носителей заряда и константы деградации времени жизни в образцах Si:Yb существенно меньше, чем в исходных (без иттербия) образцах [165]. При увеличении концентрации Yb скорость радиационного дефектообразования уменьшается.

Авторы работы [41] считали, что лантаноиды имеют столь малые коэффициенты диффузии в монокристаллическом кремнии, что ни облучение высокоэнергетичными частицами, ни термообработка не могут вызы-



вать существенных изменений размеров и структуры их включений в кристаллах. Действительно, при прогреве в области температур 100...1300 °С, а также после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , быстрыми электронами (энергия до 10 МэВ) и последующем отжиге, а также после облучения реакторными нейтронами видимые размеры и форма включений РЗЭ не изменяются. Однако облучение и последующая высокотемпературная обработка нейтронно-облученного кремния могут при определенных условиях существенно изменить диффузионную способность примесей [145]. Это может быть в значительной степени обусловлено увеличением концентрации дефектов кристаллической решетки (прежде всего вакансий) по которым осуществляется диффузия.

Как показали исследования, методом растровой электронной микроскопии в сочетании с рентгеновским локальным зондовым микроанализом при термообработке облученных нейтронами монокристаллов Si:Er в диапазоне температур 600...650 °С наблюдаются изменения видимой границы скоплений РЗЭ и профиля распределения лантаноида вблизи включений (рис. 3.13) вследствие диффузии редкоземельного элемента в объем монокристалла. Наиболее интенсивно процесс диффузии протекает в начальный период отжига. При длительности термообработки более 30 минут его эффективность существенно уменьшается.

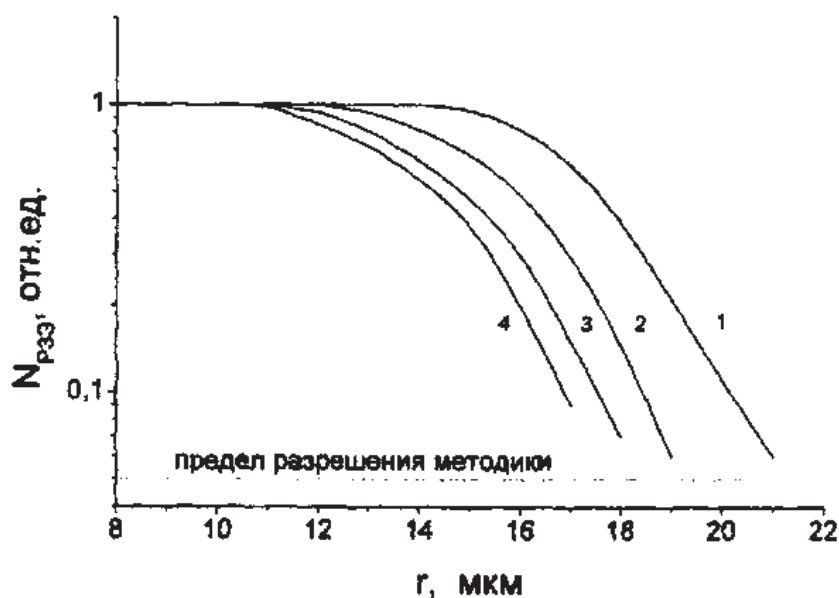


Рис. 3.13. Изменение профиля распределения Er в нейтронно-облученном ( $\Phi = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) кремнии, подвергнутом термообработке при 650 °С. Длительность ТО, мин: 1 – 0; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 45

Заметных изменений формы и размеров включений, а также профиля распределения РЗЭ при температурах ниже 600 °С и выше 650 °С зарегистрировано не было.

С целью определения коэффициента диффузии редкоземельного элемента Ег были проанализированы экспериментальные и теоретические диффузионные профили, рассчитанные для случая диффузии из сферической области в бесконечную матрицу полупроводника. На рис. 3.14 видно, что экспериментальные профили не удается описать на основании второго закона Фика с постоянным коэффициентом диффузии (кривая 3). Поэтому было выполнено численное решение общего уравнения

$$\frac{\partial N(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ D r^2 \frac{\partial N(r,t)}{\partial r} \right], \quad (3.7)$$

где коэффициент диффузии  $D$  является функцией концентрации диффундирующего вещества  $D = D(N_{\text{РЗЭ}})$ .

Вводя безразмерные величины  $C = N_{\text{РЗЭ}}(r,t) / N_{\text{РЗЭ}}(0,0)$ ;  $\tau = t / t_0$ ;  $x = r / r_0$ ;  $\bar{D}(C) = D(N_{\text{РЗЭ}}) t_0 r_0^{-2}$ , уравнение (3.7) приводилось к виду

$$x^2 \frac{\partial C(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ x^2 \bar{D}(C) \frac{\partial C(x,\tau)}{\partial x} \right] \quad (3.8)$$

при следующих начальных и граничных условиях:

$$C(x,0) = \begin{cases} 1; & 0 \leq x \leq 1 \\ \exp[-9,113(x-1)^{1,411}]; & x > 1 \end{cases} \\ C(0,\tau) = 1 \quad (3.9)$$

$$C(x,\tau) \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \infty.$$

Функциональная зависимость коэффициента диффузии от концентрации  $C$  выбиралась в виде

$$\bar{D}(C) = \begin{cases} \bar{D}_1 (1-C)^{m_1}; & C \geq C_{sp} \\ \bar{D}_1 (1-C)^{m_1} + \bar{D}_2 (C_{sp} - C)^{m_2}; & C < C_{sp} \end{cases}, \quad (3.10)$$

где коэффициенты  $\bar{D}_1$ ,  $\bar{D}_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  и  $C_{sp}$  определялись методом наименьших квадратов подгонкой теоретического диффузионного профиля  $C(x,t)$  к экспериментальному. На кривой 2 (рис. 3.14) представлен теоретически рассчитанный профиль при следующих значениях коэффициентов:  $\bar{D}_1 = 0,025$ ;  $\bar{D}_2 = 14 \pm 4$ ;  $m_1 = 0,7$ ;  $m_2 = 1$ ;  $C_{sp} = 0,08$ .

Отметим, что точность определения величины  $D$  ограничена точностью измерения диффузионного профиля при больших  $x$  (малых концентрациях редкоземельных элементов).

Рассчитанное значение коэффициента диффузии для предельно малых концентраций лантаноида ( $N_{\text{PzZ}} \rightarrow 0$ ):

$$D(0) = (2,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-9} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}.$$

Для примеси эрбия с учетом величины  $\Delta E$  (энергия активация процесса диффузии), определенной в [155]. Это соответствует значению предэкспоненциального множителя  $D_0 = (55 \pm 10) \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  в уравнении Аррениуса

$$D = D_0 \exp(-\Delta E/kT). \quad (3.11)$$

Для других исследовавшихся примесей лантанодов значения  $D_0$  отличались не более чем на 50 %. Их поведение при отжиге нейтронно-облученного материала было аналогично примеси Ер.

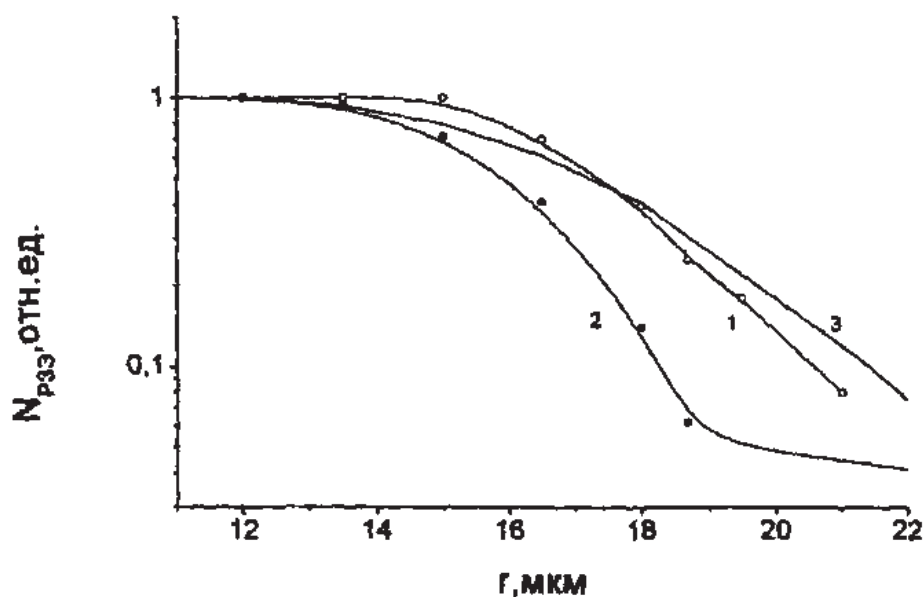


Рис. 3.14. Теоретические и экспериментальные профили распределения Ер в кремнии, подвергнутом термообработке при 650 °С:  
 1 – исходный профиль ( $t_{\text{т0}} = 0$ ); 2 – профиль распределения при  $t_{\text{т0}} = 15$  мин  
 (■ – эксперимент, сплошная кривая – теоретический расчет при  $D = D(N)$ );  
 3 – теоретическая кривая для  $t_{\text{т0}} = 15$  мин при  $D = \text{const}$

Следует отметить, что величина  $D_0$ , полученная в данном случае, существенно превышает значения, определенные для необлученных кристаллов [155]. Принимая во внимание сильную концентрационную зависимость коэффициента диффузии, а также тот факт, что скопления лантаноидов после облучения окружены повышенной концентрацией созданных облучением вакансий, поскольку являются для них эффективными стоками [132], было сделано заключение о вакансионном механизме миграции атомов лантаноидов. Так как температурная зависимость коэффициента диффузии РЗЭ носит экспоненциальный характер, то при относительно малых температурах ( $< 600$  °С) не происходит эффективного высвобождения диффузанта из включений. С другой стороны, при температурах свыше  $650$  °С в кремнии имеет место быстрый отжиг имеющих радиационное происхождение многовакансионных центров. Именно этими двумя обстоятельствами и определяется в основном ограниченность температурного интервала, в котором наблюдается диффузия редкоземельного элемента. Следует отметить, что обнаруженный эффект, являющийся проявлением радиационно-ускоренной диффузии, может быть использован для повышения гомогенности распределения лантаноидов при легировании монокристаллов кремния.

Характерно, что по данным электрических измерений в этом же температурном интервале в процессе отжига нейтронно-облученного Si:РЗЭ образуются акцепторные центры с энергетическим уровнем  $E_v + (0,11 \pm 0,01)$  эВ, которые включают в свой состав атомы редкоземельных элементов [156]. Одновременно в спектрах ИК поглощения появляются соответствующие данным дефектам полосы при  $781$  и  $789$   $\text{см}^{-1}$ . Отжиг указанных центров происходит при температурах свыше  $650$  °С. Приведенные выше результаты подтверждают предположение, что их образование обусловлено ускорением при повышенной температуре диффузии РЗЭ, стимулированной наличием большого числа вакансий вокруг их включений в результате облучения.

В заключение следует отметить, что отсутствие экспериментально зарегистрированных изменений размеров скоплений и профилей распределения РЗЭ при отжиге облученного  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  и быстрыми электронами материала обусловлено, вероятно, значительно меньшим коэффициентом радиационного повреждения по сравнению с облучением реакторными нейтронами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rare Earth Doped Semiconductors // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. / Ed. Pomrenke G.S. et al. – Pittsburgh, Pennsylvania, 1993. – V. 301. – 418 p.
2. Назыров Д.Э., Регель А.Р., Куликов Г.С. Кремний, легированный редкоземельными элементами. – Л., 1987. – 52 с. – (Препринт / Физико-технический институт АН СССР; № 1122).
3. Мастеров В.Ф. Электронная структура примесей редкоземельных элементов в соединениях  $A^3B^5$  // Физика и техника полупроводников. – 1993. – Т. 27, № 9. – С. 1435 – 1452.
4. Захаренков Л.Ф., Козловский В.В. Влияние редкоземельных элементов на свойства объемных кристаллов  $A^3B^5$  // Неорганические материалы. – 1995. – Т. 31, № 8. – С. 997 – 1006.
5. Мастеров В.Ф., Захаренков Л.Ф. Редкоземельные элементы в полупроводниках  $A^3B^5$  // Физика и техника полупроводников. – 1990. – Т. 24, № 4. – С. 610 – 630.
6. Просолович В.С. Радиационные и термодфекты в кремнии с редкоземельными элементами: Автореф. дис....канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / Бел. гос. ун-т. – Минск, 1987. – 15 с.
7. Неймаш В.Б., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Внутренние геттеры и радиационное дефектообразование в Si. – Киев, 1987. – 55 с. – (Препринт / Институт физики АН УССР; № 25)
8. Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Особенности поведения в полях ядерной радиации кремния, легированного редкоземельными элементами // Радиационные эффекты в твердых телах. – Киев: Наукова думка, 1977. – С. 88 – 102.
9. Мильвидский М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
10. Соболев Н.А., Бреслер М.С., Гусев О.Б., Макавийчук М.И., Паршин Е.О., Шек Е.И. Влияние условий отжига на интенсивность фотолуминесценции в Si:Er // Физика и техника полупроводников. – 1994. – Т. 28, № 11. – С.1995 – 2000.
11. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. – М.: Высшая школа, 1998. – С. 698 – 707.
12. Коттон Ф., Уилкинсон Дж. Современная неорганическая химия. Ч. 3. Химия переходных элементов. – М.: Мир, 1969. – С. 500 – 524. (Cotton F.A., Wilkinson G. Advanced inorganic chemistry. A comprehensive text)
13. Кремерс Г.Э. Металлургия редкоземельных металлов – М.: Иностранная литература, 1962. – С. 8.
14. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. Металловедение редкоземельных металлов. – М.: Наука, 1975. – 271 с.

15. Соединения редкоземельных элементов: гидриды, бориды, карбиды, фосфиды, пниктиды, халькогениды, псевдогалогениды / Под ред. А.А. Елисеева. – М.: Наука, 1983. – 270 с.
16. Физика и химия редкоземельных элементов: Справочник / Под ред. К. Гшнайнднера, Л. Айринга. – М.: Металлургия, 1982. – 336 с.
17. Лантаноиды и актиноиды / Под ред. К.У. Бэгналла. – М.: Атомиздат, 1977. – 287 с.
18. Следдинг Ф., Даан А. Редкоземельные металлы. – М.: Мир, 1965. – 610 с.
19. Гшнейнднер К. Сплавы редкоземельных металлов. – М.: Мир, 1965. – 426 с.
20. Бандуркин Г.А., Джурицкий Б.Ф., Тананаев И.В. Особенности кристаллохимии соединений редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1984. – 229 с.
21. Трифонов Д.Н. Редкоземельные элементы. – М.: АН СССР, 1965.
22. Шямон Л.Л. Эффективные сечения возбуждения и ионизации атомов редкоземельных элементов. – М.: Энергоиздат, 1994. – 144 с.
23. Спицын В.И., Вохмин В.Г., ИONOVA Г.В. Внутривидовая периодичность ионных радиусов лантанидов и актинидов // Журнал неорганической химии. – 1983. – Т. 28, № 4. – С. 819 – 829.
24. Мастеров В.Ф., Насредин Ф.С., Серегин П.П., Теруков Е.И., Мездрогина М.М. Примесные атомы эрбия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 6. – С. 708 – 711.
25. Borschensky V.V., Brinkevich D.I., Petrov V.V., Prosolovich V.S. Monocrystal dislocationless Si:Ge, grown from the melt with Gd impurity // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. V. 301. Rare Earth Doped Semicond. – Pittsburgh, 1993. – P. 73 – 78.
26. Александров О.В., Николаев Ю.А., Соболев Н.А. Перераспределение гольмия при твердофазной эпитаксиальной кристаллизации аморфизированных слоев кремния // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, № 1. – С. 3 – 7.
27. Rare Earth Doped Semiconductors II // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. / Ed. Pomrenke G.S. et al. – Pittsburgh, Pennsylvania. – 1997. – V. 422. – 384 p.
28. Антоненко Р.С., Карпов Ю.А., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л., Шпинар Л.И., Ясковец И.И. Электрофизические свойства облученного p-Si с примесью гадолиния // Физика и техника полупроводников. – 1978. – Т. 12, № 9. – С. 1707 – 1713.
29. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Карпов Ю.А., Туровский Б.М. Термостабильность кремния, легированного примесями РЗЭ при выращивании методом Чохральского // Журнал технической физики. – 1984. – Т. 54, № 1. – С. 207 – 208.
30. Петров В.В., Просолович В.С., Ткачев В.Д., Цырулькевич Г.С., Карпов Ю.А. Термодоноры в кремнии, легированном эрбием // Физика и техника полупроводников. – 1985. – Т. 19, № 4. – С. 767 – 769.

31. US patent 3409554. Кл. 252-62.3, 1968 // Gd or Sm doped silicon semiconductor composition / Mandelkorn J., Heights C.
32. Mandelkorn J., Schwartz L., Broder J., Kautz H., Ulman R. Effect of impurities on radiation damage of silicon solar cells // *Journal of Applied Physics*. – 1964. – V. 35, № 7. – P. 2258 – 2260.
33. Александров О.В., Николаев Ю.А., Соболев Н.А. Модель перераспределения эрбия в процессе твердофазной эпитаксиальной кристаллизации кремния // *Физика и техника полупроводников*. – 1998. – Т. 32, № 12. – С. 1420 – 1423.
34. Александров О.В., Захарьин А.О., Соболев Н.А., Шех Е.И., Маковийчук М.И., Паршин Е.О. Образование донорных центров при отжиге кремния, имплантированного диспрозием и гольмием // *Физика и техника полупроводников*. – 1998. – Т. 32, № 9. – С. 1029 – 1032.
35. Вигдорович В.Н. Очистка металлов и полупроводников кристаллизацией. – М.: Металлургия, 1969. – 296 с.
36. Мильвидский М.Г., Карпов Ю.А., Туровский Б.М., Воронков В.В., Ковалева Т.А. Монокристаллический кремний, легированный некоторыми редкими и переходными элементами // *Легированные полупроводниковые материалы*. – М.: Наука, 1985. – С. 97 – 102.
37. Бочкарев Э.П., Гришин В.П., Карпов Ю.А., Марунина Н.И. О сегрегации гадолиния при выращивании монокристаллов методом Чохральского // *Свойства легированных полупроводников*. – М.: Наука, 1977. – С. 88 – 90.
38. Туровский Б.М., Головин Б.И., Карпов Ю.А., Чесноков С.А. О получении бездислокационных монокристаллов кремния, легированных редкоземельными элементами // *Получение и исследование полупроводниковых материалов. Сб. науч. трудов. Т. 133*. – М.: Изд-во Гиредмета, 1986. – С.3-7.
39. Андрианов Д.Г., Бочкарев Э.П., Гришин В.П., Карпов Ю.А., Савельев А.С. Магнитные свойства и взаимодействие примесей в кристаллах Si<Gd> // *Физика и техника полупроводников*. – 1978. – Т. 12, № 3. – С. 511 – 519.
40. Гусаков В.Е., Петров В.В., Просолович В.С., Чесноков С.А., Янковский Ю.Н. Особенности структуры кремния, легированного редкоземельными элементами // *Электронная техника. Сер. Материалы*. – 1989. – № 4. – С. 29 – 32.
41. Дранчук С.Н., Карпов Ю.А., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Особенности структуры кремния, легированного гадолинием // *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. – 1981. – Т. 17, № 5. – С. 757 – 761.
42. Баграев Н.Т., Власенко Л.С. Оптическая поляризация ядер в полупроводниках с магнитными примесями // *Расширенные тезисы докл. VI междунар. конф. по росту кристаллов*. – М.: ВИНТИ, 1980. – Т. IV. – С. 285 – 286.

43. Гришян В.П., Карпов Ю.А., Корнюшин С.И., Лапкарёв Г.В., Матвеев В.Т., Шаховцов В.И., Шевченко А.Д., Шиндич В.Л. Некоторые свойства кремния, легированного гадолинием // Украинский физический журнал. – 1976. – Т. 21, № 2. – С. 334 – 336.
44. Антоненко Р.С., Неймаш В.Б., Соснян М.Г., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Дефектообразование в р-кремнии с примесью иттербия // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1982. – Вып. 4 (23). – С. 38-39.
45. Бочкарев Э.П., Воронкова Г.И., Иглицын М.И., Салманов А.Р., Гришян В.П., Карпов Ю.А. Включения второй фазы в кремнии, легированном самарием // Научные труды Гиредмета. – 1975. – Т. 65. – С. 61 – 65.
46. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Карпов Ю.А., Туровский Б.М. Определение концентрации примесей в областях второй фазы в кремнии // Физика твердого тела. – 1981. – Т. 23, № 1. – С. 302 – 304.
47. Аюпов К.С., Зайнабидинов С.З., Карпов Ю.А., Фистуль В.И. Барический распад преципитатов гадолиния в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1987. – Т. 21, № 4. – С. 764 – 765.
48. Гусаков В.Е., Петров В.В., Просолович В.С., Чесноков С.А., Янковский Ю.Н. Особенности структуры кремния, легированного редкоземельными элементами // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. по физико-химическим основам полупроводниковых материалов: Сб. материалов. – М.: Наука, 1988. – С. 111 – 112.
49. Брянкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. Структуры на основе кремния, легированного редкоземельными и изовалентными примесями / Бел. гос. ун-т. – Минск, 2001. – 22 с. – Деп. в БелИСА 13.06 2001, № Д200147 // Реферативный сборник непубликуемых работ. Вып. 2 (21), 2001.
50. Петров В.В. Примесно-дефектное взаимодействие в кремнии, легированном лантаноидами, алюминием и изовалентными примесями: Дисс...доктора физ.-мат. наук: 10.04.10 / Бел. гос. ун-т. – Минск, 1999. – 356 с.
51. А. с. № 1384121 СССР. МКИ Н 01 L 21/66. Способ контроля содержания лантаноидов в кремнии / Быковский В.А., Дутов А.Г., Комар В.А., Петров В.В., Просолович В.С./ Бел. гос. ун-т; Ин-т физики твердого тела и полупроводников АН БССР – № 4041743/31-25 от 24.01.86; опубл. 22.11.1987.
52. Бугай А.А., Кустов В.Е., Семенов Ю.Г., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. ЭПР тензозондов в кремнии, легированном гадолинием // Физика твердого тела. – 1985. – Т. 27, № 6. – С. 1824 – 1829.
53. Кустов В.Е., Трипачко Н.А., Чесноков С.А., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Внутренние упругие напряжения в кремнии, легированном гадолинием // Физика и техника полупроводников. – 1988. – Т. 22, № 12. – С. 2220 – 2223.



54. Бринкевич Д.И., Вабищевич Н.В., Просолович В.С. Поведение металлических примесей при геттерирующей термообработке кремния // Микроэлектроника. – 1997. – Т. 26, № 5. – С. 392 – 395.
55. Дутов А.Г., Комар В.А., Петров В.В., Просолович В.С., Чесноков С.А., Янковский Ю.Н. Геттерирование технологических примесей редкоземельными элементами в кремнии // Материалы 7-й междунар. конф. по микроэлектронике. – Минск, 1990. – Т. 1. – С. 34 – 36.
56. Петров В.В., Просолович В.С., Чесноков С.А. Исследование процессов геттерирования технологических примесей в кремнии, легированном редкоземельными элементами // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. – 1991. – № 6 (260) – С. 36 – 38.
57. Салманов А.Р., Александрова Г.И., Воронкова Г.И., Ильин М.А., Гришин В.П., Карпов Ю.А. Взаимодействие примесей редкоземельных элементов с углеродом в кремнии // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1978. – Т. 14, № 1. – С. 85 – 88.
58. Борщевский В.В., Бринкевич Д.И., Горбачева Н.И., Петров В.В., Просолович В.С. Влияние легирования германием и гадoliniем на термостабильность монокристаллического бездислокационного кремния // Высокочистые вещества. – 1991. – № 4. – С. 61 – 64.
59. Дутов А.С., Карпов Ю.А., Комар В.А., Петров В.В., Просолович В.С., Туровский Б.М., Чесноков С.А., Янковский Ю.Н. Особенности генерации термодоноров в дислокационном кремнии, легированном редкоземельными элементами // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1989. – Т. 25, № 10. – С. 1589 – 1592.
60. Воронкова Г.И., Иглицын М.И., Салманов А.Р. Поведение гольмия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1974. – Т. 8, № 8. – С. 1607 – 1609.
61. Кулиш У.М., Гамидов З.С., Кузнецова И.Ю., Петкеева Л.Н., Борликова Г.В. Микротвердость эпитаксиальных слоев GaAs, легированного PЗЭ // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1989. – Т. 25, № 10. – С. 1741 – 1743.
62. Арбенина В.В., Кабанова Е.Г. Прочностные характеристики эпитаксиальных слоев арсенида галлия, легированного различными примесями // Неорганические материалы. – 1999. – Т. 35, № 12. – С. 1420 – 1424.
63. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Петров В.В. Влияние примесей ШВ и IV групп на микротвердость монокристаллического кремния // Микроэлектроника. – 1997. – Т. 26, № 4. – С. 297 – 300.
64. Вабищевич С.А., Бринкевич Д.И., Вабищевич Н.В., Явид В.Ю. Микротвердость кремния и германия, выращенных из содержащих редкоземельные примеси расплавов // Физика процессов деформации и разрушения и прогнозирование механического поведения материалов. Труды XXXVI международного семинара "Актуальные проблемы прочности". – Витебск, 2000. – Ч. 1. – С. 150 – 153.

65. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А. Микротвердость кремния, легированного редкоземельными и изовалентными примесями // Неорганические материалы. – 1994. – Т. 30, № 5. – С. 599 – 602.
66. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Петров В.В. Микротвердость кремния, легированного редкоземельными и изовалентными примесями // Тез. докл. I Всерос. конф. по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния. – М., 1996. – С. 45.
67. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Явид В.Ю. Микротвердость ковалентных полупроводников, легированных редкоземельными примесями // Вестник БГУ. Сер. Физика, математика, информатика. – 2002. – № 1. – С. 53 – 56.
68. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. – М.: Радио и связь. – 1982. – 240 с.
69. Harada H., Sumino K. Indentation rosettes and dislocation locking by oxygen in silicon // Journal of Applied Physics. – 1982. – V. 53, № 7. – P. 4838 – 4842.
70. Sumino K. Interaction of dislocations with impurities and its influence on the mechanical properties of silicon crystals // Defect Semiconductors symp., Boston, Mass., Nov., 1982. – N.Y.e.a., 1983. – P. 307 – 321.
71. Головин Б.И., Карпов Ю.А., Петров В.В., Просолович В.С., Туровский Б.М., Чесноков С.А. Влияние примеси лютетия на дефектообразование в кремнии // Получение и исследование полупроводниковых материалов. Науч. тр. Гиредмета. – М.: Наука, 1986. – Т. 133. – С. 121 – 124.
72. Алимов О.М., Петров В.В., Харченко Т.Д., Явид В.Ю. Особенности легирования германия фосфором в присутствии неодима // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32, № 10. – С. 1165 – 1167.
73. Карпов Ю.А., Мазуренко В.В., Петров В.В., Просолович В.С., Ткачев В.Д. О взаимодействии атомов редкоземельных элементов с кислородом в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1984. – Т. 18, № 2. – С. 368 – 369.
74. Воронкова Г.И., Иглицын М.И., Салманов А.Р. Энергетические уровни в термообработанном кремнии, легированном самарием // Физика и техника полупроводников – 1975. – Т. 9, № 3. – С. 499 – 502.
75. Бринкевич Д.И., Лукашевич М.Г., Просолович В.С., Скрипка Д.А., Янковский Ю.Н. Влияние редкоземельных примесей на магниторезистивный эффект в монокристаллическом кремнии // Неорганические материалы. – 2002. – Т. 38, № 7. – С. 775 – 777.
76. Бринкевич Д.И., Лукашевич М.Г., Петров В.В., Просолович В.С., Скрипка Д.А., Янковский Ю.Н. Гигантский магниторезистивный эффект в кремнии, легированном редкоземельными элементами // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2002. – № 2. – С. 102 – 104.

77. Бринкевич Д.И., Лукашевич М.Г., Петров В.В., Просолович В.С., Скрипка Д.А., Янковский Ю.Н. Магнитные свойства кремния, легированного редкоземельными элементами // Тезисы лекций и докладов Второй Российской школы ученых и молодых специалистов по материаловедению и технологиям получения легированных кристаллов кремния ("Кремний. Школа-2001"). 2 – 6 июля 2001 г., М.: МИСиС. 2001. – С. 20 – 21.
78. Toyozawa Y. Theory of Localized spins and Negative Magnitoresistance in Metallic Impurity Conduction // J. Phys. Soc. Japan. – 1962. – V. 17, № 6. – P. 986 – 1024.
79. Berkowitz A.E., Mitchell J.R., Carey M.J., Yung A.P., Zhang S., Spada F.E., Parker F.T., Hutten A., Thomas G. Giant magnitoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys // Physical Review Letters. – 1992. – V. 68, № 25. – P. 3745 – 3748.
80. Андрианов Д.Г., Бочкарев Э.П., Гришин В.П., Карпов Ю.А., Савельев А.С. Магнитная восприимчивость кремния, легированного гадолинием // Физика и техника полупроводников. – 1974. – Т. 8, № 3. – С. 499 – 502.
81. Андрианов Д.Г., Гимельфарб Ф.А., Купшир П.И., Лопатинский И.Е., Папковский М.В., Савельев А.С., Фистуль В.И. Магнитные свойства твердых растворов в системе  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10, № 1. – С. 111 – 115.
82. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Житников Р.А., Иванов-Омский В.И., Лебедев А.А., Малькова А.А., Карпов Ю.А. Исследование фотопроводимости кремния n-типа с примесью гадолиния // Физика и техника полупроводников. – 1979. – Т. 13, № 2. – С. 365 – 367.
83. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Меркулов И.А., Лебедев А.А., Юсупов П. Аномалии фотопроводимости в полупроводниках, легированных магнитными примесями // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1980. – Т. 32, № 3. – С. 212 – 216.
84. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Лебедев А.А., Меркулов И.А., Юсупов П. Индуцированная фотопроводимость в полупроводниках с обменными примесными уровнями // Физика и техника полупроводников. – 1981. – Т. 15, № 4. – С. 803 – 805.
85. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Житников Р.А. Влияние глубины залегания донорных уровней на степень оптической ориентации ядер  $^{29}Si$  в кремнии // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1976. – Т. 24, № 7. – С. 401 – 403.
86. Баграев Н.Т., Бочкарев Э.П., Власенко Л.С., Гришин В.П., Житников Р.А., Карпов Ю.А. Исследование поведения примесей Ho, Gd, Yb в кремнии // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1978. – Т. 14, № 4. – С. 614 – 617.

87. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Меркулов И.А. Оптическая поляризация ядер в полупроводниках с магнитными примесями // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1981. – Т. 81, № 6. – С. 2160 – 2174.
88. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Гришин В.П., Карпов Ю.А., Туровский Б.М. Влияние гадолия на распад твердого раствора золота в кремнии // Легирование полупроводников. – М.: Наука, 1982. – С. 249 – 252.
89. Бабич В.М., Блецкая Н.И., Венгер Н.Н. Кислород в монокристаллах кремния. – Киев: Интерпресс-ЛТД, 1997. – 233 с.
90. Kaiser W., Frisch H.L., Reiss H. Mechanism of the formation of donor states in heat-treated silicon // Physical Review. – 1958. – V. 112, № 5. – P. 1546 – 1554.
91. Henry P.M., Farmer J.W., Meese J.M. Symmetry and electronic properties of the oxygen thermal donor in pulled silicon // Applied Physics Letters. – 1984. – V. 45, № 4. – P. 454 – 456.
92. Gosele U., Tan T.Y. Oxygen diffusion and thermal donor formation in silicon // Applied Physics A. – 1982. – V. 28, № 1. – P. 79 – 82.
93. Ourmazd A., Schrofer W., Bourret A. Oxygen-related thermal donors in silicon: A new structural and kinetic model // Journal of Applied Physics. – 1984. – V. 56, № 6. – P. 1670 – 1681.
94. Wruck D., Gaworzewski P. Electrical and infrared spectroscopic investigations of oxygen-related donors in silicon // Physica Status Solidi. – 1979. – V. 56A, № 2. – P. 557 – 564.
95. Kanamori A., Kanamori M. Comparison of two kinds of oxygen donors in silicon by resistivity measurements // Journal of Applied Physics. – 1979. – V. 50, № 12. – P. 8095 – 8101.
96. Батавин В.В., Кочина Э.А., Сальник З.А. О механизме образования термодоноров в содержащем кислород кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1985. – Т. 19, № 4. – С. 692 – 696.
97. Shimura F., Tsuya H., Kawamura T. Precipitation and redistribution of oxygen in Czochralski-grown silicon // Applied Physics Letters. – 1980. – V. 37, № 6. – P. 483 – 486.
98. Leskoschek W., Feichtinger H., Vidrich G. Thermally induced defects in n-type and p-type silicon // Physica Status Solidi. – 1973. – V. 20A, № 2. – P. 601 – 610.
99. Lee Y.H., Kleinhenz R.L., Corbett J.W. EPR studies on quenched-in defects // Defects and Radiation Effects in Semiconductors. – Bristol, London, 1979. – P. 521 – 527.
100. Petrov V.V., Prosolovich V.S. Thermal defects in silicon doped with rare-earth elements // Physica Status Solidi. – 1989. – V. 112A, № 2. – P. 561 – 568.
101. Ормонт Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников. – М.: Высшая школа, 1982. – 528 с.

102. Коковина В.Н., Фролова Т.Н. Исследование многокомпонентной диффузии примесей в кремний // Известия Ленингр. электротехн. ин-та. – 1978. – Вып. 228. – С. 131 – 134.
103. Шик А.Я. Проводимость облученных полупроводников // Физика и техника полупроводников. – 1977. – Т. 11, № 9. – С. 1758 – 1764.
104. Садигов В.П. Электрические свойства кремния, облученного частицами высоких энергий: Автореф. дис....канд. физ.-мат. наук: 01.04.10. – Киев, 1973. – 10 с.
105. Norde H., de Sousa Pires J., d'Heurle F., Pesavento F., Petersson S., Tove P.A. The Schottky-barrier height of the contacts between some rare-earth metals (and silicides) and p-type silicon // Applied Physics Letters. – 1981. – V. 38, № 11. – P. 865 – 868.
106. Петров В.В., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. Поведение примесей кислорода в кремнии, легированном эрбием // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2002. – № 1. – С. 19 – 22.
107. Физико-химические свойства элементов / Под ред. Г.Е. Самсонова. – Киев: Наукова думка, 1965. – 808 с.
108. Binetti S., Pizzini S., Cavallini A., Fraboni B. Erbium doped silicon epilayers grown by liquid phase epitaxy // Физика и техника полупроводников – 1999. – Т. 33, № 6. – С. 642 – 643.
109. Emtsev V.V., Emtsev V.V. jr., Poloskin D.S., Shek E.I., Sobolev N.A., Michel J., Kimerling L.C. Oxygen and erbium related donor centers in Czochralski grown silicon implanted with erbium // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 10. – С. 1192 – 1195.
110. Ильин Н.П., Мастеров В.Ф. Электронная структура комплекса Er-O<sub>6</sub> в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31, № 9. – С. 1037 – 1043.
111. Головин Б.И., Карпов Ю.А., Петров В.В., Просолович В.С., Туровский Б.М., Чесноков С.А. Влияние примеси лутеция на дефектообразование в кремнии // Получение и исследование полупроводниковых материалов. Сб. науч. тр. Т.133. – М.: Изд-во Гиредмета, 1986. – С. 121 – 124.
112. Сальник З.И., Смыслова А.Г., Смирнов Б.В., Федулов Ю.П. Термодонорный эффект в монокристаллах кремния, выращенных методом Чохральского // Науч. тр. Гиредмета. – М.:Изд-во Гиредмета, 1980. – Т. 102. – С. 123 – 129.
113. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. – М.:Атомиздат,1972. – 600 с.
114. Бринкевич Д.И., Крюков В.Л., Петров В.В., Соколов Е.Б., Фурманов Г.П. Влияние быстродиффундирующих примесей на генерацию термодоноров в кремнии // Письма в журнал технической физики. – 1991. – Т. 17, № 1. – С. 14 – 16.
115. Некрасов Б.В. Основы общей химии. – М.: Химия, 1969. – Т. 1. – 518 с.

116. Bean A.R., Newman R.C. The effect of carbon on thermal donor formation in heat treated pulled silicon crystals // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1972. – V. 33, № 2. – P. 255 – 268.
117. Lerouelle J. Influence of carbon on oxygen behaviour in silicon // *Physica Status Solidi.* – 1981. – V. 67A, № 1. – P. 177 – 181.
118. Петров В.В., Просолович В.С., Цырулькевич Г.С., Карпов Ю.А. Поведение кремния, легированного эрбием, при высокотемпературной обработке // *Известия АН СССР. Неорганические материалы.* – 1987. – Т. 23, № 8. – С. 1386 – 1387.
119. Нейман В.Б., Сирацкий В.М., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л., Чесноков С.Н. Термическое дефектообразование в кремнии с примесью гадолиния // *Украинский физический журнал.* – 1987. – Т. 32, № 10. – С. 1550 – 1552.
120. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Добровенский В.В., Шагун А.И. Возможности повышения термостабильности монокристаллического кремния для мощных полупроводниковых приборов // *Журнал технической физики.* – 1984. – Т. 54, № 5. – С. 917 – 928.
121. Петров В.В., Просолович В.С., Ткачев В.Д., Карпов Ю.А. Закалочные дефекты в кремнии, легированном редкоземельными элементами // *Доклады АН БССР.* – 1986. – Т.30, № 3. – С.227-229.
122. Feichtinger H. Influence of additional gold doping on the Fe-solid solution in silicon // *Defects and Radiation Effects in Semiconductors.* – Bristol, London, 1979. – P.533-538.
123. Muller S.N., Sprenger M., Silvert E.G., Ammerlaan C.A.J. EPR spectra of heat-treatment centers in oxygen rich silicon // *Solid State Communications.* – 1978. – V. 25, № 4. – P. 887 – 890.
124. Бринкевич Д.И., Горбачева Н.И., Петров В.В., Просолович В.С. Термическое дефектообразование в кремнии, легированном германием и гадолинием // *Электронная техника. Сер. 6. Материалы.* – 1991. – № 6. – С. 58 – 61.
125. Бринкевич Д.И., Маркевич В.П., Мурин Л.И., Петров В.В. Кинетика образования термодоноров в кристаллах Si:(Ge,O) // *Физика и техника полупроводников.* – 1992. – Т.26, № 4. – С. 682 – 690.
126. Глазов В.М., Потемкин А.Я., Тимошина Г.Г., Михайлова М.С. О возможности повышения термостабильности Si путем его легирования переходными либо редкоземельными металлами // *Физика и техника полупроводников.* – 1997. – Т. 31, № 9. – С. 1025 – 1028.
127. *Физические процессы в облученных полупроводниках* /Под ред. Л.С. Смирнова. – Новосибирск: Наука, 1977. – 254 с.
128. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Атомиздат, 1969. – 312 с.

129. Конозенко И.Д., Семенюк А.К., Хиврич И.В. Радиационные эффекты в кремнии. – Киев: Наукова думка, 1974. – 199 с.
130. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. – М.: Наука, 1988. – 191 с.
131. Антоненко Р.С., Корнюшин С.И., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л., Ясковец И.И. Радиационные эффекты в кремнии, легированном гадолинием // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10, № 8. – С. 1583 – 1586.
132. Шиндич В.Л. Исследование процессов радиационного дефектообразования в кремнии, легированном редкоземельными элементами: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Ин-т физики АН УССР. – Киев, 1982. – 19 с.
133. Карпов Ю.А., Петров В.В., Просолович В.С. Фотопроводимость и электрические свойства  $\text{Si}\langle\text{Er}\rangle$ , облученного  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  // Физика и техника полупроводников. – 1982. – Т. 16, № 9. – С. 1676 – 1678.
134. Ахметов В.Д., Болотов В.В., Васильев А.В., Карпов Ю.А., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. О радиационном дефектообразовании в кремнии, содержащем гадолиний // Физика и техника полупроводников. – 1977. – Т. 11, № 11. – С. 2243 – 2245.
135. Карпов Ю.А., Петров В.В., Просолович В.С., Ткачев В.Д. Радиационные дефекты в кремнии, легированном эрбием // Физика и техника полупроводников. – 1983. – Т. 17, № 8. – С. 1530 – 1532.
136. Гришин В.П., Карпов Ю.А., Корнюшин С.И., Стась В.Ф., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Влияние облучения электронами на концентрацию и подвижность носителей в  $\text{Si}$ , легированном  $\text{Sm}$  // Украинский физический журнал. – 1977. – Т. 22, № 6. – С. 1037 – 1039.
137. Неймаш В.Б., Соснин М.Г., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Дефектообразование в  $n$ -кремнии с примесью гадолиния // Физика и техника полупроводников. – 1981. – Т. 15, № 4. – С. 786 – 788.
138. Петров В.В., Просолович В.С., Ткачев В.Д. Природа и температурная устойчивость донорных центров в кремнии с эрбием // Доклады АН БССР. – 1984. – Т. 28, № 3. – С. 219 – 221.
139. Коршунов Ф.П., Кожекина Т.В., Кудин А.И. Влияние электронного облучения и отжига на электрические свойства кремния  $p$ -типа, легированного гадолинием // Весці АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. – 1979. – № 4. – С. 114 – 117.
140. Petrov V.V., Prosolovich V.S., Tkachev V.D., Karpov Yu.I., Millvidskii M.G. Donor centers in irradiated Si doped with rare-earth elements // Physica Status Solidi. – 1985. – V. A88, № 2. – P. K141 – K144.
141. Lee Y.H., Corbett J.W., Brower K.L. EPR of a carbon-oxygen-divacancy complex in irradiated silicon // Physica Status Solidi. – 1977. – V. 42A, № 2. – P. 637 – 647.

142. Акулович Н.И., Петров В.В., Ткачев В.Д. Фотопроводимость кремния, обусловленная различными зарядовыми состояниями дивакансии // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10, № 6. – С. 1038 – 1044.
143. Cherki M., Kalma A.H. Photoconductivity studies of defects in p-type silicon: Boron interstitial and aluminium interstitial defects // Physical Review B: Condensed Matter. – 1970. – V. 1, № 2. – P. 647 – 657.
144. Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Ч. 2. Экспериментальные аспекты. – М.: Мир, 1985. – 304 с.
145. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. – Л.: Наука, 1972. – 384 с.
146. Петров В.В., Просолович В.С., Карпов Ю.А., Харченко В.А. Поведение редкоземельных элементов в нейтронно-облученном кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 20, № 7. – С. 1339 – 1342.
147. Петров В.В., Просолович В.С. ИК-поглощение в нейтронно-облученном кремнии, легированном редкоземельными элементами // Журнал прикладной спектроскопии. – 1987. – Т. 47, № 6. – С. 1021 – 1024.
148. Hoffmann H.J. Defect level analysis of semiconductors by a new differential evolution of  $n(1/T)$  characteristics // Journal of Applied Physics. – 1979. – V. 19, № 1. – P. 307 – 312.
149. Дамаск А., Дин Дж. Точечные дефекты в металлах. – М.: Мир, 1977. – 290 с.
150. Whan R.E. Oxygen-defect complexes in neutron irradiated silicon // Journal of Applied Physics. – 1966. – V. 37, № 9. – P. 3378 – 3382.
151. Мазуренко В.В., Петров В.В., Ткачев В.Д. ИК поглощение в облученном нейтронами кремнии, подвергнутом предварительной термообработке // Доклады АН БССР. – 1984. – Т. 28, № 5. – С. 409 – 412.
152. Акулович Н.И., Мороховец М.А. Об избыточных донорах в трансмутационно-легированном кремнии, выращенном по методу Чохральского // Физика и техника полупроводников. – 1984. – Т. 18, № 9. – С. 1642 – 1646.
153. Греськов И.М., Соловьев С.П., Харченко В.А. Ядерное легирование полупроводников: Обзор информ. / НИИ технико-экономических исследований Министерства химической промышленности. – М., 1982. – 34 с. (Химическая промышленность. Сер. Радиационная стойкость органических материалов).
154. Литвиняко А.Г., Мурын Л.И., Ткачев В.Д. Особенности изменения подвижности в облученном нейтронами кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1977. – Т. 11, № 8. – С. 1586 – 1589.
155. Усков В.А., Родионов А.И., Власенко Г.Т., Федотов А.Б. Диффузия редкоземельных элементов в кремнии // Легированные полупроводниковые материалы. – М.: Наука, 1985. – С. 80 – 83.



156. Петров В.В., Просолович В.С., Карпов Ю.А., Харченко В.А. Поведение редкоземельных элементов в нейтронно-облученном кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1986. – Т. 20, № 7. – С. 1339 – 1342.
157. Власов С.И., Назыров Д.Э., Иминов А.А., Худайбердиев С.С. Свойства термообработанного кремния, легированного эрбием при выращивании // Письма в журнал технической физики. – 2000. – Т. 26, № 8. – С. 28 – 31.
158. Карпов Ю.А., Мильвидский М.Г., Петров В.В., Просолович В.С. Влияние эрбия на процессы образования и отжига радиационных дефектов в кремнии р-типа // Легированные полупроводниковые материалы. – М.: Наука, 1985. – С. 168 – 173.
159. Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. Диффузия эрбия и тулия в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1991. – Т. 25, № 9. – С. 1653 – 1654.
160. Бахадырханов М.К., Талипов Ф.М., Султанова Н.В., Джурабеков У.С., Шасаидов Ш.Ш., Лютович А.С., Касымов А.А. Исследование диффузии и растворимости иттербия в кремнии // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1990. – Т. 26, № 3. – С. 458 – 461.
161. Зайнабидинов С., Назиров Д.Э., Акбаров А.Ж., Иминов А.А., Топгемиров Т.М. Диффузия эрбия в кремнии // Письма в журнал технической физики. – 1998. – Т. 24, № 2. – С. 68 – 71.
162. Борисенко А.И., Волокобинский Ю.М., Коковина В.Н., Трошина Е.П., Чепик Л.Ф., Фролова Т.Н. Легирование кремния редкоземельными элементами из кремнеземных пленок // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 262, № 6. – С. 1409 – 1412.
163. Агеев В.В., Аксенова Н.С., Коковина В.Н., Трошина Е.П. Применение элементов третьей группы Периодической системы Д.И. Менделеева в кремниевой планарной технологии // Известия Ленингр. электротехн. ин-та. – 1977. – Вып. 211. – С. 80 – 85.
164. Коршунов Ф.П., Кожекина Т.В., Модорский Б.М., Юшкин Н.П. Исследование характеристик кремниевых р-п-переходов, полученных диффузией гадолия. // Весті АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. – 1977. – № 6. – С. 108 – 111.
165. Талипов Ф.М. Влияние иттербия на радиационное дефектообразование в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31, № 6. – С. 728 – 729.
166. Александров О.В., Емцев В.В., Полоскин Д.С., Соболев Н.А., Шек Е.И. Мелкие акцепторные центры, образующиеся при диффузии эрбия в кремний // Физика и техника полупроводников. – 1994. – Т. 28, № 11. – С. 2045 – 2048.

167. Асатрян Г.Г. Оптические исследования кремния, легированного редкоземельными элементами // Известия Ленингр. электротехн. ин-та. – 1981. – Вып. 281. – С. 139 – 142.
168. Козлов А.Г. Исследование электрофизических свойств слоев кремния, легированных редкоземельными элементами // Известия Ленингр. электротехн. ин-та. – 1984. – Вып. 338. – С. 79 – 82.
169. Талипов Ф.М., Султанова Н.В., Джурабеков У.С. Влияние низкотемпературного нагрева на электрические свойства Si<Yb> // Эффекты влияния внешних воздействий в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – Ташкент, 1985. – С. 93 – 96.
170. Соболев Н.А., Емельянов А.М., Николаев Ю.А., Вдовин В.И. Влияние ориентации кремниевой подложки на свойства лавинных Si:Er:O излучающих структур // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 6. – С. 660 – 663.
171. Соболев Н.А., Шек Е.И., Емельянов А.М., Вдовин В.И., Югова Т.Г. Влияние собственных точечных дефектов на формирование структурных дефектов и оптически активных центров при отжиге кремния, имплантированного эрбием и диспрозием // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 6. – С. 656 – 658.
172. Tang Y.S., Jingping Z. Recrystallization of erbium implantation-induced amorphous silicon on insulator by rapid thermal annealing // Journal of Crystal Growth. – 1990. – V. 102, № 2. – P. 681 – 684.
173. Custer J.S., Polman A., van Pinxteren H.M. Erbium in crystal silicon: Segregation and trapping during solid phase epitaxy of amorphous silicon // Journal of Applied Physics. – 1994. – Vol. 75, № 6. – P. 2809 – 2817.
174. Polman A., Custer J.S., Zagwijn P.M., Molenbroek A.M., Alkemade P.F.A. Segregation and trapping of erbium at a moving crystal-amorphous Si interface // Journal of Applied Physics. – 1997. – V. 81, № 1. – P. 150 – 153.
175. Polman A., Custer J.S., Snoeks E., van den Hoven G.N. Incorporation of high concentrations of erbium in crystal silicon // Applied Physics Letters. – 1993. – V. 62, № 5. – P. 507 – 509.
176. Емцев В.В., Емцев В.В. (мл), Полоскин Д.С., Соболев Н.А., Шек Е.И., Михель Й., Кимерлинг Л.С. Примесные центры в кремнии, легированном редкоземельными примесями диспрозием, гольмием, эрбием и иттербием // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 6. – С. 649 – 651.
177. Александров О.В., Николаев Ю.А., Соболев Н.А., Сахаров В.И., Серенков И.Т., Кудрявцев Ю.А. Перераспределение эрбия при кристаллизации скрытых аморфных слоев кремния // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 6. – С. 652 – 655.
178. Бреслер М.С., Грегоркевич Т., Гусев О.Б., Соболев Н.А., Теруков Е.И., Ясневич И.Н., Захарченя Б.П. Механизмы возбуждения и темпера-

- турного гашения люминесценции ионов эрбия в кристаллическом и аморфном кремнии // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, № 5. – С. 851 – 855.
179. Tang Y.S., Zhang Jingping, Heasman K.C., Sealy B.J. Lattice locations of erbium implants in silicon // Solid State Communications. – 1989. – V. 72, № 10. – P. 991 – 993.
180. Tang Y.S., Heasman K.C., Gilin W.P., Sealy B.J. Characteristics of rare-earth element erbium implanted in silicon // Applied Physics Letters. – 1989. – V. 55, № 5. – P. 432 – 433.
181. Александров О.В., Николаев Ю.А., Соболев Н.А. Влияние условий имплантации на перераспределение эрбия при твердофазной эпитаксиальной кристаллизации кремния // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 1. – С. 114 – 118.
182. Александров О.В., Захарьин О.А., Соболев Н.А., Николаев Ю.А. Влияние электрически неактивных примесей на образование донорных центров в слоях кремния, имплантированных эрбием // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, № 5. – С. 526 – 529.
183. Александров О.В., Захарьин О.А., Соболев Н.А., Николаев Ю.А. Электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных ионами эрбия и кислорода в широком диапазоне доз и термообработанных в различных температурных режимах // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, № 3. – С. 379 – 382.
184. Ammerlaan C.A.J., Thao T.D.X., Gregorkiewicz T., Sobolev N.A. Photoluminescence of erbium-doped silicon: excitation power dependence // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 6. – С. 644 – 648.
185. Александров О.В., Захарьин О.А. Модель образования донорных центров в слоях кремния, имплантированных ионами эрбия и кислорода // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, № 11. – С. 1291 – 1296.
186. Соболев Н.А., Емельянов А.М., Николаев Ю.А. Влияние дозы имплантации ионов эрбия на характеристики (111) Si:Er:O-светодиодных структур, работающих в режиме пробоя р-п-перехода // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, № 9. – С. 1069 – 1072.
187. Соболев Н.А., Емельянов А.М., Николаев Ю.А. Влияние температуры отжига на электролюминесценцию ионов эрбия в Si:(Er:O)-диодах: диоды с ориентацией подложки (111) // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 10. – С. 1224 – 1227.
188. Емельянов А.М., Соболев Н.А., Якименко А.Н. Вольт-фарадные характеристики р-п-структур на основе (111) Si, легированного эрбием и кислородом // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 3. – С. 330 – 334.

189. Петров В.В., Просолович В.С., Коварский А.П., Янковский Ю.Н. Имплантация кремния ионами фосфора и иттербия // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. – 1991. – № 6. – С. 40 – 42.
190. Петров В.В., Просолович В.С., Коварский А.П., Янковский Ю.Н. Особенности поведения фосфора в кремнии, предварительно имплантированном иттербием // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1993. – № 1. – С. 86 – 88.
191. Назыров Д.Э., Гончаров С.А., Суворов А.В. Ионное легирование кремния иттербием // Письма в журнал технической физики. – 2000. – Т. 26, № 8. – С. 24 – 27.
192. Александров О.В., Захарьин О.А., Соболев Н.А. Электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных ионами иттербия // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, № 2. – С. 134 – 137.
193. Вопросы радиационной технологии полупроводников. / Под ред. Л.С. Смирнова. – Новосибирск: Наука, 1980. – С. 199 – 225.
194. Dvurechensky A.V., Gerasimenko N.N., Romanov S.I., Smirnov L.S. High dose effects in ion implantation // Radiation Effects. – 1976. – V. 30, № 2. – P. 69 – 72.
195. Герасименко Н.Н., Двуреченский А.В., Романов С.И., Смирнов Л.С. Об эффектах при больших дозах внедренных в полупроводники ионов // Физика и техника полупроводников. – 1973. – Т. 7, № 11. – С. 2195 – 2199.
196. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Соловьев В.С., Ширяев С.Ю. Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии. – Минск: Университетское, 1990. – 318 с.
197. Клячко Д.В., Угаров В.В. Вопросы количественного анализа микропримесей методом масс-спектропии вторичных ионов // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1991. – № 8. – С. 5 – 16.
198. Tanaka T., Homma Y., Okamoto H. Oxygen effect on secondary ion emission of impurities in GaAs // Journal of Vacuum Science and Technology – 1988. – Vol. A6, № 2. – P. 204 – 209.
199. Оджаев В.Б. Генерация, взаимодействие и отжиг радиационных дефектов в кремнии, арсениде галлия и высокомолекулярных соединениях при последовательной ионной имплантации: Дис...-ра физ.-мат. наук: 01.04.10. – Минск, 1999. – 313 с.
200. Csepregi L., Kennedy E.F., Mayer J.W., Sigmon T.W. Substrate-orientation dependence of the epitaxial regrowth rate from Si-implanted amorphous Si // Journal of Applied Physics. – 1978. – Vol. 49, № 7. – P. 3906 – 3911.
201. Малкович Р.Ш., Назыров Д.Э. Геттерирование быстро диффундирующих примесей в кремнии редкоземельными элементами // Письма в журнал технической физики. – 1989. – Т. 15, № 4. – С. 38 – 40.

202. Андреев Б.А., Соболев Н.А., Курицын Д.И., Маковийчук М.И., Николаев Ю.А., Паршин Е.О. Низкотемпературная фотолуминесценция кремния, легированного гольмием // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 4. – С. 420 – 422.
203. Соболев Н.А., Емельянов А.М., Николаев Ю.А. Лавинные светодиодные структуры на основе монокристаллического Si:Ho:O, работающие при комнатной температуре // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 8. – С. 931 – 932.
204. Назыров Д.Э., Усачева В.П., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. Диффузия празеодима в кремнии // Письма в журнал технической физики. – 1988. – Т. 14, № 12. – С. 1102 – 1104.
205. Moutonnet D., L'Haridon H., Favennec P.N., Salvi M., Gauneau M., Arnaud D'Avitaya F., Chroboczek J. 1,54  $\mu\text{m}$  photoluminescence of erbium-implanted silicon // Materials Science and Engineering B. – 1989. – V. 4, № 1 – 4. – P. 75 – 77.
206. Priolo F., Coffa S., Franzo G., Spinella C., Camera A., Bellani V. Electrical and optical characterization of Er-implanted Si: The role of impurities and defects // Journal of Applied Physics. – 1993. – Vol. 74, № 8. – P. 4936 – 4942.
207. Александров О.В., Соболев Н.А., Шек Е.И., Меркулов А.В. Образование донорных центров при отжиге кремния, имплантированного эрбием // Физика и техника полупроводников. – 1996. – Т. 30, № 5. – С. 876 – 883.
208. Przybylinska H., Jantsch W., Suprun-Belevitch Yu., Stepikhova M., Palmetshofer L., Hendorfer G., Kozanecki A., Wilson R.J., Searly B.J. Optically active erbium centers in silicon // Physical Review B: Condensed Matter. – 1996. – V. 54, № 4. – P. 2532 – 2547.
209. Андреев А.А. Собственная и активированная примесями Zn, Ce, Tb, Er, Sm и Eu фотолуминесценция псевдоаморфных тонких пленок GaN и InGaN // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45, № 3 – С. 395 – 402.
210. Anderson F.G. Role of codopants in the luminescent output from Si:Er // Applied Physics Letters. – 1996. – V. 68, № 17. – P. 2421 – 2423.
211. Carey J.D., Barklie R.C., Donegan J.F., Priolo F., Franzo G., Coffa S. Electron paramagnetic resonance and photoluminescence study of Er-impurity complexes in Si // Physical Review B: Condensed Matter. – 1999. – V. 59, № 4. – P. 2773 – 2782.
212. Terrasi A., Franzo G., Coffa S., Priolo F., D'Acapito F., Mobilio S. Evolution of the local environment around Er upon thermal annealing in Er and O coimplanted Si // Applied Physics Letters. – 1997. – V. 70, № 13. – P. 1712 – 1714.
213. Андреев А.А. Особенности сверхъяркой фотолуминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  в псевдоаморфных тонких пленках GaN // Физика твердого тела. – 2002. – Т. 44, № 2 – С. 239 – 245.

214. Coffa S., Priolo F., Franzo G., Polman A., Libertino S., Saggio M., Carnera A. Materials issues and device performances for light emitting Er-implanted Si // Nuclear Instrum and Methods Phys. Res. B. – 1995. – V. 105, № 1 – 4. – P. 386 – 392.
215. Priolo F., Franzo G., Coffa S., Carnera A. Excitation and nonradiative de-excitation processes of  $\text{Er}^{3+}$  in crystalline Si // Physical Review B: Condensed Matter. – 1998. – V. 57, № 8. – P. 4443 – 4455.
216. Gregorkiewicz T., Thao D.T.X., Langer J.M. Role of shallow bound states in emission processes of rare-earth doped semiconductors // Physica Status Solidi. – 1998. – V. 210B, № 2. – P. 737 – 745.
217. Gregorkiewicz T., Thao D.T.X., Langer J.M., Bekman H.H.P.Th., Bresler M.S., Michel J., Kimerling L.C. Energy transfer between shallow centers and rare-earth ion cores:  $\text{Er}^{3+}$  ion in silicon // Physical Review B: Condensed Matter. – 2000. – V. 61, № 8. – P. 5369 – 5375.
218. Carey J.D., Donegan J.F., Barklie R.C., Priolo F., Franzo G., Coffa S. Electron paramagnetic resonance of erbium doped silicon // Applied Physics Letters. – 1999. – V. 85, № 4. – P. 2093 – 2099.
219. Ennen H., Schneider J., Pomrenke G., Axmann A. 1,54- $\mu\text{m}$  luminescence of erbium-implanted III-V semiconductors and silicon // Applied Physics Letters. – 1983. – V. 43, № 10. – P. 943 – 945.
220. Palm J., Gan F., Zheng B., Michel J., Kimerling L.C. Electroluminescence of erbium-doped silicon // Physical Review B: Condensed Matter. – 1996. – V. 54, № 24. – P. 17603 – 17615.
221. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей (теория, метод расчета, таблицы) / А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, М.М. Темкин. – Мн.: Изд-во БГУ, 1980. – 352 с.
222. Vdovin V.I., Yugova T.G., Sobolev N.A., Shek E.I., Makovijchuk M.I., Parshin E.O. Extended defects in Si wafers implanted with ions of rare-earth elements // Nuclear Instrumentts and Methods Phys. Res. B. – 1999. – V. 147, № 1 – 4. – P. 116 – 121.
223. Sobolev N.A., Gusev O.B., Shek E.I., Vdovin V.I., Yugova T.G., Emel'yanov A.M. Photoluminescence and structural defects in erbium-implanted silicon annealed at high temperature // Applied Physics Letters. – 1998. – V. 72, № 25. – P. 3326 – 3328.
224. Sobolev N.A., Emel'yanov A.M., Filin Yu.N., Melekh B.T., Nikolaev Yu. A., Yakimenko A.N. Infrared photoluminescence from holmium ions in single-crystal silicon and holmium oxide // Semiconductor Science and Technology. – 2000. – V. 15, № 6. – P. 511 – 513
225. Suyver J.F., Kik P.J., Kimura T., Polman A., Franzo G., Coffa S. Optical and electrical doping of silicon with holmium // Nuclear Instrumentts and Methods Phys. Res. B. – 1999. – V. 148, № 1 – 4. – P.497 – 501.

226. Libertino S., Coffa S., Mosca R., Combia E. The electrical properties of terbium ions in crystalline Si // *Journal of Applied Physics*. – 1999. – Vol. 85, № 4. – P. 2093 – 2099.
227. Tang Y.S. A lineshape analysis of the near 1,54  $\mu\text{m}$  emission band of  $\text{Er}^{3+}$  in silicon // *Physica Status Solidi*. – 1989. – V. 156B, № 2. – P. K153 – K156.
228. Widdershoven E.P., Naus J.P.M. Donor formation in silicon owing to ion implantation of the rare earth metal erbium // *Materials Science and Engineering B*. – 1989. – V. 4, № 1 – 4. – P. 71 – 74.
229. Уфимцев В.Б., Акчурин Р.Х. Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии. – М.: Металлургия, 1983. – 220 с.
230. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. – М.: Советское радио, 1975. – 328 с.
231. Kresse F., Baumann G.G., Jantsch O., Habberger K. Liquid phase epitaxy of silicon at low temperatures // *Journal of Crystal Growth*. – 1990. – V. 104, № 3. – P. 744 – 747.
232. Baliga B.J. Silicon liquid phase epitaxy // *Journal of Electrochem. Society*. – 1986. – V. 133, № 1. – P. C5 – C14.
233. Baliga B.J. Buried-grid field-controlled thyristors fabricated using silicon liquid-phase epitaxy // *IEEE Trans. Electron. Devices*. – 1980. – V. 27, № 11. – P. 2141 – 2145.
234. Лозовский В.Н., Колесниченко А.И. Рост кремния из слоя движущегося растворителя, обогащенного редкоземельными металлами // *Известия вузов. Физика*. – 1982. – Т. 25, № 1. – С. 13 – 17.
235. Pizzini S., Donghi M., Binetti S., Wagner G., Bersani M. Luminescence from epi layers grown by liquid-phase epitaxy // *Journal of Electrochem. Society*. – 1998. – V. 145, № 1. – P. L8 – L11.
236. Cavallini A., Fraboni B., Pizzini S. Deep levels in Er-doped liquid phase epitaxy grown silicon // *Applied Physics Letters*. – 1998. – V. 72, № 4. – P. 468 – 470.
237. Галченков Д.В., Меерович Л.А., Фомин И.А., Фурманов Г.П. Получение и исследование структур кремния, легированного иттербием // Тез. докл. 7-й конф. по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. – Новосибирск, 1986. – Т. 2 – С. 15 – 16.
238. Бринкевич Д.И., Быковский В.А., Петров В.В. Фотолуминесценция эпитаксиальных слоев кремния, легированных оловом и иттербием // *Журнал прикладной спектроскопии* – 1989. – Т. 50, № 4. – С. 675 – 678.
239. Бринкевич Д.И., Казючиц Н.М., Крюков В.Л., Петров В.В., Фурманов Г.П. Эпитаксиальные слои кремния, полученные кристаллизацией из растворов-расплавов на основе олова // *Неорганические материалы*. – 1992. – Т. 28, № 3. – С. 472 – 475.

240. Бринкевич Д.И., Казючич Н.М., Крюков В.Л., Петров В.В., Фурманов Г.П. Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев  $\text{Si}(\text{Sn}, \text{Yb})$ , облученных электронами // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1991. – Т. 27, № 10. – С. 2191 – 2193.
241. Бринкевич Д.И., Быковский В.А., Казючич Н.М., Крюков В.Л., Меевич Л.А., Петров В.В., Фурманов Г.П. Фотолюминесценция эпитаксиальных слоев кремния, легированных оловом и РЗЭ / Бел. гос. ун-т. – Минск, 1988. – 16 с. – Деп. в ВИНТИ 12.08.88. – № 6565-В88.
242. Brinkevich D.I., Kazuchits N.M., Petrov V.V. Epitaxial layers  $\text{Si}:(\text{Sn}, \text{Yb})$  produced by the crystallization from the melt-solution on the basis of Sn // Mat. Res. Soc. V. 301. Rare-earth doped semiconductors. – Pittsburgh, 1993. – P. 79 – 84.
243. Соловьева Е.В., Лазарева Г.В., Лейферов Б.М., Лотоцкий А.Г., Мильвидский М.Г., Рытова Н.С., Твинова Э.А. Особенности дефектообразования в кремнии, содержащем изовалентную примесь олова // Физика и техника полупроводников. – 1984. – Т. 18, № 9. – С. 1573 – 1576.
244. Tajima M., Kalamori A., Iizuka T. Photoluminescence spectra of thermal donors in silicon // Japan Journal of Applied Physics. – 1979. – V. 18, № 7. – P. 1401 – 1402.
245. Лопатин А.Б., Покровский Я.Е. Исследование неупорядоченности в сплавах германий-кремний методом спектроскопии связанных экситонов. // Физика твердого тела. – 1986. – Т. 28, № 8. – С. 2373 – 2378.
246. Кустов В.Е., Мильвидский М.Г., Семенов Ю.Г., Туровский Б.М., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Деформационные заряды изовалентных примесей в кремнии. // Физика и техника полупроводников. – 1986. – Т. 20, № 2. – С. 270 – 274.
247. Абросимов Н.В., Абросимов В.Н., Баженов А.В., Ерофеева С.А. Влияние легирования гадолинием на электрические и оптические свойства профилированных кристаллов кремния // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1986. – Т. 22, № 2. – С. 181 – 185.
248. Дроздов Н.А., Патрин А.А., Тхачев В.Д. Рекомбинационное излучение на дислокациях в кремнии // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1976. – Т. 23, № 11. – С. 651 – 653.
249. Осипьян Ю.А., Ртищев А.М., Штейман Э.А. Исследование спектров дислокационной фотолюминесценции при отжиге деформированных образцов кремния // Физика твердого тела. – 1984. – Т. 26, № 6. – С. 1772 – 1776.
250. Сафронов Л.Н. Низкотемпературная фотолюминесценция облученного кремния // Радиационные эффекты в полупроводниках. – М., 1979. – С. 101 – 129.
251. Мильвидский М.Г., Рытова Н.С., Соловьева Е.В. Влияние упругой деформации, создаваемой примесями, на концентрацию и поведение



- собственных точечных дефектов в полупроводниках // Проблемы кристаллографии. – М., 1987. – С. 215 – 232.
252. Андреев А.Ю., Андреев Б.А., Дроздов М.Н., Кузнецов В.П., Красильник З.Ф., Карпов Ю.А., Рубцова Р.А., Степихова М.В., Ускова Е.А., Шмагин В.Б., Ellmer H., Palmeshofer L., Piplits K., Hutter H. Оптически активные слои кремния, легированного эрбием в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 2. – С. 156 – 160.
253. Rogers J.L., Andry P.S., Varhue W.J., Adams E., Lavoie M., Klein P.B. Erbium-doped silicon films grown by plasma-enhanced chemical-vapor deposition // Journal of Applied Physics. – 1995. – V. 78, № 10. – P. 6241 – 6248.
254. Ennen H., Pomrenke G., Axmann A., Eisele K., Haydl W., Schneider J. 1,54- $\mu\text{m}$  electroluminescence of erbium-doped silicon grown by molecular beam epitaxy // Applied Physics Letters. – 1985. – V. 46, № 4. – P. 381 – 383.
255. Duteil F., Du C.-X., Joelsson K.B., Persson P.O.A., Hultman L., Pozina G., Ni W.-X., Hansson G.V. Luminescence and microstructure of Er/O co-doped Si structures grown by MBE using Er and SiO evaporation // Mater. Science Semicond. Process. – 2000. – V. 3, № 5 – 6. – P. 523 – 528.
256. Joelsson K.B., Hultman L., Ni W.-X., Gardenas J., Svensson B.G., Olsson E., Hansson G.V. Er doping of Si and  $\text{Si}_{0,83}\text{Ge}_{0,12}$  using  $\text{Er}_2\text{O}_3$  and  $\text{ErF}_3$  evaporation during molecular beam epitaxy: A transmission electron microscopy study // Journal of Crystal Growth. – 1999. – V. 196, № 1. – P. 97 – 110.
257. Markmann M., Neufeld E., Sticht A., Brunner K., Abstreiter G., Buchal Ch. Enhancement of erbium photoluminescence by substitutional C alloying of Si // Applied Physics Letters. – 1999. – V. 75, № 17. – P. 2584 – 2586.
258. Scalese S., Franzo G., Mirabella S., Re M., Terrasi A., Priolo F., Rimini E., Spinella C., Carnera A. Effect of O:Er concentration ratio on the structural, electrical and optical properties of Si:Er:O layers grown by molecular beam epitaxy // Journal of Applied Physics. – 2000. – V. 88, № 7. – P. 4091 – 4096.
259. Кузнецов В.П., Рубцова Р.А. Особенности метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии Si и его возможности при получении структуры Si:Er/Si // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, № 5. – С. 519 – 525.
260. Светлов С.П., Чалков В.Ю., Шенгуров В.Г., Ускова Е.А., Максимов Г.А., Андреев Б.А., Красильник З.Ф., Степихова М.В., Ellmer H. Легирование слоев кремния из сублимирующего источника эрбия в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии // Письма в журнал технической физики. – 2000. – Т. 26, № 1. – С. 84 – 89.

261. Андреев Б.А., Красильник З.Ф., Кузнецов В.П., Солдаткин А.О., Бреслер М.С., Гусев О.Б., Ясневич И.Н. Особенности фотолюминесценции эрбия в кремниевых структурах, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43, № 6. – С. 979 – 984.
262. Шенгуров В.Г., Светлов С.П., Чалков В.Ю., Максимов Г.А., Красильник З.Ф., Андреев Б.А., Степихова М.В., Шенгуров Д.В., Palmeshofer L., Ellmer H. Солегирирование эрбием и кислородом кремниевых слоев в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 8. – С. 954 – 959.
263. Шенгуров В.Г., Светлов С.П., Чалков В.Ю., Максимов Г.А., Красильник З.Ф., Андреев Б.А., Степихова М.В., Шенгуров Д.В. Сегрегация эрбия в слоях кремния, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией // Неорганические материалы. – 2002. – Т.38, № 5. – С.519-523.
264. Шмагин В.Б., Андреев Б.А., Антонов А.В., Красильник З.Ф., Кузнецов В.П., Кузнецов О.А., Ускова Е.А., Ammerlaan С.А.Ј., Pensi G. Электрически активные центры в светоизлучающих слоях Si:Er, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, № 2. – С. 178 – 182.
265. Шенгуров В.Г., Светлов С.П., Павлов Д.А., Хохлов А.Ф., Красильник З.Ф., Кариус Э., Вагнер Х. Светоизлучающие легированные эрбием кремниевые слои, выращенные сублимационной МЛЭ с приложением потенциала к подложке // Известия АН. Сер. физическая. – 1999. – Т. 63, № 2. – С. 406 – 410.
266. Шенгуров В.Г., Светлов С.П., Чалков В.Ю., Максимов Г.А., Красильник З.Ф., Андреев Б.А., Степихова М.В., Палметшофер Л., Элмер Х. Влияние условий роста на встраивание легирующего редкоземельного элемента в слой кремния в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии // Известия АН. Сер. физическая. – 2001. – Т. 65, № 2. – С. 289 – 291.
267. Шмагин В.Б., Андреев Б.А., Антонов А.В., Красильник З.Ф., Степихова М.В., Кузнецов В.П., Ускова Е.А., Кузнецов О.А., Рубцова Р.А. Определение электрически активных примесей в светоизлучающих слоях Si:Er/Si, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии // Известия АН. Сер. физическая. – 2001. – Т. 65, № 2. – С. 276 – 279.
268. Кузнецов Б.А., Бреслер М.С., Гусев О.Б., Красильник З.Ф., Кузнецов В.П., Солдаткин А.О., Ясневич И.Н. Особенности фотолюминесценции однородно и селективно легированных структур Si:Er/Si, полученных в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии // Известия АН. Сер. физическая. – 2001. – Т. 65, № 2. – С. 271 – 275.
269. Шенгуров В.Г., Светлов С.П., Чалков В.Ю., Ускова Е.А., Красильник З.Ф., Андреев Б.А., Степихова М.В. Фотолюминесценция на длине

- волны 1,54 мкм в слоях кремния, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии и легированных эрбием и кислородом // Известия АН. Сер. физическая. – 2000. – Т. 64, № 2. – С. 353 – 357.
270. Андреев Б.А., Андреев А.Ю., Гапонова Д.М., Красильник З.Ф., Кузнецов В.П., Новиков А.В., Степихова М.В., Шмагин В.Б., Ускова Е.А., Ланцершторфер С. Оптически активные центры в кремнии, легированном эрбием в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии // Известия АН. Сер. физическая. – 2000. – Т. 64, № 2. – С. 269 – 272.
271. Светлов С.П., Чалков В.Ю., Шенгуров В.Г. Устройство для сублимационного молекулярно-лучевого осаждения слоев кремния, легированных эрбием // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 4. – С. 141 – 143.
272. Андреев А.Ю., Андреев Б.А., Дроздов М.Н., Элмер Х., Кузнецов В.П., Калугин Н.Г., Красильник З.Ф., Карпов Ю.А., Пальметсхофер Л., Пиллитц К., Рубцова Р.А., Степихова М.В., Ускова Е.А., Шмагин В.Б., Хуттер Х. Электрические и оптические характеристики кремния, легированного эрбием в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии // Известия АН. Сер. физическая. – 1999. – Т. 63, № 2. – С. 392 – 399.
273. Wortman D.E., Morrison C.A., Bradshaw J.L. Optical spectra and analysis of  $Er^{3+}$  in silicon with C, O and N impurities // Journal of Applied Physics. – 1997. – V. 82, № 5. – P. 2580 – 2583.
274. Ni W.-X., Joelsson K.B., Du C.-X., Buyanova I.A., Pozina G., Chen W.M., Hansson G.V., Monemar B., Gardenas J., Svensson B.G. Er/O and Er/F doping during molecular beam epitaxial growth of Si layers for efficient 1,54  $\mu\text{m}$  light emission // Applied Physics Letters. – 1997. – V. 70, № 25. – P. 3383 – 3385.
275. Ni W.-X., Joelsson K.B., Du C.-X., Pozina G., Buyanova I.A., Chen W.M., Hansson G.V., Monemar B. Incorporation and luminescence properties of  $Er_2O_3$  and  $ErF_3$  doped Si layers grown by molecular beam epitaxy // Thin Solid Films. – 1998. – V. 321. – P. 223 – 227.
276. Neufeld E., Sticht A., Brunner K., Abstreiter G., Bay H., Buchal Ch., Holzbrecher H. Luminescence from erbium- and oxygen-doped SiGe grown by molecular beam epitaxy // Thin Solid Films. – 1998. – V. 321. – P. 219 – 222.
277. Шенгуров В.Г., Светлов С.П., Чалков В.Ю., Андреев Б.А., Красильник З.Ф., Бэр Б.Я., Дроздов Ю.Н., Яблонский А.Н. Световлучающие слои твердого раствора кремний-германий, легированные эрбием в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, № 6. – С. 662 – 665.

278. Miyashita K., Shiraki Y., Houghton D.C., Fukatsu S. Incorporation kinetics of rare-earth elements in Si during molecular beam epitaxy // *Applied Physics Letters*. – 1995. – V. 67, № 2. – P. 235 – 237.
279. Фролова Т.Н. Исследование приповерхностных слоев кремния, легированных редкоземельными элементами с целью повышения радиационной стойкости полупроводниковых структур: Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / Ленингр. электротехн. ин-т. – Ленинград, 1980. – 12 с.
280. Афанасьева Н.П., Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. Легирование кремния лантаноидами как способ оптимизации параметров детекторов ионизирующих излучений // *Приборы и техника эксперимента*. – 2002. – № 3. – С. 24 – 26.
281. Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. Эпитаксиальные слои кремния, легированные германием и лутецием // *Вестник БГУ. Сер. Физика, математика, информатика*. – 2002. – № 2. – С. 53 – 55.
282. Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. Применение лантановидов в планарной технологии изготовления СВЧ-приборов // 12-я межд. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии "КрыМиКо-2002", 9-13 сент. 2002 г. Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2002. – С. 429 – 430.
283. Matsuoka M., Tohno S. Electroluminescence of erbium-doped silicon films as grown by ion beam epitaxy // *Applied Physics Letters*. – 1997. – V. 71, № 1. – P. 96 – 98.
284. Reitinger A., Stimmer J., Abstreiter G. Influence of the erbium and oxygen content on electroluminescence of epitaxially grown erbium-doped silicon diodes // *Applied Physics Letters*. – 1997. – V. 70, № 18. – P. 2431 – 2433.
285. Емельянов А.М., Соболев Н.А., Трищенко М.А., Хакуашев П.Е. Туннельные светодиоды на основе Si:(Er,O) с малыми временами нарастания электролюминесценции ионов  $Er^{3+}$  в режиме пробоя // *Физика и техника полупроводников*. – 2000. – Т. 34, № 8. – С. 965 – 969.
286. Емельянов А.М., Николаев Ю.А., Соболев Н.А. Природа краевого пика электролюминесценции в режиме пробоя Si:(Er,O)-диодов // *Физика и техника полупроводников*. – 2002. – Т. 36, № 4. – С. 453 – 456.
287. Neufeld E., Markmann M., Vorckel A., Brunner K., Abstreiter G. Optimization of erbium-doped light-emitting diodes by p-type counterdoping // *Applied Physics Letters*. – 1999. – V. 75, № 5. – P. 647 – 649.
288. Libertino S., Coffa S., Saggio M. Design and fabrication of integrated Si-based optoelectronic devices // *Mater. Sci. Semicond. Process.* – 2000. – V. 3, № 5 – 6. – P. 375 – 381.
289. Franzo G., Priolo F., Coffa S., Polman A., Carnera A. Room-temperature electroluminescence from Er-doped crystalline Si // *Applied Physics Letters*. – 1994. – V. 64, № 17. – P. 2235 – 2237.

290. Coffa S., Franzo G., Priolo F., Pacelli A., Lacaia A. Direct evidence of impact excitation and spatial profiling of excited Er in light emitting Si diodes // *Applied Physics Letters*. – 1998. – V. 73, № 1. – P. 93 – 95.
291. Борисенко А.И., Новиков В.В., Приходько Н.Е. Тонкие неорганические пленки в микроэлектронике. – Л.: Наука, 1972. – 216 с.
292. Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 344 с.
293. Дирнли Дж., Нортроп Д. Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. – М.: Мир, 1966. – 359 с. (Deamaley G., Northrop D.C. Semiconductor counters for nuclear radiations. – London: E.&F.N. SPON Ltd, 1964).
294. Афанасьев В.Ф., Строкан Н.Б., Тиснек Н.И. О потерях заряда в счетчиках сильно ионизирующих излучений // *Физика и техника полупроводников*. – 1971. – Т. 5. № 4. – С. 789 – 791.
295. Строкан Н.Б. Физические основы полупроводниковой ядерной спектроскопии: Дисс. ...д-ра физ.-мат. наук. – Л., 1978. – 238 с.
296. Васильев А.В., Вербицкий Е.М., Еремин В.К., Строкан Н.Б. Прецизионное определение потерь заряда в полупроводниковых детекторах с переменной емкостью // *Приборы и техника эксперимента*. – 1985. – № 5. – С. 56 – 58.
297. Жуков В.А., Фролова Т.Н. Кремниевый преобразователь давления с диффузионными тензорезисторами на основе редкоземельных элементов // *Известия Ленингр. электротехн. ин-та*. – 1979. – Вып. 250. – С. 92 – 98.
298. Sobolev N.A., Emel'yanov A.M., Shtel'makh K.F. Avalanche breakdown-related electroluminescence in single crystal Si:Er:O // *Applied Physics Letters*. – 1997. – V. 71, № 14. – P. 1930 – 1932.
299. Coffa S., Franzo G., Priolo F. High efficiency and fast modulation of Er-doped light emitting Si diodes // *Applied Physics Letters*. – 1996. – V. 69, № 14. – P. 2077 – 2079.
300. Chang Shoon-Jinn, Nayak Deepak K., Shiraka Jasuhiro. 1,54  $\mu\text{m}$  electroluminescence from erbium-doped SiGe light emitting diodes // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – V. 83, № 3. – P. 1426 – 1428.
301. Emel'yanov A.M., Sobolev N.A., Yakimenko A.N. Anjmalous temperature dependence of erbium-related electroluminescence in reverse biased silicon p-n junction // *Applied Physics Letters*. – 1998. – V. 72, № 10. – P. 1223 – 1225.

*Научное издание*

Дмитрий Иванович Брижневич  
Сергей Ананьевич Вабищевич  
Владислав Савельевич Просолович  
Юрий Николаевич Янковский

**РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ**

Зав. научной редакцией М.Л. Хейфен  
Редакторы Л.Н. Авласенок, Г.А. Тарасова  
Компьютерный набор и верстка Т.А. Федотовой

Подписано в печать 30.04.03. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офисная.  
Гарнитура "Таймс". Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,83. Уч.-изд. л. 12,74.  
Тираж. 300 экз.                      Заказ 75                      Цена договорная

Лицензия ЛВ № 317 от 22.07.98 г.

Отпечатано на ризографе ПГУ  
Полоцкий государственный университет  
211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29

ISBN 985-418-193-6



9 789854 181936