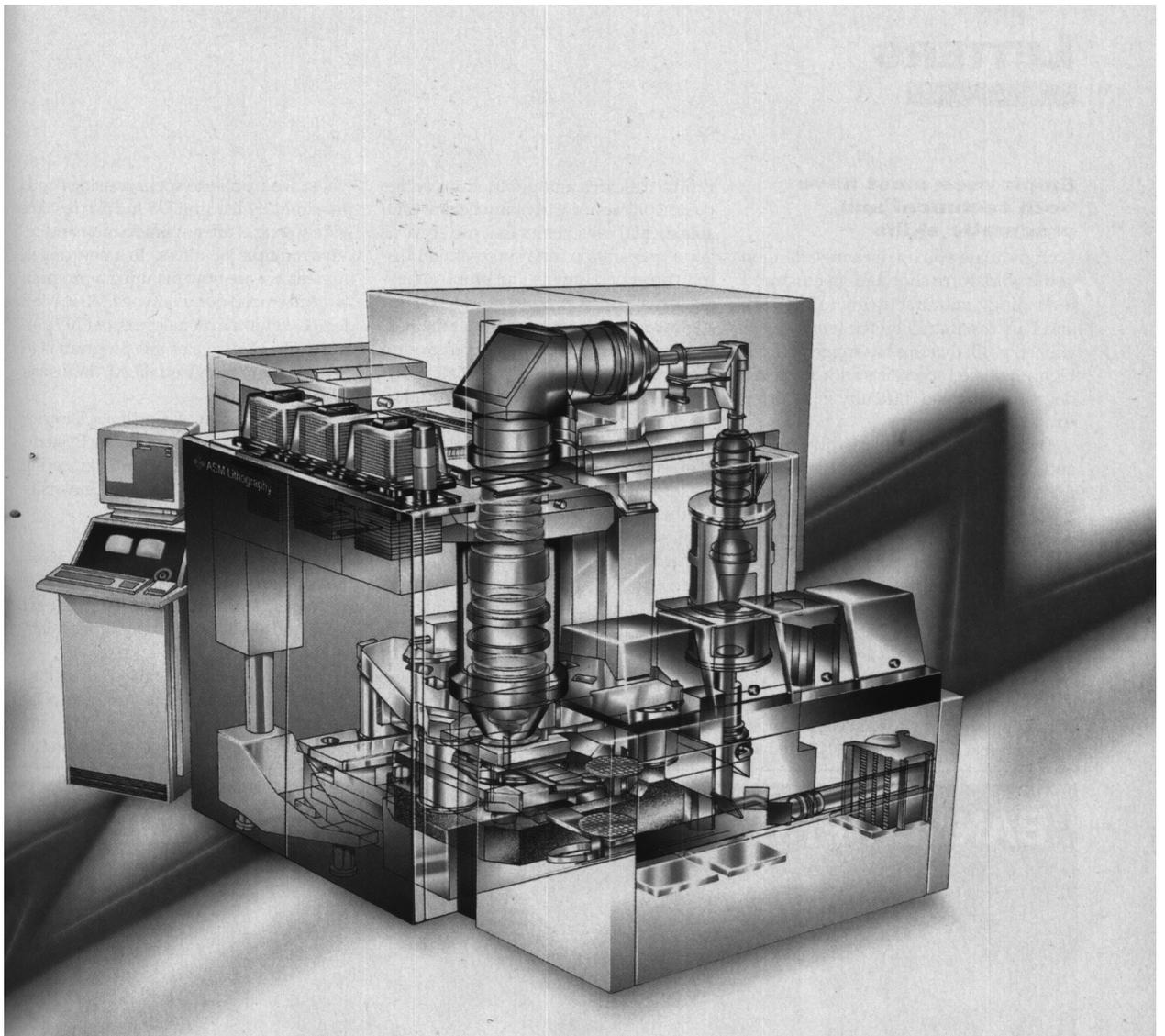


В.И. Светцов, С.А. Смирнов

КОРПУСКУЛЯРНО-ФОТОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ



Иваново 2002

Министерство образования Российской Федерации

Ивановский государственный химико-технологический университет

В.И. Светцов, С.А. Смирнов

КОРПУСКУЛЯРНО-ФОТОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по химико-технологическому образованию в качестве учебного пособия для специальности 25.10.00 - Химическая технология материалов и изделий электронной техники

Иваново 2002

УДК 621.382

Светцов В.И., Смирнов С.А. Корпускулярно-фотонные процессы и технологии: Учеб. пособие / Иван. гос. хим.-технол. ун-т.- Иваново, 2002.- 192 с. ISBN 5-230-01493-8

Рассмотрены физико-химические основы процессов корпускулярно-фотонных технологий, типовые установки, конкретные технологические процессы и примеры их реализации.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям «Материалы и компоненты твердотельной электроники» и «Химическая технология материалов и изделий электронной техники»

Рис. 51. Табл.12. Библиогр.: 26 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты: доктор химических наук В.В. Зайцев (Ивановский государственный университет); доктор технических наук С.В. Тарарыкин (Ивановский государственный энергетический университет)

ISBN 5-230-01493-8

© Ивановский
государственный
химико–технологический
университет, 2002 г

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие построено на материале лекционного курса, читаемого авторами в Ивановском государственном химико-технологическом университете на кафедре "Технология приборов и материалов электронной техники" студентам специальностей 20.01.00 - Материалы и компоненты твердотельной электроники и 25.10.00 - Химическая технология материалов и изделий электронной техники. Этот курс в расширенном виде читается так же магистрам, обучающимся по программам 55.07.13 - Физика, химия и технология поверхностей и межфазных границ и 55.16.11 - Физико-химические исследования новых материалов и процессов. Пособие может быть полезно и студентам других специальностей, связанных с использованием лазерных, электронных и ионных процессов и технологий, а так же инженерно-техническим работникам и преподавателям, желающим повысить свою квалификацию в данной области.

При подготовке лекционного курса использовались учебные пособия И.А. Аброяна, О.Г. Вендика, В.Ф. Титова, Ю.Н. Горина, а также монографии по отдельным разделам и периодическая литература, главным образом, обзоры по электронной технике.

При изложении материала отдельных глав рассмотрены физико-химические основы процессов, типовые установки, конкретные технологические процессы и примеры их реализации. Особое внимание уделено использованию лазерных, электронных и ионных процессов и технологий в электронной технике. Каждая глава сопровождается контрольными вопросами и набором заданий и задач для практических занятий и самостоятельной работы. Большинство заданий и задач направлены на обоснование и выбор условий проведения процесса и технологических режимов их реализации, что, на взгляд авторов, важно при практической инженерной работе. Использованный в пособии математический аппарат достаточен лишь для инженерных расчетов и аналитических решений частных случаев. Более детальные расчеты выполняются методами численного решения нестационарных уравнений на ПЭВМ. Для успешного усвоения дисциплины читателю необходимы знания общих курсов физики и химии, а также физической электроники.

Предлагаемое читателям пособие выпускается авторами впервые и, конечно, имеет недостатки. Авторы с благодарностью примут все пожелания и замечания читателей, направленные на их устранение.

Авторы выражают благодарность ряду студентов кафедры "Технология приборов и материалов электронной техники" Ивановского государственного химико-технологического университета за помощь в подготовке и оформлении рукописи и рецензентам работы за полезные замечания.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что современные интенсивные технологии являются основой технического процесса. К ним относятся и технологии, основанные на использовании концентрированных потоков энергии - лазерные, электронные и электронно-лучевые, ионные и ионно-лучевые. Их применение позволяет получать совершенно новые эффекты и результаты, принципиально недостижимые при традиционных технологиях, или значительно повысить скорость и качество обработки. Принципиально важными особенностями этих технологий являются локальность и селективность вложения энергии при огромных плотностях мощности, достигающих $10^8 - 10^{12}$ Вт/см², отсутствие механических контактов инструмента и изделия в процессе обработки, простота и широкие возможности управления энергией и размерами энергонесущего пучка, возможность полной автоматизации технологического процесса.

Применение этих технологий позволяет изменять форму и размеры обрабатываемых изделий, их механические, физические, химические, электрические, оптические, магнитные и другие свойства как в массе материала, так и на поверхности, в нанометровых слоях. Кроме того, на основе взаимодействия излучения и потоков ионов и электронов с веществом разработаны многие методы прецизионного анализа и контроля.

Лазерные, электронные и ионные процессы и технологии, зародившись, в основном в недрах электронной промышленности, в настоящее время широко применяются в электронике, приборостроении, машиностроении, металлургии, химии, медицине, текстильной и легкой промышленности и ряде других отраслей. Сдерживающими факторами в применении этих технологий традиционно считаются высокая стоимость технологического оборудования и сложность его обслуживания. Но, несмотря на это, интенсивные технологии при правильном их использовании, дают, как правило, высокий экономический эффект.

Необходимо отметить, что широкие возможности интенсивных технологий используются еще далеко не в полной мере. Многолетние наблюдения одного из авторов показали, что главным сдерживающим фактором является недостаток высококвалифицированных специалистов. Один из создателей лазеров говорил, что "их применение будет ограничено только фантазией и изобретательностью инженеров...". Но для того, чтобы фантазировать и изобретать, нужна база, нужна глубокая научная и техническая подготовка в данной области. И если инженер, пытающийся использовать один из интенсивных технологических процессов, не знает его физических основ, не может спрогнозировать хотя бы качественно результат для конкретной технологической ситуации, то попытка скорей всего окажется неудачной. Более того, неудача может привести к отказу от дальнейших работ в этом направлении.

ГЛАВА 1. ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Лазеры - это принципиально новые источники оптического излучения. В отличие от теплового излучения и люминесценции, излучение лазеров обладает высокой монохроматичностью, когерентностью, направленностью и высокой спектральной плотностью мощности.

Термин "Лазер" образован из полного английского названия: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает "усиление света с помощью вынужденного испускания излучения". Необходимо помнить, что термин "свет" означает в данном случае не только излучение в видимой области (0,38-0,77 мкм), но также в ультрафиолетовой (0,01 - 0,38 мкм) и инфракрасной (0,77 - 340 мкм) областях электромагнитных колебаний. В отечественной литературе наряду с термином "лазер" используется название "оптический квантовый генератор" или ОКГ.

Перспективы применения лазеров являются столь широкими, что трудно назвать область науки или техники, где лазеры не применяются или не будут применяться. По словам одного из создателей первых лазеров, когда будет решена задача управления лучом ОКГ и обеспечения приемлемого коэффициента полезного действия, их применение будет ограничено, в сущности, лишь воображением и изобретательностью инженеров.

Одной из наиболее обширных и непрерывно расширяющихся областей применения лазеров является технология. Лазерные технологии относятся к современным интенсивным технологиям, их использование позволяет получить качественно новые результаты, недостижимые традиционными методами, или резко ускорить процесс технологической обработки, повысить качество выпускаемой продукции.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Существует три возможных процесса взаимодействия квантовых систем и электромагнитного излучения, которые схематически показаны на рис.1.1.

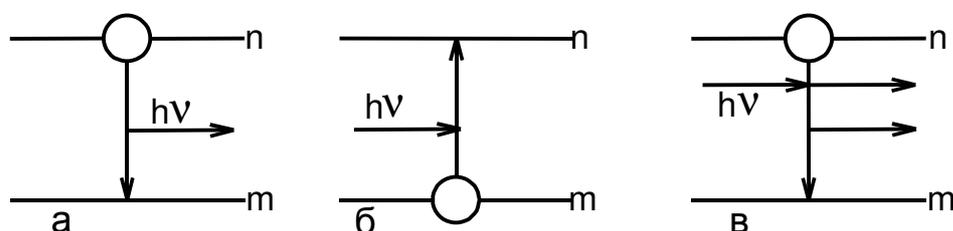


Рис.1.1. Квантовые переходы при взаимодействии с фотоном:
а - спонтанный переход с испусканием фотона; б - вынужденный переход с поглощением фотона; в - вынужденный переход с испусканием фотона

Рассмотрим переходы частицы из одного состояния в другое с выделением или поглощением энергии электромагнитного поля. Возбужденная частица в произвольный момент времени может

самопроизвольно перейти в более низкое энергетическое состояние, излучив при этом квант света. Такое излучение называется спонтанным.

Скорость спонтанного перехода с уровня n на уровень m определяется выражением:

$$\frac{dN_n}{dt} = A_{nm}N_n, \quad (1.1)$$

где N_n - концентрация частиц на уровне n . Коэффициент A_{nm} есть вероятность перехода или коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения, s^{-1} . Величина, обратная A_{nm} , называется спонтанным временем жизни. Значение коэффициента Эйнштейна для спонтанных переходов в оптическом диапазоне может изменяться от $10^8 s^{-1}$ для разрешенных переходов до $1 s^{-1}$ для запрещенных переходов.

Случайность спонтанных переходов приводит к тому, что различные атомы излучают независимо и несинхронно. Поэтому спонтанное излучение не направленно, не когерентно, не поляризовано и не монохроматично. Такое естественное излучение испускают все обычные источники света.

Другим оптическим процессом является поглощение излучения частицей, переходящей в результате этого в возбуждённое состояние. Скорость поглощения:

$$\frac{dN_m}{dt} = -B_{mn}P(\nu)N_m, \quad (1.2)$$

где B_{mn} - коэффициент Эйнштейна для вынужденного поглощения; $P(\nu)$ - спектральная плотность излучения; N_m - концентрация частиц на уровне m .

Однако эти два процесса не объясняют всех закономерностей взаимодействия излучения со средой. При взаимодействии возбуждённой частицы с фотоном возможен переход частицы в состояние с меньшей энергией - при этом излучается дополнительный фотон. Этот процесс носит название вынужденного или стимулированного излучения. Скорость этого процесса:

$$\frac{dN_n}{dt} = -B_{nm}P(\nu)N_n, \quad (1.3)$$

где B_{nm} - коэффициент Эйнштейна для вынужденного излучения; $P(\nu)$ - спектральная плотность излучения; N_n - концентрация частиц на уровне n . Произведение $B \cdot P(\nu)$ имеет размерность, обратную времени. Следует отметить, что $B_{nm} = B_{mn}$ с точностью до постоянного множителя. Связь между коэффициентами спонтанного и вынужденного испускания определяется соотношением:

$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}. \quad (1.4)$$

Стимулированное излучение является процессом, составляющим физическую основу работы ОКГ. Существует весьма интересная особенность стимулированного излучения - вторичный фотон неотличим от первичного, стимулирующего фотона. Оба фотона характеризуются одинаковыми

параметрами: частотой, фазой, импульсом и поляризацией. В инверсной среде, используемой в ОКГ, стимулированное излучение становится процессом, который определяет механизм размножения фотонов.

Предположим, что на систему, содержащую частицы m и n , падает электромагнитная волна с частотой ν и со спектральной плотностью $P(\nu)$. При этом единицей объема среды в процессе вынужденного поглощения поглотится мощность, равная:

$$W_{\text{п}} = h\nu B_{\text{mn}} P(\nu) N_{\text{m}}. \quad (1.5)$$

В то же время в процессе вынужденного излучения выделится мощность:

$$W_{\text{изл}} = h\nu B_{\text{nm}} P(\nu) N_{\text{n}}. \quad (1.6)$$

Разность этих мощностей представляет собой мощность излучения, вышедшую из активной среды:

$$W_{\text{изл}} - W_{\text{п}} = h\nu B_{\text{nm}} P(\nu) [N_{\text{n}} - N_{\text{m}}]. \quad (1.7)$$

В уравнении (1.7) учтено, что $B_{\text{mn}} = B_{\text{nm}}$. Очевидно, что если $W_{\text{изл}}$ больше $W_{\text{п}}$, то мощность волны будет увеличиваться по мере прохождения среды. В противном случае среда поглощает волну.

Таким образом, при выполнении условия N_{n} больше N_{m} , то есть при наличии в системе инверсной заселенности уровней, можно получить оптический квантовый усилитель света. Инверсия заселенностей является необходимым, но недостаточным условием для получения усиления в данной среде. Необходимо также, чтобы усиление за счет процессов вынужденного излучения превышало все возможные потери.

Рассмотрим подробнее вопрос о коэффициенте усиления системы. Изменение интенсивности излучения при прохождении оптически активной среды описывается уравнением:

$$dI_{\nu} = -x_{\nu} I_{\nu} dx, \quad (1.8)$$

представляющим собой закон Бугера в дифференциальной форме. Здесь x_{ν} - коэффициент поглощения. Если в рассматриваемой среде существует инверсная заселенность, то коэффициент поглощения меньше нуля, то есть волна не затухает, а усиливается. В этом случае о среде с инверсной заселенностью можно говорить как о среде с отрицательным коэффициентом поглощения.

Установим связь между коэффициентом поглощения и инверсной заселенностью уровней. Перепишем уравнение (1.8) в виде:

$$x_{\nu} = \frac{dI_{\nu}}{I_{\nu} dx}. \quad (1.9)$$

Очевидно, что смысл x_{ν} - это относительное приращение потока энергии на единице пути. Энергия, выделяемая в единице объема в единицу времени, определяется уравнением (1.9) и представляет собой производную интенсивности излучения по расстоянию. С учетом изложенного можно записать:

$$x_v = -\frac{h\nu B_{nm}(N_n - N_m)}{c}. \quad (1.10)$$

Для лазерных сред отрицательный коэффициент поглощения получил название коэффициента усиления. Он непосредственно характеризует усилительные свойства среды.

При распространении волны в инверсной среде часть ее интенсивности теряется за счет различных потерь. Этот процесс также можно описать уравнением Бугера:

$$dI_v = -x_{\pi} I_v dx, \quad (1.11)$$

где x_{π} - коэффициент потерь. Учитывая потери в среде и усилительные ее свойства, окончательное уравнение изменения интенсивности волны можно представить в виде:

$$dI_v = (x_v - x_{\pi}) I_v dx. \quad (1.12)$$

Очевидно, что усиление будет иметь место при $x_v \gg x_{\pi}$, то есть необходимо иметь некоторую критическую или пороговую инверсную заселенность, определяемую выражением:

$$x_{\pi} = \frac{h\nu B_{nm} \Delta N_{\text{пор}}}{c};$$

$$\Delta N_{\text{пор}} = (N_n - N_m). \quad (1.13)$$

Усилительные свойства среды можно улучшить, если использовать положительную обратную связь, то есть возвращать часть сигнала в активную среду, обеспечивая многократное прохождение его. При этом достигается гораздо большее усиление. Если усиление существенно перекрывает потери среды и системы обратной связи, то произойдет самовозбуждение усилителя, начнется генерация излучения.

Интегральное усиление сигнала в инверсной среде характеризуется коэффициентом усиления, представляющим отношение величины выходного сигнала к входному:

$$K = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}. \quad (1.14)$$

В случае, когда усиление значительно, указывают коэффициент усиления в децибелах:

$$K = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}\right). \quad (1.15)$$

Мы рассмотрели влияние инверсной среды на характеристики проходящего излучения. Но изменения происходят и в инверсной среде. Увеличение плотности излучения в среде вызовет уменьшение плотности инверсии, так как баланс процессов изменится в сторону обеднения верхнего уровня и дополнительного заселения нижнего уровня. Этот процесс называется насыщением усиления и определяет нелинейный характер усиления излучения инверсной средой.

В реальных лазерных системах при однократном прохождении луча через инверсную систему достигается весьма небольшое усиление. Поэтому принимаются меры для обеспечения многократного прохождения пучка через активную среду. Это достигается использованием в ОКГ оптического резонатора. Простейшим видом резонатора является система из двух зеркал, обращённых друг к другу отражающими поверхностями. Для вывода из резонатора полезного излучения отражающие поверхности делаются либо частично отражающими, либо одна полностью, а другая частично отражающей.

1.3. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ

Общая схема оптического квантового генератора (лазера) приведена на рис.1.2. Необходимыми элементами любого лазера являются:

- 1) рабочее вещество, в котором может быть осуществлена инверсия (активная среда);
- 2) устройство, в котором используется какое-либо физическое воздействие на рабочее вещество, позволяющее осуществить инверсию населенности (система накачки);
- 3) элемент, при помощи которого осуществляется интенсивное взаимодействие излучения с веществом и происходит отбор энергии от возбуждённых молекул (оптический резонатор);
- 4) устройство, обеспечивающее вывод энергии;
- 5) дополнительные элементы, зависящие от цели лазера. (Приборы управления лучом, модуляторы и т.д.)

Рассмотрим подробнее некоторые из элементов лазера.

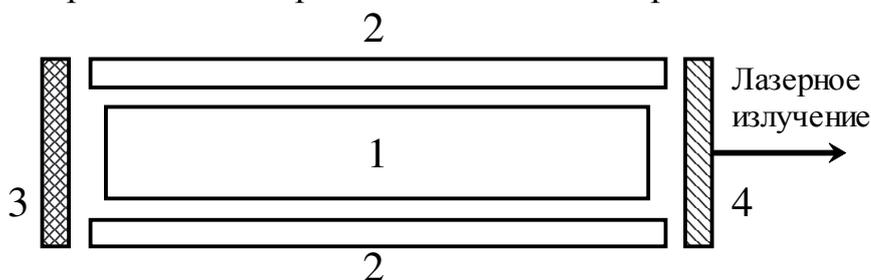


Рис.1.2. Принципиальная схема лазера: 1 - активный элемент; 2 - устройство накачки; 3 - зеркало со стопроцентным отражением; 4 - полупрозрачное зеркало

1.3.1. РАБОЧЕЕ ВЕЩЕСТВО

Активная среда лазера может быть различна по агрегатному состоянию. Именно по этому признаку различают лазеры на твёрдом теле, газовые лазеры и жидкостные. Соответственно различается и устройство активных элементов лазеров. Активный элемент твердотельного лазера представляет собой стержень с кристаллической или аморфной структурой. В газовых лазерах активный элемент имеет вид трубки, заполненной газом или смесью газов. В жидкостных лазерах активный элемент находится в кювете.

1.3.2. СОЗДАНИЕ ИНВЕРСИИ

Возбуждение активного вещества или накачка может осуществляться несколькими методами.

1. Оптическая накачка. Это достаточно универсальный и широко используемый метод накачки твердотельных и жидкостных лазеров, иногда он применяется и для накачки полупроводниковых и газовых лазеров. Сущность метода заключается в облучении активной среды излучением, которое поглощается активным веществом и переводит активные центры из основного в возбужденное состояние. В качестве источника излучения могут быть использованы разнообразные источники света, в том числе ксеноновые лампы-вспышки низкого давления (около 100 мм рт.ст.), вольфрам-йодные, криптоновые и ртутные капиллярные лампы высокого давления, обычные лампы накаливания, лазеры.

2. Накачка с помощью газового разряда осуществляется путём пропускания тока через газ. При этом возбуждение активных состояний атомов и молекул осуществляется при неупругих столкновениях электронов с тяжелыми частицами, а также при вторичных процессах в газе. В настоящее время для накачки используются тлеющий и дуговой разряды на постоянном токе, высоких и сверхвысоких частотах.

3. Возбуждение электронным пучком. Этот метод накачки достаточно широко используется для полупроводниковых и газовых лазеров.

4. Инжекция неосновных носителей заряда через *n-p* переход - это самый распространенный способ накачки полупроводниковых лазеров, который позволяет непосредственно, без промежуточных стадий, преобразовывать электрическую энергию в лазерное излучение.

5. Химическая накачка применяется главным образом в газовых лазерах и использует химические реакции, сопровождающиеся образованием возбужденных продуктов.

6. Газодинамическая накачка. Этот метод применяется в газовых лазерах и заключается в резком охлаждении рабочего газа, в результате чего может быть достигнута инверсная населенность.

1.3.3. УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ И НАСЫЩЕНИЯ УСИЛЕНИЯ

Как было показано выше, условием усиления электромагнитных колебаний является наличие инверсной населенности. Для генерации необходимо, чтобы усиление за один проход в активном веществе превысило все потери, в том числе связанные с выводом излучения наружу, дифракционными и неактивными потерями в рабочем веществе и др. Это может быть обеспечено уровнем инверсии, при котором показатель усиления на данной частоте превысит суммарный показатель потерь.

Уменьшение относительной интенсивности излучения в резонаторе, вызванное потерями, определяется его добротностью Q :

$$-\frac{\delta I}{I} = \frac{v_n \delta t}{Q}, \quad (1.16)$$

при этом условие превышения усиления над потерями запишется в виде:

$$\alpha > \frac{v_n}{Q}, \quad (1.17)$$

где v_n - частота излучения; δ_t - время прохождения слоя активного вещества.

Энергия или мощность накачки, при которой достигается пороговая инверсия для генерации, называется *пороговой энергией* или мощностью генерации.

Условие самовозбуждения будет выполняться в первую очередь для колебаний, обладающих наивысшей добротностью, при этом система, состоящая из активного вещества в оптическом резонаторе, будет перекачивать энергию в моды резонатора с малыми потерями.

При увеличении интенсивности накачки выше порога генерации происходит насыщение инверсии населенностей и усиления. Характер насыщения усиления в лазере зависит от типа уширения спектральной линии. При однородном уширении контур спектральной линии в режиме насыщения не изменяется. При неоднородном уширении увеличение показателя усиления будет происходить неравномерно по всему контуру, а преимущественно вблизи частоты ν , то есть в общем спектре образуется характерный пик.

При достижении порога генерация начинается на одной моде, обладающей наивысшей добротностью и расположенной ближе всех к максимуму спектральной линии. Это режим одномодовой генерации. При увеличении интенсивности накачки появляется генерация и на модах с меньшей добротностью, при этом лазер работает в режиме многомодовой генерации.

1.3.4. ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

Важнейшим элементом оптических квантовых генераторов является оптический резонатор, при наличии которого за счет многократного прохождения излучения достигается наиболее полное взаимодействие последнего с активной средой. Обеспечивая положительную обратную связь, резонатор влияет на диаграмму направленности и спектральный состав излучения. Важной характеристикой любого резонатора является *добротность*, представляющая собой отношение энергии, запасенной в резонаторе, к средней энергии, теряемой за период колебаний или в единицу времени. Оптический резонатор является открытым, то есть отражающие стенки его не замкнуты.

Простейший оптический резонатор образуют два плоских зеркала, расположенные строго параллельно друг другу. Электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль оптической оси резонатора, будут отражаться от зеркал и интерферировать между собой. Те из них, для которых выполняется условие резонанса, интерферируют на максимум, образуя в резонаторе стоячую волну. За счет многократного прохождения таких волн резко увеличивается эффективность их взаимодействия с активным веществом.

Волны, распространяющиеся под не слишком малым углом к оптической оси, после нескольких отражений выходят из резонатора.

Колебания, распространяющиеся вдоль оси резонатора, обладают наивысшей добротностью и называются аксиальными колебаниями. В оптическом диапазоне в пределах спектральной линии обычно укладывается много собственных типов колебаний резонатора, то есть резонатор является многомодовым. Моды аксиальных колебаний обозначаются TEM_{00} .

Для вывода излучения наружу одно из зеркал резонатора делается полупрозрачным. Это определяет необходимые полезные потери резонатора (потери на излучение). Добротность резонатора, определяемая потерями на излучение, может быть найдена из уравнения:

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda(1-R)}, \quad (1.18)$$

где R - коэффициент отражения зеркала; L - длина резонатора.

Из других видов потерь отметим следующие:

1. Дифракционные потери, связанные с дифракцией электромагнитной волны на зеркалах, имеющих конечные размеры. Чем меньше поперечные размеры зеркала, тем больше потери. Дифракционные потери минимальны для аксиальных TEM_{00} мод и велики для неаксиальных.
2. Потери на несовершенства зеркал обусловлены возможным поглощением в зеркалах, рассеянием на шероховатостях, отклонением геометрии зеркала от заданной и т.д. Для их исключения к зеркалам предъявляются очень высокие требования. Так, погрешность в обработке не должна превышать 0,1 от длины волны.
3. Потери на разъюстировку резонатора. Угол между плоскостями зеркал не должен превышать несколько угловых секунд.
4. Потери в активном веществе связаны с поглощением и рассеянием энергии на различных дефектах в активной среде.

В плоском резонаторе фронт волны на его зеркале практически плоский, что позволяет получить малую расходимость луча.

Кроме плоских часто применяются различные типы резонаторов оптического диапазона со сферическими зеркалами (рис. 1.3). Преимущество сферических зеркал перед плоскими заключается в том, что требуется значительно меньшая точность их юстировки.

Конфокальный резонатор образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами, оси и фокусные расстояния которых совпадают. Поле в таком резонаторе более плотно сконцентрировано около его оси, поэтому дифракционные потери в нем значительно меньше. Резонатор менее чувствителен к разъюстировке зеркал, но в нем хуже используется объем активного вещества.

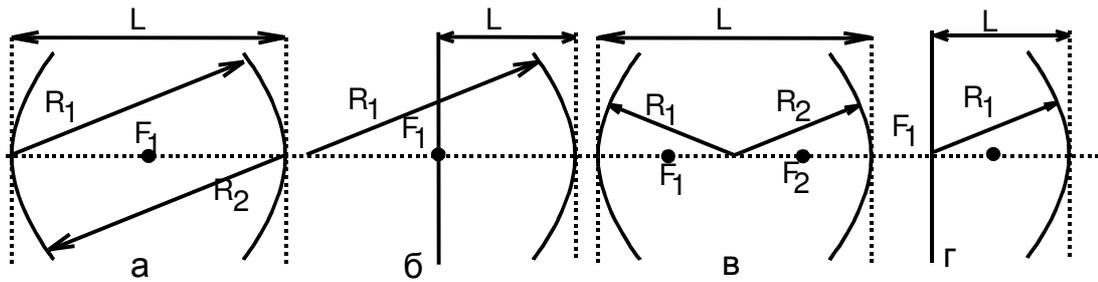


Рис.1.3. Схемы различных типов резонаторов со сферическими зеркалами: а - конфокальный ($R_1=R_2=L$); б - полуконфокальный ($R_1=2L, R_2 = \infty$); в - концентрический ($R_1=R_2=L/2$); г - полуконцентрический ($R_1=L, R_2=\infty$)

Полуконфокальный резонатор образован одним плоским и одним сферическим зеркалом, радиус кривизны которого равен удвоенной длине резонатора. Его свойства аналогичны свойствам конфокального резонатора с удвоенной длиной.

Концентрический резонатор образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами, оси и центры кривизны которых совпадают. Дифракционные потери в нем быстро возрастают для неаксиальных мод, что используется для селекции неаксиальных колебаний.

Полуконцентрический резонатор имеет свойства, аналогичные концентрическому.

1.3.5. ИМПУЛЬСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ, МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ И СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД

В нестационарном режиме работы лазеров уровень инверсии и выходная мощность представляют собой определенную последовательность импульсов. На рис.1.4. представлена картина развития импульсов излучения при прямоугольном импульсе накачки. За время t_2 после включения накачки достигается пороговая населенность, необходимая для генерации. При наличии генерации происходит снижение уровня инверсии, и появляется первый всплеск мощности излучения. При генерации на одной моде создается последовательность лазерных импульсов, амплитуда которых затухает по экспоненте. Такую генерацию называют режимом затухающих пиков. На больших временах и при отсутствии дополнительных источников флуктуаций режим регулярных пиков переходит в стационарный.

Основной причиной возникновения релаксационных колебаний является взаимодействие поля в резонаторе с активной средой. Отметим, что такие колебания могут развиваться не только в начале импульса накачки, но и в стационарном режиме при появлении внезапного возмущения. Характерный период таких колебаний составляет 0,1 - 10 мкс.

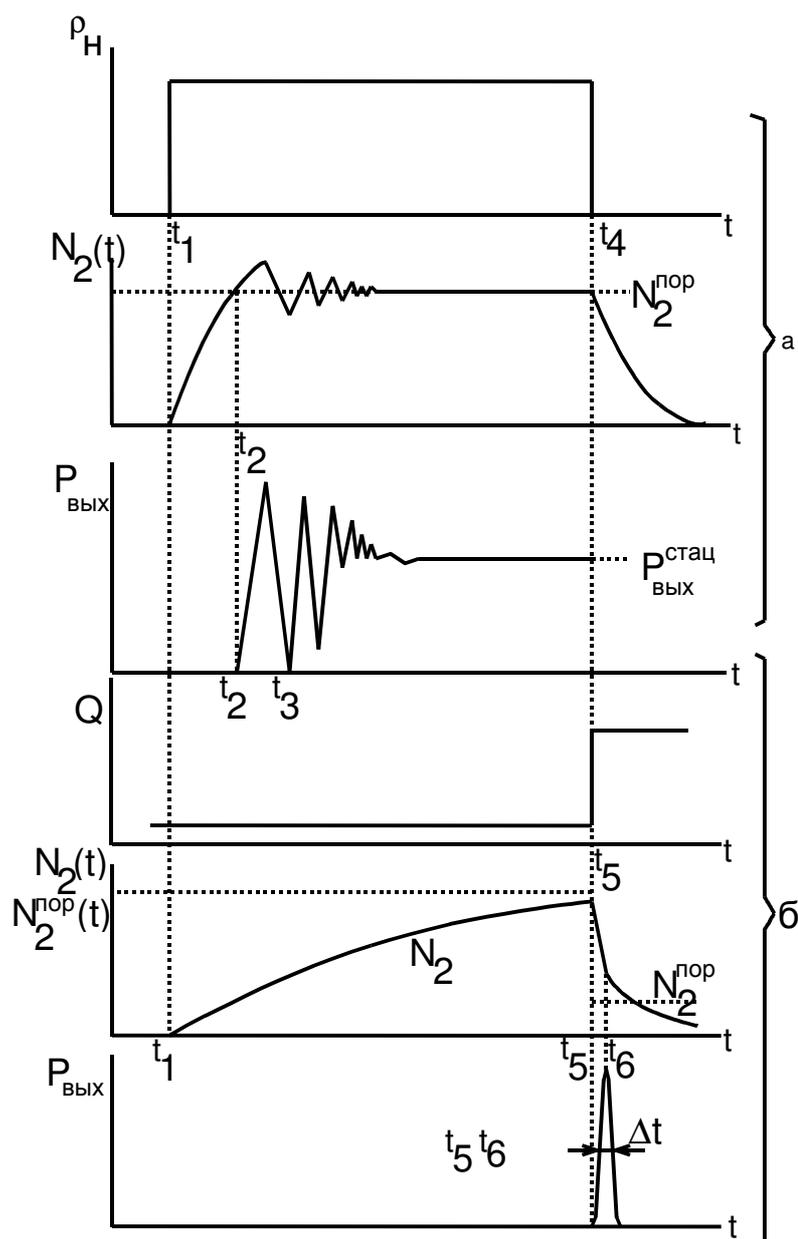


Рис.1.4. Временная диаграмма развития лазерного импульса при прямоугольном импульсе накачки: а - режим свободной генерации; б - режим модуляции добротности

Режим регулярных затухающих колебаний возникает лишь при одномодовой генерации и неизменности параметров лазера во времени. В реальных условиях, особенно в твердотельных и полупроводниковых лазерах, наблюдается режим нерегулярных пичков, интенсивность которых во времени не затухает и меняется хаотично (рис.1.4). Причиной таких колебаний могут быть нестабильность параметров лазера и взаимодействие различных мод при многомодовой генерации.

Рассмотренные выше эффекты соответствуют режиму свободной генерации, когда добротность резонатора и пороговая заселенность постоянны во времени. Очень интересные результаты можно получить при работе лазера в режиме модуляции добротности. Режим модуляции

добротности позволяет получать лазерную генерацию в виде импульсов с малой длительностью и высокой пиковой мощностью (гигантские импульсы).

Принцип работы лазера в режиме модуляции добротности состоит в следующем. Предположим, что внутри лазерного резонатора помещён затвор. Если затвор закрыт, то генерация не возникает и, следовательно, инверсия населённости может достигнуть очень высокого значения. Если теперь очень быстро открыть затвор, то усиление в лазере будет существенно превышать потери, и накопленная энергия выделится в виде короткого (порядка нескольких наносекунд) и интенсивного импульса света (рис.1.4). Поскольку в данном случае происходит изменение добротности резонатора от низких до высоких значений, то такой режим называется режимом модуляции добротности.

Режим модуляции добротности лазера характеризуется следующими основными параметрами: временем задержки генерации $t_{\text{зад}}$, длительностью гигантского импульса $t_{\text{им}}$, пиковой мощностью $P_{\text{мах}}$ и энергией излучения импульса W .

Существует ряд методов модуляции добротности.

1. Одно из двух зеркал резонатора вращается. Потери резонатора будут очень высокими в течение всего периода вращения за исключением момента времени, соответствующего параллельности зеркал.
2. Внутри резонатора имеется оптический модулятор, свойства которого можно менять с помощью внешних воздействий. Чаще всего используют электрооптические эффекты в кристаллах.
3. Внутри резонатора имеется насыщающийся поглотитель, показатель поглощения которого уменьшается при увеличении мощности излучения, например, просветляющийся краситель.

Для получения ещё более коротких импульсов с более высокой пиковой мощностью применяют режим синхронизации мод. При многомодовой генерации зависимость интенсивности выходного излучения лазера от времени часто имеет вид нерегулярных пиков, так как моды обычно не генерируют одновременно, а их фазы более или менее случайны. Однако, если моды вынуждены генерировать одновременно с примерно одинаковыми амплитудами, и их фазы синхронизованы, то происходит очень интересное явление. Моды интерферируют, в результате чего генерация имеет вид коротких световых импульсов.

Чтобы получить очень короткие импульсы, требуется большая ширина генерируемого спектра. Это реализуется в ряде твёрдотельных лазеров, однако невозможно для типичных газовых лазеров. Так в газоразрядных лазерах можно получить импульсы длительностью порядка 1 нс, а в твёрдотельных порядка 1 пс и менее.

В режиме синхронизации мод можно получать большие пиковые мощности, ибо пиковая мощность увеличивается пропорционально числу синхронизованных мод, которое в твёрдотельных лазерах может составлять порядка 1000-10000. Синхронизация мод достигается как с помощью

активного модулятора, управляемого внешним воздействием, так и нелинейной среды. В то же время средняя мощность не зависит от синхронизации мод. Синхронизация мод позволяет получать импульсы с пиковой мощностью порядка $1 \cdot 10^{13}$ Вт и длительностью менее 1пс.

Каждый из режимов работы лазера имеет свои особенности. В режиме свободной генерации обеспечиваются наиболее высокие уровни энергии излучения при наибольших значениях КПД, в режиме модулированной добротности - наиболее высокие уровни импульсной мощности при более низких значениях КПД и т. д.

1.4. СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.4.1. МОНОХРОМАТИЧНОСТЬ

Ширина спектра излучения является одной из основных его характеристик. Для оценки ширины спектра пользуются понятиями ширины спектральной линии на уровне 0,5 от ее максимума и степени монохроматичности. В случае спектральной линии степень монохроматичности μ равна:

$$\mu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}. \quad (1.18)$$

Идеально монохроматического излучения с шириной спектра $\Delta\lambda=0$ не может быть по самой природе излучения, поэтому обычно монохроматическим считается излучение, имеющее достаточно узкий спектральный интервал, который можно охарактеризовать одной длиной волны или частотой. Весьма важно отметить, что с помощью спектральных приборов нельзя получить мощное монохроматическое излучение (чем больше монохроматичность излучения, тем меньше мощность). Это связано с тем, что в обычных источниках излучения мощность распределена в широком спектральном диапазоне, а в ОКГ вся излучаемая мощность сосредоточена в одной или нескольких чрезвычайно узких линиях. Наименьшую ширину линии излучения имеют газовые лазеры (до нескольких десятков герц).

При генерации в импульсном режиме спектр излучения будет уширен до величины, обратной длительности импульса. Спектр лазерного излучения может быть уширен и из-за неоднородности активного материала, что особенно характерно для твердотельных лазеров.

1.4.2. КОГЕРЕНТНОСТЬ

Понятие когерентности в применении к колебаниям относится к связи или согласованности между фазами колебаний в различных точках пространства в один и тот же момент времени или между фазами колебаний в одной и той же точке пространства, но в различные моменты времени. Когерентность характеризуется степенью или функцией когерентности, которая изменяется от 1 (полная когерентность) до 0 (полная некогерентность). Степень когерентности можно определить

экспериментально путем наблюдения интерференционной картины, образуемой при расщеплении светового пучка на два и последующем их сложении после прохождения оптических путей разной длины. Контрастность полос интерференционной картины и, следовательно, степень когерентности определяются из выражения:

$$V = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{(I_{\max} + I_{\min})}. \quad (1.19)$$

Когерентность излучения имеет важное значение в тех применениях лазера, где происходит расщепление и последующее сложение составляющих лазерного пучка. К этим применениям относятся интерферометрическая лазерная дальнометрия, голография.

Временная и пространственная когерентность - независимые параметры: один вид когерентности может существовать в отсутствие другого. Пространственная когерентность зависит от поперечной выходной моды лазера. Лазер непрерывного действия, работающий на одной поперечной моде, обладает почти идеальной пространственной когерентностью. Импульсный лазер в многомодовом режиме имеет ограниченную пространственную когерентность. Временная когерентность непосредственно связана с монохроматичностью. Одночастотные (одномодовые) лазеры непрерывного действия имеют высокую степень временной когерентности.

1.4.3. НАПРАВЛЕННОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТЬ ФОКУСИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Направленным называют излучение, распространяющееся в пределах очень небольшого телесного угла. Иными словами, направленность характеризуется телесным углом, в котором распространяется большая часть излучения. Обычные источники обладают очень низкой направленностью излучения (в пределах телесного угла от 2π до 4π).

От обычных источников можно получить почти параллельные лучи, если на большом расстоянии установить диафрагму или поместить источник в фокальной плоскости коллиматора. Однако энергия такого пучка будет весьма мала. ОКГ излучают в очень небольшом телесном угле. Излучение лазеров является когерентным, и поэтому фронт волны представляет собой, как правило, почти плоскость или сферу очень большого радиуса, т.е. лазер можно рассматривать как источник почти параллельных лучей с очень небольшой расходимостью. В принципе эта расходимость определяется дифракцией на выходном отверстии. Причём направленность излучения лазеров достигается не в результате каких-то специальных приёмов, а благодаря когерентности излучения. Необходимо отметить, что создание идеально параллельного пучка света невозможно, и при помощи лазеров, можно лишь добиться очень малого угла расхождения. Нижний предел для расходимости пучка, определяемый дифракцией, может быть оценен из выражения:

$$\theta = \frac{K\lambda}{d}, \quad (1.20)$$

где d - диаметр отверстия или диаметр пучка в наиболее узкой его части;
 K - коэффициент, зависящий от формы пучка.

Для плоского пучка $K = 2,44$, для гауссова $K = 1,27$.

Когерентное излучение ОКГ можно сфокусировать в пятно чрезвычайно малых размеров, где плотность энергии будет очень большой. Теоретическим пределом минимального диаметра лазерного пучка является длина волны. В реальной ситуации этот предел недостижим из-за неидеальности пространственных характеристик лазерного пучка и искажений в линзах. Для промышленных лазеров размеры сфокусированного светового пятна составляют 0,001 - 0,1 см.

1.4.4. ЯРКОСТЬ И МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

Яркость \mathbf{V} определяется как мощность на единицу площади и на единицу телесного угла. Для луча круглого сечения радиусом R , расходимостью θ и полной мощностью P имеем:

$$\mathbf{V} = \frac{P}{\pi R^2 \theta^2}. \quad (1.21)$$

Спектральная яркость $\mathbf{V}_\nu = \mathbf{V}/\Delta\nu$, где $\Delta\nu$ - ширина лазерной линии в Гц. Лазер даже небольшой мощности имеет яркость, которая на несколько порядков превосходит яркость обычных источников. Это свойство является следствием высокой направленности лазерного пучка. Согласно одной из теорем оптики, яркость источника нельзя повысить с помощью оптической системы. Поэтому для повышения яркости необходимо улучшать модовый состав излучения и снижать угловую расходимость пучка.

Мощность излучения, или лучистый поток, представляет собой энергию, переносимую излучением за единицу времени. Если энергия излучается в виде импульсов, то пользуются понятием импульсной и средней мощности.

Средняя мощность излучения ОКГ обычно невелика, хотя существуют генераторы, развивающие в непрерывном режиме мощность до десятков кВт. По своей импульсной мощности и спектральной плотности мощности лазеры значительно превосходят все существующие источники в оптическом диапазоне спектра.

Из лазеров, работающих в непрерывном режиме, наибольшую мощность имеют CO_2 -лазеры (десятки киловатт для промышленных образцов). Очень высокие уровни мощности имеют импульсные твердотельные лазеры на неодимовом стекле (до 10^{11} - 10^{13} Вт при наносекундной длительности импульса).

1.5. ТИПЫ ЛАЗЕРОВ

Существует большое количество типов лазеров, классифицируемых по самым различным признакам - агрегатному состоянию рабочего вещества,

рабочей длине волны, способу накачки, мощности излучения, режиму генерации и т.д. Рассмотрим основные типы лазеров, основываясь на классификации по агрегатному состоянию активной среды. С этих позиций можно выделить: твердотельные лазеры; газовые лазеры, включая газодинамические, химические и эксимерные; полупроводниковые лазеры; лазеры на красителях. Хотя полупроводниковые лазеры по агрегатному состоянию твердотельные, их целесообразно рассмотреть отдельно из-за специфики в механизмах генерации.

1.5.1. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Активными центрами в лазерах этого типа являются ионы, введённые в кристаллическую среду. Активные элементы (кристаллическая основа + активные ионы) изготавливаются в виде стержней с отполированными торцевыми поверхностями, с нанесёнными зеркальными покрытиями и также с обработанной боковой поверхностью для эффективного введения излучения накачки. Типичные лазерные стержни имеют длину 50 - 300 мм и диаметр 5 - 15 мм.

Излучение накачки создаётся в импульсном или непрерывном режиме с помощью ламп различной формы и газового наполнения, а также с помощью лазера. Накачка с помощью лазера особенно эффективна. В качестве источников накачки применяются: ксеноновые лампы, криптоновые лампы, ртутные лампы высокого давления, галогенные лампы. Различные твердотельные лазеры генерируют излучение в широкой спектральной области: 0,3 - 3 мкм в импульсном режиме; 0,69 – 2,6 мкм в непрерывном режиме. Излучение происходит в виде одиночных спектрально узких линий, которые не являются перестраиваемыми. Само излучение характеризуется малой длиной когерентности, большими колебаниями интенсивности излучения, слабо регулярным распределением интенсивности по поперечному сечению пучка. Более высокое качество пучка возможно в непрерывном режиме при возбуждении моды TEM_{00} .

Для излучения импульсного лазера характерны пиковые режимы. При работе в импульсном режиме длительность импульса накачки равна примерно 5 мс. Длительность пиков примерно 1 мс. Многие из твердотельных лазеров работают по четырёхуровневой схеме. Поскольку нижний уровень почти не заселён, этот тип лазеров обладает низкой пороговой мощностью накачки. Из указанных лазеров особо следует выделить рубиновый, Nd-ИАГ и лазеры на неодимовом стекле.

Рубиновый лазер

Характерные концентрации ионов Cr^{3+} в рубине – 0,01 – 0,5%. Так как система $Cr^{3+} : Al_2O_3$ работает по трёхуровневой схеме, инверсия заселённости достигается только при возбуждении около 50% ионов Cr^{3+} . Это приводит к высокому порогу генерации. Рубиновые лазеры могут работать в импульсном или непрерывном режиме. Из-за низкого КПД (около 0,1%) рубиновый лазер непрерывного действия неэкономичен по сравнению с другими

твердотельными лазерами непрерывного действия. При работе в импульсном режиме без модуляции добротности выходное излучение лазера состоит из повторяющихся пиков длительностью около 1 мкс с большой мощностью в максимумах. Таким образом, излучение рубинового лазера характеризуется большой мощностью при невысоком качестве излучения (неоднородное распределение по поперечному сечению, пиковый характер излучения).

Лазеры на неодимовом стекле

Этот лазер излучает в ближайшем ИК-диапазоне ($\lambda=1,06$ мкм). В качестве активных ионов в стекло, используемое в качестве матрицы, вводят ионы Nd^{3+} с массовым содержанием 0,5 - 8%. Nd - лазер работает по четырёхуровневой схеме. Поскольку нижний лазерный уровень почти не заселён, пороговая мощность накачки мала (около 200 Вт), в результате чего нетрудно осуществить непрерывный режим работы. Для оптической накачки преимущественно применяют стержневые импульсные лампы с эллиптическим отражателем. Из-за особой структуры активного вещества лазеры на неодимовом стекле лучше всего подходят для генерации пикосекундных импульсов в режиме синхронизации мод. В этом режиме достигнуты максимальные мощности 10^{12} - 10^{13} Вт.

Лазеры на алюмоиттриевом гранате

В настоящее время лазер этого типа является важнейшим твердотельным лазером. Он отличается высокими значениями мощности в импульсном режиме при высокой частоте следования импульсов (до 10 кГц). Физический принцип получения инверсии населённости в этом лазере совпадает с лазером на стекле с неодимом. Отличие заключается в использовании кристаллической матрицы ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), а не аморфной (стекло). Активирование иттрий-алюминиевого граната ионами Nd^{3+} составляет 0,5-3,5 %.

Возбуждение среды происходит с помощью оптической накачки: в импульсном режиме - ксеноновыми импульсными лампами с цилиндрическим отражателем; в непрерывном режиме - галогенными лампами и криптоновыми дуговыми лампами с эллиптическими отражателями. Пороговая энергия составляет менее 5 Дж.

Максимальная мощность лазерного излучения в импульсном режиме достигает 10^9 Вт, в непрерывном режиме - 500 Вт. КПД составляет примерно 1%, длина волны излучения - 1,06 мкм.

1.5.2. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В качестве активных сред для газовых лазеров пригодны все газообразные при комнатной температуре элементы, большое число элементов в парообразном состоянии (например, пары металлов), большое число молекул.

При создании инверсии населённости широко используется ударное возбуждение излучающих состояний при столкновениях атомов и молекул с электронами в газовых разрядах и электронных пучках. При этом большую

роль обычно играют ступенчатые процессы с участием метастабильных атомов и молекул. Для лазеров, работающих на колебательных переходах в молекулах, может быть использована химическая или газодинамическая накачка. Предельные физико-технические параметры газовых лазеров приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Параметр	Значение	Тип лазера
Мощность в непрерывном режиме, кВт	400	Газодинамический CO ₂ -лазер
Энергия импульса излучения, кДж	70	Быстропоточный CO ₂ -лазер
Импульсная мощность, ТВт	20	ТЕА-лазер на CO ₂
Длительность импульса, пс	30	ТЕА-лазер на CO ₂
КПД, %	50	Лазер на галогенидах инертных газов
Минимальная длина волны, нм	116	H ₂ -лазер
Максимальная длина волны, мм	1,965	CH ₃ Br-лазер

Примерная конструкция газового лазера приведена на рис.1.5. Активная среда находится в пределах лазерной трубки, длина зоны возбуждения достигает от нескольких сантиметров до 200 м (типично 0,3 – 1,5 м), а диаметр лазерной трубки 0,1 - 50 см (типично 0,1 - 2 см), наполнение газа стационарное или в проточной системе. Охлаждение газа, т.е. отвод тепловых потерь происходит с помощью воздушного охлаждения при малой мощности; водяного охлаждения при средней и высокой мощности; быстрой замены газа при очень высокой мощности.

В зависимости от типа частицы, на переходах которой осуществляется генерация, различают атомные, ионные и молекулярные газовые лазеры.

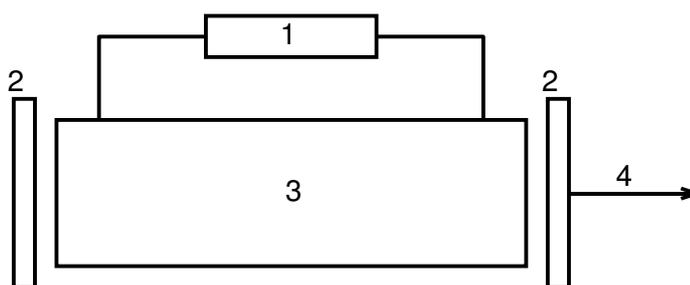


Рис.1.5. Принципиальная схема газоразрядного лазера: 1 - источник питания разряда; 2 - оптический резонатор; 3 - активный элемент; 4 - лазерное излучение

Атомные лазеры

Рассмотрим более подробно He-Ne лазер. Этот лазер может работать в непрерывном режиме с малыми выходными мощностями. Он отличается небольшими размерами, простой и надёжной конструкцией. В He-Ne лазере возможна генерация на многочисленных переходах между электронными уровнями атома неона. Чаще всего используется генерация на длине волны

632,8 нм. Создание инверсной заселённости происходит в электрическом газовом разряде, причём заселение верхних уровней атома неона в основном происходит за счёт неупругих столкновений с метастабильными атомами He, которые возбуждаются при столкновениях с электронами.

Свойства He-Ne лазера типичны для газовых лазеров и характеризуются большой длиной когерентности, хорошим качеством пучка. Гелий-неоновые лазеры имеют сравнительно малую мощность (обычно менее одного Ватта в непрерывном режиме) и используются в голографии, измерительной технике и технологии как инструмент контроля.

Лазеры на парах металлов

Среди лазеров на переходах в атомах лазеры на парах металлов занимают важное место. Дело в том, что металлы обладают наиболее подходящей структурой энергетических уровней с точки зрения получения высокого квантового КПД. В качестве лазерного обычно используется переход из резонансного в метастабильное состояние, так как время жизни нижнего состояния больше, чем верхнего, то лазер может работать только в импульсном режиме. Такие лазеры получили название лазеров на самоограниченных переходах. В настоящее время получена генерация на парах многих металлов - меди, золота, свинца, марганца, таллия, висмута, железа, бария, кальция, стронция и других. Промышленное значение имеют, в основном, лазеры на парах меди и меди-золота. Лазеры на парах меди дают излучение в зеленой (510,6 нм) и желтой (578,2 нм) областях спектра. В присутствии паров золота появляется красная линия (627,8 нм), т.е. излучение лазера становится трехцветным. Такие лазеры имеют среднюю мощность излучения до 20 Вт, а импульсную - до 200 кВт при длительности импульса 20 - 30 нс. Трудности создания лазеров на парах металлов обусловлены высокой рабочей температурой (до 1700 К) активного объема и необходимостью обеспечения мощных коротких импульсов накачки при частоте повторения в десятки килогерц.

Ионные лазеры

В ионных лазерах генерация осуществляется на электронных переходах в ионах. Из ионных лазеров наибольшее распространение получил аргоновый лазер, в котором генерация может происходить на нескольких длинах волн в диапазоне от 454 до 528 нм. Заселение верхнего лазерного уровня происходит при электронных ударах. Накачка осуществляется мощным дуговым разрядом для создания высокой степени ионизации. Нижний лазерный уровень обладает очень коротким временем жизни, что обеспечивает высокую инверсность населенности. Мощность аргоновых лазеров достигает 500 Вт в непрерывном режиме при КПД порядка 0,1%. Из других ионных лазеров следует отметить криптоновые и гелий-кадмиевые. Заселение верхнего лазерного уровня иона кадмия осуществляется при участии метастабильных атомов гелия. Возможны два лазерных перехода с длинами волн 325 и 441,6 нм.

Молекулярные лазеры

1. Газовые лазеры в УФ-диапазоне (N_2 - и H_2 -лазеры).

N_2 -лазер является высокомоощным лазером с коротким временем нарастания импульса, с высокой частотой следования импульсов. Из-за незначительного времени жизни верхнего уровня инверсия заселённости достигается только при возбуждении короткими импульсами (<15 нс). Для достижения высоких энергий в импульсе требуется большая электрическая мощность возбуждения. Благодаря очень быстрому усилению в активной среде, из-за чего вся инверсная населённость снимается в один проход, N_2 -лазер может работать без резонатора. Длина волны излучения азотного лазера составляет 337,1 нм. H_2 -лазер является мощным импульсным лазером в вакуумном УФ-диапазоне с малой длительностью импульса. По принципу действия он аналогичен азотному.

2. Эксимерные лазеры

Класс импульсных газовых лазеров, объединенных названием "эксимерные", возник сравнительно недавно. Лазеры этого класса работают на переходах между двумя термами молекулы, нижний из которых является отталкивательным и составлен обычно из атомов в основном состоянии. Верхний терм лазерного перехода имеет потенциальный минимум. Такие молекулы существуют только в возбужденном состоянии, откуда и происходит название этого типа лазеров.

В результате процессов в возбужденном газе образуется эксимерная молекула в электронно-возбужденном состоянии на некотором колебательном уровне. Ширина полосы испускания перехода в эксимерном лазере на несколько порядков превышает значение этой величины для других типов лазеров. Сечение индуцированного излучения для перехода в эксимерном лазере весьма мало, и этот лазер может работать только при относительно высокой интенсивности накачки в импульсном режиме.

В настоящее время существуют эксимерные лазеры с энергией импульса до 300 Дж при длительности импульса порядка 50 нс и КПД = 10%. Указанные параметры являются рекордными для всех лазеров видимого и ультрафиолетового диапазонов.

Эксимерные лазеры являются, как правило, ультрафиолетовыми лазерами и перекрывают широкую область спектра. В таблице 1.2 представлены длины волн для центров линий перехода возбужденных молекул, составляющих основу существующих эксимерных лазеров. Кроме того, из-за большой ширины линии перехода эксимерные лазеры могут работать как перестраиваемые лазеры в широкой области спектра.

Приведенные в таблице 1.2 параметры эксимерных лазеров ставят их вне конкуренции среди лазеров видимого и ультрафиолетового диапазонов с точки зрения перспективы применений в технике и технологии.

Таблица 1.2.

Параметры переходов в эксимерных лазерах

Молекула, переход между состояниями которой создает лазерное излучение	Длина волны в центре линии перехода, нм	Эквивалентный электронный переход в атоме	Ширина спектра усиления, нм
Ar ₂	126,1	Ar(P)→Ar(¹ S)	8,0
Kr ₂	146,7	Kr(P) →Kr(¹ S)	13,8
Xe ₂	172,0	Xe(P)→Xe(¹ S)	20,0
ArF	193,3	Ar(P)→Ar(¹ S)	1,5
KrCl	222,0	Kr(P) →Kr(¹ S)	5,0
KrF	248,4	Kr(P) →Kr(¹ S)	4,0
XeBr	281,8	Xe(P)→Xe(¹ S)	1,0
XeCl	308,0	Xe(P)→Xe(¹ S)	2,5
XeF	351,1	Xe(P)→Xe(¹ S)	1,5
XeO	540,0	O(¹ S) →O(³ P)	25,0
KrO	557,7	O(¹ S) →O(³ P)	1,5
ArO	558,0	O(¹ S) →O(³ P)	4,0

3. Газовые лазеры в инфракрасной области спектра

Эти газовые лазеры наряду с характерными для всех газовых лазеров свойствами характеризуются прежде всего незначительной шириной линии и ограниченными возможностями перестройки при высокой мощности. Вынужденное излучение в ИК-области спектра можно получить на переходах между колебательно-вращательными уровнями молекул в основном электронном состоянии в средней и дальней ИК-области (HF-, CO-, CO₂-лазеры, H₂O-, SO₂-лазеры) и вращательными уровнями в основном электронном состоянии в дальней ИК-области (HF-, CH₃F-лазеры). Одним из важнейших типов лазеров является CO₂-лазер. Его КПД (больше 20 %) превышает КПД почти всех лазеров. В CO₂-лазере получены самые малые для газовых лазеров длительности импульсов (<30пс). Лазер работает на смеси газов CO₂, N₂, He. Лазерное излучение в нем возникает при переходах между колебательно-вращательными уровнями молекулы CO₂ в основном электронном состоянии. Заселение верхнего лазерного уровня может происходить за счёт всех характерных для газовых лазеров способов создания инверсии. Наиболее часто используется накачка за счёт газового разряда. Мощность CO₂-лазеров в непрерывном режиме достигает десятков киловатт, а в импульсном - сотен мегаватт, длина волны излучения обычно составляет 10,6 мкм.

4. Химические лазеры

В химических лазерах генерация электромагнитного излучения происходит в результате протекания химических реакций. Так при взаимодействии фтора и водорода (дейтерия), активированным нагретым в дуговом разряде азотом, создается инверсная заселенность возбужденных молекул HF или DF, обеспечивающая лазерное излучение на длинах волн 2,6-3,5 или 3,6 - 5 мкм.

В хемолазерах с переносом энергии возбужденные молекулы фтористого водорода или дейтерия передают свою энергию молекулам углекислого газа, и наблюдается лазерное излучение последних на длине волны 10,6 мкм. Известны химические лазеры, работа которых инициируется ударной или взрывной волной, а также электрическим разрядом. Фотодиссоционные лазеры также являются частным случаем химических лазеров. Основным процессом, приводящим к появлению инверсной заселенности в хемолазере, является химическая реакция, в результате которой образуются атомы, молекулы или радикалы в возбужденном состоянии. Наиболее известным является хемолазер на фотодиссоциации молекул CF_3I .

5. Газодинамические лазеры

Активное вещество газодинамического лазера представляет собой смесь азота и двуокиси углерода. Инверсная заселенность энергетических уровней в этом лазере создается за счет дифференцированной колебательной релаксации, вызываемой столкновением молекул в процессе сверхзвукового расширения газа. Согласно теоретическим расчетам, газодинамические лазеры способны создавать непрерывное лазерное излучение мощностью в несколько тысяч киловатт. В газодинамическом лазере применяется тепловая накачка за счет сгорания окиси углерода и реактивный принцип истечения активного вещества. Лазерная камера напоминает по внешнему виду камеру сгорания реактивного двигателя. Она снабжена сужающимся и расширяющимся соплом, назначение которого состоит в получении за соплом пониженных температур и давления газа в целях создания инверсной заселенности энергетических уровней.

Принцип работы газодинамического лазера основан на расширении газовой смеси и резком снижении ее температуры и давления за время, гораздо меньшее, чем это требуется для протекания процессов колебательной релаксации верхнего энергетического уровня лазерной системы. При быстром снижении давления возбужденные молекулы азота сталкиваются с молекулами углекислого газа и передают им свою энергию колебаний. Получившие энергию возбужденные молекулы углекислого газа создают когерентное монохроматическое излучение на волне 10,6 мкм. Первый газодинамический лазер развивал мощность генерации в непрерывном режиме около 60 кВт. Существуют газодинамические лазеры, мощность которых превышает 200 кВт. Газодинамические лазеры имеют КПД порядка 10 – 15 %. Одним из способов повышения КПД газодинамических лазеров является применение замкнутого цикла, при котором отработавшая (но еще горячая) газовая смесь возвращается обратно в камеру сгорания или другой источник нагревания. К недостаткам газодинамических лазеров следует отнести их большие габариты, потребление большого количества горючего, сильный шум при работе. Дальнейшим развитием газодинамических лазеров являются электроаэродинамические лазеры, в которых возбуждение молекул азота осуществляется в электрической дуге. КПД таких лазеров достигает 30 %, а выходная мощность - до 100 кВт.

6. Электроионизационные лазеры

Накачка в таком лазере создается с помощью электронного пучка высокой энергии (>100 кэВ), вводимого в активную среду через тонкую алюминиевую фольгу. В качестве активной среды обычно используется смесь азота и углекислого газа. В этих лазерах достигается очень высокая энергия в импульсе при КПД до 50 %.

1.5.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Полупроводниковый диод - основной элемент полупроводникового лазера. Действие лазера основано на том, что при прямом смещении электроны инжектируются в p -область, где происходит их излучательная рекомбинация с имеющимися там дырками. Для создания состояния с инверсией заселенностей необходима большая концентрация дырок в валентной зоне, что достигается увеличением концентрации легирующей акцепторной примеси. Для того, чтобы инжекция электронов в p -область превышала инжекцию дырок в n -область (где рекомбинация безизлучательная, а следовательно, ток дырок в n -область целиком относится к потерям), необходимо, чтобы концентрация донорной примеси в n -области была выше концентрации акцепторной примеси в p -области. Излучателем является узкая часть p -области, прилегающая к p - n -переходу. Конструкция лазерного диода показана на рис.1.6. Зеркалами являются гладкие грани самого полупроводникового кристалла, получаемые обычно скалыванием или полировкой его краев.

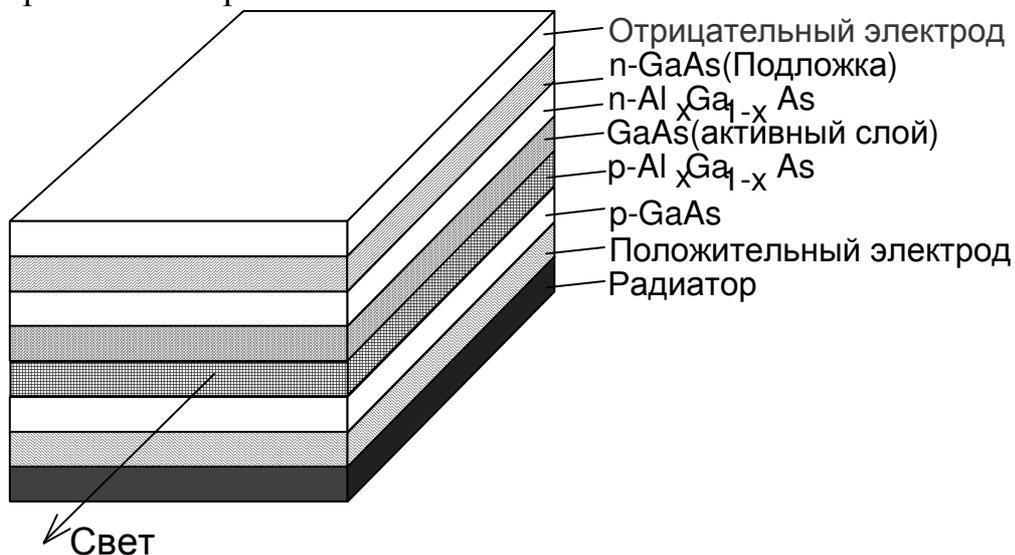


Рис. 1.6. Схема полупроводникового инжекционного лазера

Вынужденное излучение происходит параллельно p - n -переходу. Типичные размеры лазерного кристалла (мкм): длина - 100 - 500; ширина 200 - 400; высота 80 - 100; толщина области рекомбинации 1 - 3.

Материалом для полупроводниковых лазеров могут быть соединения типа: A^3B^5 (GaN, GaSb, InP, GaInAs, и т.д.); A^4B^4 (PbS, PbTe, PbSe, SiC и т.д.); A^2B^6 (ZnO, CdS, ZnCdS и т.д.). Инжекционные лазеры отличаются от всех других типов лазеров высоким КПД (выше 10 %); простотой возбуждения; крайне незначительными размерами; низким напряжением накачки;

надёжностью. Мощность излучения в многомодовом режиме составляет несколько милливатт, в одномодовом режиме около 0,1 - 1 мВт. Созданы промышленные полупроводниковые лазеры мощностью несколько Вт и интегральные лазерные решетки мощностью десятки Вт.

1.5.4. ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ

В лазерах на красителях вынужденное излучение возникает на флуоресцентном переходе в многоатомных органических молекулах. Концентрация красителя составляет 0,005 - 0,0001 моль/л. Органические молекулы принадлежат различным химическим классам, например, кумарин, антрацен, оксазол, ксантен, акридин, полиметин. Электронные состояния красителей имеют многочисленные колебательные и вращательные уровни, которые за счёт взаимодействия друг с другом и соседними молекулами (растворителя) так сильно уширены, что переходы между электронными состояниями в спектре флуоресценции образуют широкие полосы. Создание инверсии заселённости происходит с помощью оптической, в том числе лазерной накачки. Лазеры на красителях генерируют электромагнитное излучение в спектральном диапазоне от 0,32 до 1,22 мкм. Из-за того, что при оптической накачке много энергии уходит в тепло, КПД этих лазеров невысок, порядка 1%. Обычно жидкостные лазеры работают в импульсном режиме. Наиболее важным свойством лазеров на красителях является возможность перестройки частоты излучения в широких пределах (с одним красителем несколько десятков нм). Перестройка частоты может осуществляться изменением состава, концентрации и температуры раствора.

1.6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сравнения выходных параметров различных типов лазеров можно заключить, что для технологической обработки материалов, требующей высокой мощности, наиболее подходящими являются инфракрасные лазеры на молекулах диоксида углерода и твердотельные лазеры на неодимовом стекле и алюмоиттриевом гранате. Из лазеров средней мощности, излучающих в видимой области спектра, следует отметить ионные аргоновые лазеры и лазеры на парах металлов. Наиболее эффективными источниками ультрафиолетового излучения являются азотные и эксимерные лазеры. Маломощные гелий-неоновые и полупроводниковые лазеры используются как инструмент технологического контроля. Жидкостные лазеры, основным преимуществом которых является возможность перестройки частоты в широких пределах, наиболее полезны при проведении резонансных процессов, например, в фотохимии.

Вопросы и задачи для практических занятий и самостоятельной работы

1. Вычислите коэффициент вынужденного излучения, если коэффициент спонтанного излучения A составляет а) 10^8 с^{-1} ; б) 10^6 с^{-1} ; в) 10^4 с^{-1} .
2. Во сколько раз усиливается излучение, если коэффициент усиления составляет: а) 0,1 дБ; б) 10 дБ; в) 100 дБ?
3. Определите добротность резонатора гелий-неонового лазера по отношению к потерям на излучение, если длина активной зоны 40 см, а коэффициент отражения зеркала составляет а) 0,9; б) 0,6; в) 0,4.
4. Вычислите дифракционный предел расходимости пучка излучения лазера диаметром 3 мм а) гелий-неонового; б) на неодимовом стекле; в) на углекислом газе.
5. Оцените минимально возможное сечение сфокусированного пучка лазерного излучения с длиной волны а) 500; б) 1060; в) 10600 нм.
6. Как влияет добротность резонатора на пороговую инверсную населенность по генерации?
7. Почему в четырехуровневой системе инверсная населенность уровней достигается при минимальной накачке?
8. Сравните свойства и особенности резонаторов с плоскими и сферическими зеркалами.
9. Проанализируйте картину развития импульсов излучения при прямоугольном импульсе накачки.
10. Опишите процесс формирования гигантского импульса в режиме модуляции добротности.
11. Дайте сравнительную характеристику основных методов модуляции добротности.
12. Рассмотрите режим синхронизации мод, укажите пути получения мощных коротких импульсов.
13. Объясните влияние синхронизации мод на среднюю мощность излучения.
14. Оцените максимальное значение степени когерентности излучения и сформулируйте условие его получения.
15. Назовите активные ионы в лазерах на рубине, алюмоиттриевом гранате и неодимовом стекле.
16. Каковы функции гелия в гелий-неоновом лазере?
17. Почему лазеры на парах меди могут работать только в импульсном режиме?
18. На каких переходах в молекулах углекислого газа происходит генерация?
19. Почему активная среда лазера на углекислом газе, как правило, содержит азот и гелий?
20. Приведите примеры газовых смесей, в которых могут образовываться эксимерные молекулы.
21. Проанализируйте схему потенциальных кривых одной из эксимерных молекул. Почему эксимерные лазеры работают только в импульсном режиме?

22. Сформулируйте принципы работы и условия получения максимальной мощности излучения для полупроводникового инжекционного лазера.
23. В чем состоит основное достоинство жидкостных лазеров?
24. Чем обусловлен эффект насыщения усиления в квантовых системах?
25. Как можно улучшить усилительные свойства среды?
26. Назовите основные методы возбуждения активной среды лазера.
27. Рассмотрите основные процессы взаимодействия квантовых систем и электромагнитного излучения.

ГЛАВА 2. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Использование лазеров в технологических процессах связано с воздействием сфокусированного или несфокусированного лазерного излучения на поверхность твердого тела. Это воздействие может инициировать поверхностные химические реакции, приводить к нагреванию твердого тела или создавать ударную волну. Наиболее распространенными в технологии являются процессы, связанные с нагревом твердого тела.

Процессы термической обработки материалов лазерным излучением основаны в большинстве случаев на передаче энергии квантов света тепловым колебаниям решётки твёрдого тела, т. е. на термическом действии света. В общем случае эти процессы могут быть представлены следующими стадиями:

- 1) поглощение света и последующая передача энергии внутрь тела;
- 2) нагревание материала;
- 3) изменение агрегатного состояния вещества (плавление, испарение, сублимация, термодеструкция);
- 4) удаление материала из зоны воздействия;
- 5) Остывание материала после прекращения облучения.

Характерное время протекания каждой из этих стадий зависит от физико-химических характеристик облучаемого материала, длины волны и энергетических параметров излучения.

Следует отметить, что теплофизическая постановка задачи справедлива только до плотности мощности порядка 10^9 Вт/см². При более высоких плотностях мощности необходимо использовать теорию взрыва, когда основным действующим фактором становится ударная волна.

Остановимся подробнее на тепловом действии лазерного излучения, которое используется в большинстве технологических процессов.

2.1.1. Поглощение и отражение лазерного излучения твердым телом

Попадая на поверхность твердого тела, лазерное излучение частично поглощается, а частично отражается. Использование лазерной энергии для технологической обработки основано на поглощении излучения веществом. Поглощение излучения материалом описывается законом Бугера-Ламберта:

$$I_x = I_0 \cdot (1 - R) \cdot \exp(-\alpha \cdot x), \quad (2.1)$$

где I_x - интенсивность лазерного излучения, проникающего на глубину x ;
 I_0 - интенсивность падающего излучения; R - коэффициент отражения;
 α - коэффициент поглощения.

Основными механизмами поглощения излучения твердым телом являются:

- 1) поглощение света свободными носителями заряда, которое основано на ускорении свободных носителей заряда энергией электромагнитного поля световой волны;

- 2) фундаментальное или основное поглощение, связанное с отрывом электрона от атома;
- 3) решеточное поглощение, то есть возбуждение колебаний решетки, характерное только для сложных кристаллов;
- 4) примесное поглощение. Этот вид поглощения вызван переходами электронов между уровнями примеси и разрешенными зонами.

Механизмы взаимодействия существенно различны для металлов и неметаллов. Для металлов основным процессом поглощения излучения является взаимодействие квантов света с электронами проводимости в скин-слое, толщина которого составляет $10^{-5} - 10^{-6}$ см⁻¹. Свободные электроны рассеивают поглощенную энергию на тепловых колебаниях решетки за время порядка $10^{-10} - 10^{-11}$ с. Время выравнивания температуры электронов и решетки составляет $10^{-8} - 10^{-9}$ с, при этом можно ввести понятие общей температуры металла. Пространственное распределение поглощенного светового потока в металле для оптических частот хорошо описывается законом Бугера - Ламберта.

Величина коэффициента поглощения зависит от концентрации свободных электронов в металле и составляет $10^5 - 10^6$ см⁻¹. Конкретные значения коэффициента поглощения для различных металлов приводятся в справочной литературе или могут быть оценены по приближенной формуле:

$$\alpha = \frac{4}{c_0} \sqrt{\frac{\pi \cdot n_0 \cdot e_0^2}{m_0^*}}, \quad (2.2)$$

где e_0 и m_0^* - заряд и эффективная масса электрона; n_0 - концентрация свободных электронов в металле; c_0 - скорость света.

Коэффициент отражения R играет важную роль в рассматриваемом процессе, так как показывает, какая часть падающей энергии отражается и не участвует в нагреве поверхности. Отражение света классифицируют по характеру границы раздела сред. Если поверхность раздела имеет неровности, размеры которых меньше длины волны падающего света, то имеет место зеркальное отражение, при котором угол падения равен углу отражения. Если размеры неровностей поверхности соизмеримы или превышают длину волны падающего света, то отражение является диффузионным. Диффузное отраженное излучение распространяется в пределах полусферы.

У металлов коэффициент отражения существенно зависит от длины волны, резко возрастая в дальней инфракрасной области. Коэффициенты отражения некоторых металлов в зависимости от длины волны представлены в таблице 2.1.

С увеличением температуры поверхности значение коэффициента отражения падает, поглощательная способность увеличивается (рис.2.1). Это даёт возможность нагревать поверхность металлов до плавления и испарения даже при высоком исходном значении коэффициента отражения при длине волны 10,6 мкм.

Таблица.2.1.

Коэффициенты отражения некоторых металлов.

Металл	Длина волны излучения, мкм		
	0,96	1,06	10,6
Al	0,87	0,93	0,97
Cr	0,56	0,58	0,93
Cu	0,82	0,91	0,98
Ni	0,68	0,75	0,95
Ag	0,95	0,97	0,99
Сталь	0,58	0,63	0,93
Zr	-	-	0,917
Ti	-	-	0,906

При плавлении большинства металлов их электропроводность скачком уменьшается в 2-3 раза, что влечёт за собой скачок теплопроводности и коэффициента поглощения излучения (рис. 2.1).

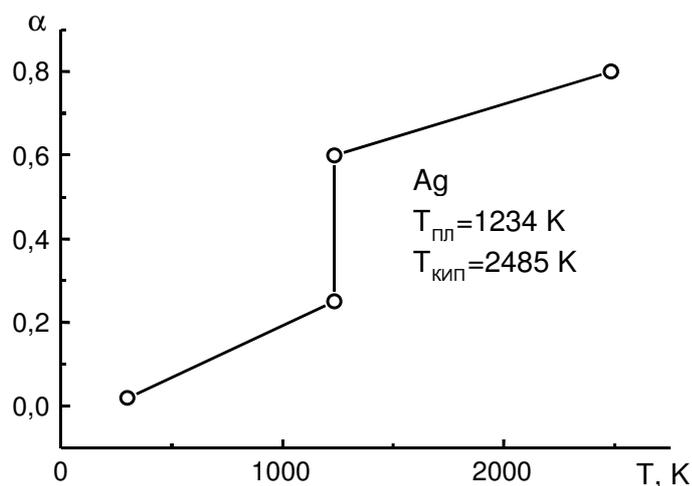


Рис. 2.1 Зависимость коэффициента поглощения излучения серебром от температуры

В кристаллических диэлектриках поглощение свободными электронами при нормальной температуре незначительно, а процессами, определяющими взаимодействие, являются возбуждение колебаний решетки и фундаментальное поглощение. Для большинства материалов спектр решеточного поглощения определяется диапазоном длин волн 20 - 80 мкм. Красная граница фундаментального поглощения составляет 0,1 - 0,2 мкм, так как ширина запрещенной зоны у диэлектриков велика. Значения коэффициента отражения и показателя поглощения у диэлектриков существенно ниже, чем у металлов. Для прозрачных на соответствующей частоте излучения материалов большое значение имеет поглощение на различных примесях и неоднородностях твердого тела. К поглощению может привести и наличие поверхностных загрязнений и радикалов ОН.

Специфическими механизмами поглощения света прозрачными материалами могут быть многофотонное поглощение, самофокусировка лазерного излучения, вынужденное рассеяние Мандельштамма - Бриллюэна.

В диэлектриках поглощение излучения во многих случаях можно считать объемным, так как характерная длина ослабления может быть значительно больше толщины скин-слоя. Значения коэффициента поглощения излучения диэлектриками в зависимости от длины волны и природы материала могут меняться в очень широких пределах - от 10 до 10^5 см^{-1} .

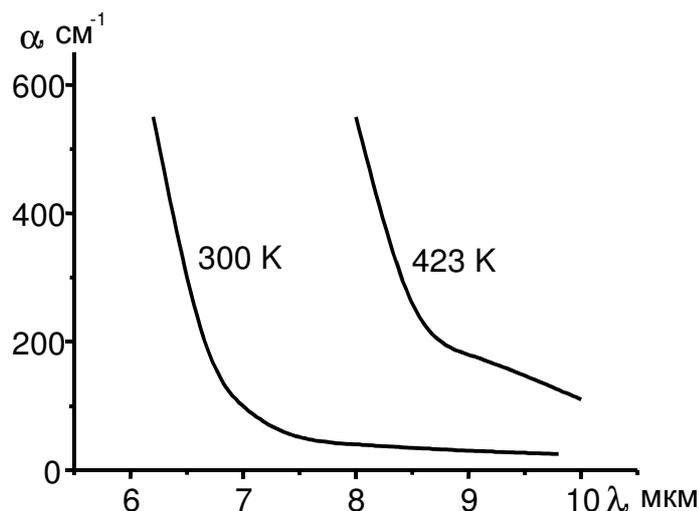


Рис.2.2. Зависимость коэффициента поглощения полупроводника от длины волны излучения

В полупроводниковых материалах механизм поглощения определяется соотношением между шириной запрещённой зоны ΔE и энергией кванта лазерного излучения $h\nu$. В зависимости от длины волны падающего света различают следующие случаи. Сильно поглощают полупроводники, для которых $h\nu > \Delta E$, т.е. в области $\lambda < \lambda_0$ (рис.2.2), а λ_0 определяется:

$$\lambda_0 = \frac{h \cdot c}{\Delta E}, \quad (2.3)$$

где c - скорость света в материале; ΔE - ширина запрещенной зоны.

В этой области наблюдается фундаментальное поглощение, когда падающие фотоны обладают достаточной энергией для возбуждения электронов, способных пересечь запрещённую зону. Начальный этап этого процесса, связанный с переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости (внутренний фотоэффект), когда концентрация свободных фотоэлектронов ещё мала, протекает при холодной решётке. Увеличение концентрации фотоэлектронов сверх некоторого значения ($\geq 10^{20} \text{ см}^{-3}$) приводит к существенному поглощению излучения электронами проводимости, при котором даже тонкие слои становятся непрозрачными. Показатель поглощения достигает значений порядка $10^4 - 10^5 \text{ см}^{-1}$. Коэффициент отражения также возрастает и приближается к значениям,

характерным для металлов (0,7 – 0,9). Такой эффект иногда называют металлизацией полупроводника.

В области $\lambda > \lambda_0$ ($h\nu < \Delta E$) имеет место примесное поглощение, вызванное переходами электронов между примесными уровнями и зоной проводимости или валентной зоной. Это один из основных механизмов поглощения инфракрасного излучения полупроводниками. Коэффициент примесного поглощения при значениях концентрации примеси $10^{15} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ составляет $0,1 - 100 \text{ см}^{-1}$. Необходимо отметить, что примесное поглощение в чистом виде можно наблюдать лишь при низких температурах, так как уже при комнатной температуре примесь, как правило, полностью ионизирована, и поглощение света осуществляется свободными носителями заряда.

2.1.2. Нагревание материала без плавления

В результате перехода энергии света в тепло начинается нагревание материала. Перенос тепла в твердом теле осуществляется путем теплопроводности, причем для металлов и вырожденных полупроводников наиболее существенной является электронная теплопроводность, а для невырожденных полупроводников и диэлектриков - фононная.

Размер прогретой области сначала определяется глубиной проникновения излучения в твердое тело и растет во времени за счет теплопроводности пропорционально $\sqrt{a \cdot t}$ (a - коэффициент температуропроводности).

Повышение температуры материала может сопровождаться изменением его оптических и теплофизических свойств, тепловым расширением и фазовыми переходами первого и второго рода. Нагревание также активизирует диффузионные процессы в твердом теле и химические реакции на его поверхности и в приповерхностных слоях.

Количественные характеристики процесса нагревания, такие как распределение температуры в твердом теле, глубина прогретого слоя и другие, могут быть найдены из решения уравнения теплопроводности, которое в общем виде может быть записано следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \cdot \Delta T = \frac{f(x, y, z, t)}{\rho \cdot c}, \quad (2.4)$$

где T - температура в произвольной точке материала в момент времени t ; ρ - плотность, c - теплоемкость вещества; $f(x, y, z, t)$ - объемная плотность мощности источников тепла внутри твердого тела.

Решение уравнения (2.4) для полубезграничного образца и при условии, что поверхность материала освещается равномерно, а плотность поглощенного светового потока не меняется со временем, имеет вид:

$$T(x, t) = \frac{q}{2\alpha \cdot k} \left\{ \exp(-\alpha^2 \cdot a \cdot t) \left[\exp(-\alpha \cdot t) \cdot \Phi^* \left(\alpha \sqrt{a \cdot t} - \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} \right) + \exp(\alpha \cdot x) \cdot \Phi^* \left(\alpha \sqrt{a \cdot t} + \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} \right) \right] + \right.$$

$$+ 4\alpha\sqrt{a \cdot t} \cdot i\Phi^* \left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} \right) - 2 \exp(-\alpha \cdot x) \Big\}, \quad (2.5)$$

где k - теплопроводность материала; q - поглощенная единицей поверхности мощность;

$$\Phi^*(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty \exp(-\xi^2) d\xi \quad \text{и} \quad i\Phi^*(u) = \int_u^\infty \Phi^*(\xi) d\xi$$

- дополнительная функция интеграла вероятности и ее интеграл.

Для металлов, начиная с моментов времени $t \geq 10^{-10}$ с, тепловой источник, образующийся при выделении тепла внутри поглощающего слоя, можно считать поверхностным (так как $\delta = 1/\alpha \ll \sqrt{a \cdot t}$).

В этом случае из (2.5) следует, что

$$T(x, t) = \frac{2q\sqrt{a \cdot t}}{k} \cdot i\Phi^* \left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} \right); \quad (2.6)$$

$$T(0, t) = \frac{2q\sqrt{a \cdot t}}{\sqrt{\pi} \cdot k}, \quad (2.7)$$

т.е. распределение температуры в материале и ее изменение во времени определяются теплопроводностью среды.

Для многих неметаллов в течение значительной доли импульса может выполняться обратное соотношение ($\delta \gg \sqrt{a \cdot t}$), когда роль теплопроводности незначительна, и профиль температуры определяется непосредственным проникновением света в материал:

$$T(x, t) = \frac{q \cdot \alpha \cdot t}{\rho \cdot c} \exp(-\alpha \cdot x); \quad (2.8)$$

$$T_0(t) = \frac{q \cdot \alpha \cdot t}{\rho \cdot c}. \quad (2.9)$$

Обычно для обработки материалов используется острая фокусировка светового пучка ($r_0 \approx 10 - 20$ мкм); при этом $r_0 \ll \sqrt{a \cdot t}$, и значительную роль начинает играть теплоотвод в стороны от места воздействия излучения, что замедляет скорость нагревания материала.

В этом случае температура поверхности определяется выражением:

$$T(x, t) = \frac{2q\sqrt{a \cdot t}}{k} \left\{ i\Phi^* \left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} \right) - i\Phi^* \left(\frac{\sqrt{x^2 + r_0^2}}{2\sqrt{a \cdot t}} \right) \right\}. \quad (2.10)$$

В стационарном случае:

$$T_{ст}(x) = \frac{q}{k} \left(\sqrt{x^2 + r_0^2} - x \right). \quad (2.11)$$

Безынерционность процесса передачи энергии излучения материалу в сочетании с огромными плотностями мощности излучения q определяет высокие скорости нагрева в зоне действия лазерного излучения. Так, если плотность мощности излучения достигает величины 10^5 Вт/см², то скорость

нагрева материала может составлять 10^4 - 10^5 град/с. Выражение для оценки скорости изменения температуры на поверхности может быть получено из уравнения (2.8):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q}{\sqrt{\pi \cdot k}} \sqrt{\frac{a}{t}}. \quad (2.12)$$

В условиях достижения высоких температур в малом объёме материала, что характерно для многих случаев применения лазерного излучения, достигаются значительные скорости остывания (10^4 - 10^8 град/с). Высокие скорости нагрева и остывания в зоне действия лазерного излучения характерны для импульсного режима работы лазера: чем более короткий импульс излучения t , тем выше плотность мощности и меньше масса нагреваемого материала. Величины q и t определяют энергетический вклад лазерного излучения в технологические процессы:

$$E = P \cdot t = q \cdot S \cdot t, \quad (2.13)$$

где E - энергия поглощённого излучения; P - мощность поглощённого излучения; t - время действия излучения; q - плотность мощности излучения; S - площадь облучения.

Лазерный нагрев создает большие градиенты температуры, что используется для поверхностной закалки металла:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q}{k} \cdot \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} \right). \quad (2.14)$$

2.1.3. Нагрев с изменением фазового состояния

Многие виды лазерной обработки связаны с фазовыми переходами - плавлением и испарением. Как только температура поверхности достигнет точки плавления, возникает новый режим его нагревания.

В приближении линейной и одномерной модели можно оценить время t , необходимое для достижения температуры плавления на поверхности:

$$t = \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{\rho \cdot c \cdot T}{\alpha \cdot q} \right)^2. \quad (2.15)$$

Уравнение для расчёта критической плотности мощности лазера, требуемой для достижения на поверхности металла температуры плавления $T_{пл}$, можно определить из выражения (2.7) в предположении, что температура поверхности равна температуре плавления:

$$q_{0кр} = \frac{T_{пл} \sqrt{\pi \cdot k}}{2\sqrt{a \cdot t}}, \quad (2.16)$$

где a - коэффициент температуропроводности; t - длительность импульса; k - коэффициент теплопроводности.

Численные оценки $q_{0кр}$ для ряда материалов при $t=0,001$ с дают: Cu - 11000 Вт/см², Ni - 6500 Вт/см², Ti - 3000 Вт/см², W - 20000 Вт/см², Al - 4200 Вт/см². Коэффициент температуропроводности a вычисляется по формуле:

$$a = \frac{k}{c \cdot \rho}. \quad (2.17)$$

Глубина распространения температуры плавления приближённо определяется выражением:

$$h = \sqrt{4 \cdot a \cdot t}. \quad (2.18)$$

С момента достижения $T_{пл}$ часть тепловой энергии рассеивается на испарение. Плотность потока, при которой температура поверхности достигает точки испарения, можно определить из уравнения (2.16) при подстановке в него температуры испарения материала.

Лазерное излучение с критической плотностью, попадая на поверхность материала, нагревает его со скоростью, существенно превышающей скорость отвода теплоты за счёт теплопроводности, конвекции и обратного излучения. Начинается испарение, и на поверхности формируется лунка, которая развивается в глубь материала и приводит к образованию канала, заполненного парами материала. Одновременно с началом образования канала над поверхностью материала появляется светящийся факел, состоящий из продуктов испарения и выброса, а также частиц конденсированного пара. Этот факел снижает интенсивность излучения из-за поглощения и дефокусировки излучения. При соответствующей скорости перемещения луча канал приобретает динамическую устойчивость и распространяется в глубь материала. На передней стенке канала происходит плавление материала, а затем затвердевание. Наличие канала даёт возможность лазерному излучению проникать в материал на некоторую глубину. Подробнее закономерности этих процессов будут рассмотрены в следующих разделах.

Контрольные вопросы

1. Каким законом описывается поглощение лазерного излучения твердым телом?
2. Каков механизм поглощения электромагнитного излучения а) металлами, б) сильно легированными полупроводниками, в) слабо легированными полупроводниками, г) диэлектриками?
3. Сформулируйте условие зеркального отражения света от поверхности твердого тела.
4. Как влияет температура твердого тела на коэффициент поглощения излучения?
5. Как и почему меняется коэффициент поглощения при плавлении материала?
6. Какие факторы могут привести к поглощению излучения света материалами, прозрачными для данной длины волны?
7. Сформулируйте условие фундаментального поглощения в полупроводниках.
8. Поясните эффект "металлизации полупроводника" при поглощении излучения.

9. В каких материалах основной является электронная теплопроводность?
10. Чем определяется пространственное и временное распределение температуры в металле при лазерном нагреве?
11. Как связана скорость нагрева материала с его теплопроводностью?
12. От каких факторов зависит пространственный градиент температуры при лазерном нагреве?
13. Чем определяется критическая плотность мощности, необходимая для плавления или испарения материала?

2.2. ТЕРМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2.2.1. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

При реализации технологических процессов используются различные виды лазерных установок, но в любой из них можно выделить ряд типовых элементов. Типовая лазерная технологическая установка включает в себя следующие основные элементы (рис.2.3):

- 1) технологический лазер;
- 2) систему отклонения и фокусировки луча;
- 3) систему наблюдения;
- 4) оснастку для крепления и перемещения детали;
- 5) средства контроля за параметрами процесса.

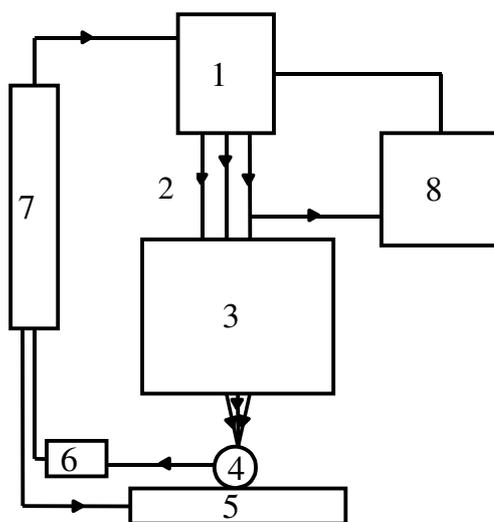


Рис. 2.3. Структурная схема лазерной технологической установки:
 1-технологический лазер; 2-лазерное излучение; 3-оптическая система; 4-обрабатываемая деталь; 5-устройство для закрепления и перемещения детали; 6-датчики параметров технологического процесса; 7-программное устройство; 8-датчики параметров излучения

В зависимости от параметров технологического процесса в качестве технологического лазера могут использоваться твердотельные или газовые лазеры. Рассмотрим подробнее основные элементы лазерной технологической установки на примере импульсного твердотельного технологического лазера (рис.2.4.).

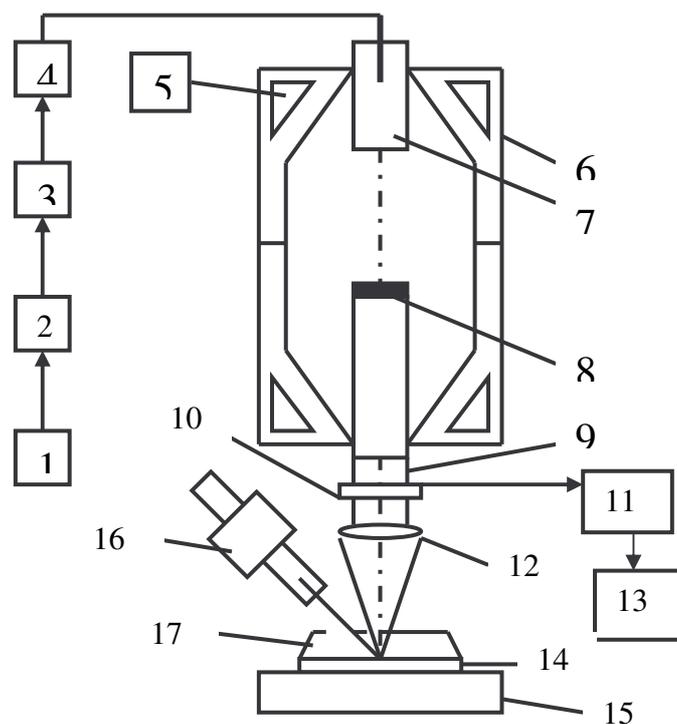


Рис. 2.4. Структурная схема технологической установки с твердотельным лазером: 1 - выпрямитель; 2 - емкостный накопитель; 3 - блок управления; 4 - программное устройство; 5 - система охлаждения; 6 - корпус с внутренним отражателем; 7 - лампа накачки; 8 - активный элемент; 9 - поток излучения; 10 - преобразователь; 11 - блок измерений параметров излучения; 12 - объектив; 13 - блок подачи технологической среды; 14 - образец; 15 - координатный стол; 16 - микроскоп; 17 - система формирования потока технологической среды

Через выпрямитель до напряжения в единицы киловольт вначале заряжается емкостный накопитель. Затем накопленная в батарее конденсаторов энергия передается через блок поджига на импульсный осветитель излучателя лазера, который в рассматриваемой схеме смонтирован в верхней части корпуса по его оси. Внутренняя поверхность корпуса выполняет функции эффективного светового отражателя.

Для отвода теплоты от элементов генератора часто в конструкциях предусматривается система охлаждения. В нижней части корпуса соосно с цилиндрическим осветителем смонтирован активный твердотельный цилиндрический элемент. При генерации импульса световой поток монохроматического излучения выходит из его торца через полупрозрачное зеркало.

Параметры потока контролируются преобразователями с выводом информации на измерительный блок. Световой поток можно сфокусировать оптической системой в пятно необходимого диаметра на поверхности обрабатываемого материала. С помощью микроскопа и системы дополнительной подсветки оператор имеет возможность контролировать визуально зону обработки. Обрабатываемый материал закрепляют на столе для перемещения образца по трем координатам. Если необходима подача в

зону обработки технологической среды (например, поддув кислорода при резке), то используют систему формирования ее потока. Параметры технологического процесса могут контролироваться автоматически с помощью устройства слежения за зоной обработки.

Срок службы технологических лазеров до замены активного элемента зависит от длительности работы осветителя излучателя лазера. Увеличение эффективности концентрации излучения на активном элементе позволяет работать при меньших электрических нагрузках осветителя, что увеличивает срок службы установки. Наиболее широкое распространение в установках с активными твердотельными элементами получили импульсные ксеноновые лампы накачки, срок службы которых от сотен тысяч до 2,5 млн вспышек. При эксплуатации вследствие «старения» ламп интенсивность светового потока уменьшается, поэтому приходится постепенно повышать рабочее напряжение для сохранения выходных параметров генератора.

Для изменения пространственно-временных и энергетических характеристик лазерного луча применяют различные устройства управления им. Отклонение луча на необходимые углы осуществляется с помощью зеркал и призм. Если требуется быстрое отклонение луча, то механические системы колебаний и вращения зеркал и призм могут вследствие их инерционности ограничивать технологические процессы, например сканирование по построчному растрю. Тогда можно использовать малоинерционные электрооптические и магнитооптические элементы или специальные электромеханические системы с приводом от вибраторов, например, на пьезоэлементах.

В лазерных процессах требуется управлять мощностью и энергией лазерного излучения. Плавную регулировку мощности от порогового значения до максимального можно выполнять, изменяя мощность накачки. Для быстрой модуляции интенсивности излучения применяют ячейку Погкельса, содержащую одноосный кристалл, превращающийся в двуосный после приложения к нему электрического поля. Во многих лазерах ослабление интенсивности излучения достигают с помощью дополнительных поглощающих фильтров, вводимых по пути распространения потока, электрооптических модуляторов или вращающихся секторов, прерывающих поток на определенное время (достигаемое ослабление порядка 10^3).

Большинство технологических процессов требуют изменения начального диаметра пучка D_0 . С целью увеличения плотности лучистого потока его фокусируют оптическими системами, при этом в результате фокусировки диаметр луча

$$D_{\phi} = f \cdot \operatorname{tg}\theta \approx f \cdot \theta \approx \frac{4\lambda \cdot f}{\pi \cdot D_0}, \quad (2.19)$$

где f - фокусное расстояние оптической системы.

Вследствие волновой природы света даже сфокусированное до минимальных размеров изображение занимает конечный объем. Кроме того, изображение будет увеличено из-за aberrаций оптической системы.

Следовательно, сфокусированное изображение несколько увеличивается как в диаметре, так и вдоль оси распространения пучка. Последнее характеризуют глубиной фокуса d :

$$d = \left(\frac{8\lambda}{\pi} \right) \left(\frac{f}{D_0} \right)^2. \quad (2.20)$$

На значение диаметра D_Φ влияет модовый состав излучения, для многомодового излучения наблюдается увеличение D_Φ .

В технологических установках с целью уменьшения диаметра сфокусированного лазерного пятна часто необходимо использовать малые фокусные расстояния f . При этом необходимо принимать меры к защите линз от продуктов выброса из зоны обработки, а малая глубина фокуса d в таких системах затрудняет проведение стабильного и воспроизводимого процесса.

2.2.2. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ЗАКАЛКА

Лазерная закалка без плавления поверхностного слоя

Одним из перспективных процессов лазерной технологии является упрочнение поверхности конструкционных материалов и деталей различных механизмов и машин. Поверхностное упрочнение стали может быть достигнуто нагреванием до температуры, при которой происходит аустенизация, то есть образование твердого раствора карбида железа в γ -Fe. Последующее быстрое охлаждение приводит к переходу к мартенситной структуре, при которой карбид железа сохраняется в растворе в α -Fe. Эта фаза характеризуется повышенной твердостью. Требуемые для упрочнения скорости нагрева и охлаждения и толщины упрочненного слоя легко достигаются при лазерном нагреве быстро сканируемым расфокусированным лазерным лучом. Интенсивность излучения и скорость сканирования выбираются с учетом прогрева материала на нужную глубину, которая обычно не превышает 0,5 мм. После прекращения действия излучения происходит естественное охлаждение за счет теплопроводности. Скорости нагрева и охлаждения при этом составляют 10^4 град/с. Типичное значение плотности мощности при нагреве порядка 10^4 Вт/см² при диаметре пучка 1 см. Поэтому термическую обработку больших поверхностей проводят киловаттными лазерами на углекислом газе. Скорость сканирования определяется толщиной слоя упрочнения и площадью сечения пучка и составляет 1 - 10 см/с. Для предварительного расчета параметров прогретой зоны при упрочнении могут быть использованы уравнения, приведенные в разделе 2.1.

Высокая отражательная способность большинства металлов на длине волны 10,6 мкм приводит к необходимости покрывать поверхность металла поглощающими излучение соединениями. Примерами таких материалов могут быть коллоидный графит, оксид марганца, оксид меди и другие. При этом энергетический КПД процесса возрастает в 2 - 3 раза.

Для металлов при длительности импульса 1 мс глубина зоны закалки - всего несколько десятых долей миллиметра. Ещё меньше глубина получается

при действии излучения лазеров с модулированной добротностью - единицы и доли микрометра, зато микротвёрдость обработанной зоны выше, чем при обработке излучением в режиме свободной генерации. По радиусу зоны воздействия глубина зоны закалки распределена неравномерно - в центре пятна нагрева она наиболее велика и уменьшается до нуля за пределами пятна нагрева, несколько превышая его по размерам. Лазерное излучение может быть с высокой точностью сфокусировано на небольшом участке поверхности детали, изнашивающейся, например, в результате трения. Локальная закалка позволяет уменьшить деформацию изделий после воздействия, сократить и даже исключить финишную обработку поверхностей. Для импульсной лазерной закалки серийно выпускаются установка "Квант-16", в которой в качестве активной среды используется стекло, легированное неодимом. Её основные параметры: энергия в импульсе до 30 Дж, длительность импульса 4 - 7 мс, частота следования импульсов 0,5 Гц, оптическая система позволяет получать размеры пятен нагрева до 2-5 мм. При лазерной закалке практически отсутствует разница в результатах упрочнения при обработке в средах аргона, азота при атмосферном давлении или в условиях вакуума. Для лазерной закалки непрерывным излучением обычно используют СО₂-лазеры, а также в ряде случаев - лазеры на алюмоиттриевом гранате (АИГ).

Лазерное упрочнение имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной технологией. К ним относятся:

- 1) минимальные механические искажения из-за поступления тепла в небольших количествах;
- 2) возможность упрочнения деталей, имеющих малую толщину или диаметр;
- 3) локальность обработки;
- 4) возможность обработки внутренних поверхностей, простота регулирования площади нагрева;
- 5) простота получения узких упрочнённых зон;
- 6) отсутствие загрязнения окружающей среды;
- 7) возможность применения к сложным профилям, например, к зубьям шестерён;
- 8) высокая производительность и экономичность процесса;
- 9) возможность полной автоматизации процесса, в том числе при получении упрочнённых зон сложного профиля.

При упрочнении сталей микротвёрдость поверхности увеличивается в 3 - 5 раз при глубине порядка 0,5 мм.

Для многих металлов при нагреве и последующей закалке упрочнение поверхности не достигается без формирования специального покрытия. В этом случае в технике используются процессы азотирования, карбидирования, силицирования и другие. Лазерная технология реализации такого рода процессов отличается указанными выше преимуществами и позволяет получать упрочняющие покрытия на различных металлах. В качестве примера можно привести процесс создания слоя нитрида титана на поверхности титана.

Термическая лазерная обработка может быть использована и для металлизации поверхности. На поверхность, содержащую окислы металлов, направляется лазерное излучение. Под действием луча происходит реакция восстановления и выделение чистого металла. Лазерным лучом можно сформировать на поверхности любой рисунок. Этот метод используется в промышленности для изготовления сопротивлений, индуктивностей, конденсаторов, микросхем.

Упрочнение и легирование при плавлении поверхностных слоев

При достаточно больших плотностях мощности сканирующий лазерный луч можно использовать для плавления тонких поверхностных слоев металла. Возникающий расплав быстро охлаждается из-за отвода тепла в массу материала. При достаточно высоких скоростях охлаждения возможно образование различных метастабильных фаз с полезными свойствами. Застывающий расплав имеет высокую степень гомогенизации, мелкокристаллическую структуру, а в ряде случаев происходит аморфизация поверхности металла. Такие поверхностные слои обычно имеют высокую микротвердость, коррозионную устойчивость.

Поверхностное плавление используется также для легирования поверхностных слоев подложки и плакирования материала. Легирование тонкого поверхностного слоя расплава, созданного воздействием импульсного или непрерывного излучения, используют как метод повышения микротвёрдости, а также для получения локального участка с повышенными антикоррозионными свойствами. Например, для легирования стали Ст45 на её поверхность наносится тонкий слой микропорошка легирующего металла и жидкого стекла, используемого как связующее вещество. В состав микропорошка входят С, Мn, Со, Cr, Nb, Ni, Мо. Химический состав стали после лазерной обработки изменяется, что обуславливает изменение микротвёрдости, которая выше, чем твёрдость Ст45, облучённой на воздухе без легирования. Глубину проплавления и степень перемешивания расплавов покрытия и основного металла регулируют, управляя скоростью перемещения луча.

Таким образом, лазерные технологии с плавлением поверхностного слоя успешно используются для создания износоустойчивых покрытий на режущем инструменте, лопатках турбин, рабочих поверхностях валов; для создания антикоррозионных покрытий; для легирования поверхностного слоя; для изменения электрических и магнитных свойств твердых тел.

Одним из примеров эффективного использования лазерных технологий является балансировка. Обычно при балансировке проводят определение более тяжелой области в быстро вращающейся детали, последующее извлечение ее из зажимного устройства в испытательном стенде, удаление части материала сверлением или другим механическим способом, повторное закрепление детали на стенде, новое раскручивание детали и так далее. Лазерные методы позволяют проводить быструю балансировку детали непосредственно в процессе ее вращения. Импульс лазера испаряет

небольшие дозы металла (0,001 г/импульс). Поджиг лазера синхронизируется с моментом регистрации избыточной массы. В данном случае нужны лазеры с длительностью импульса порядка микросекунд. При таких длительностях можно балансировать роторы со скоростями вращения до 24000 об/мин.

2.2.3 ЛАЗЕРНАЯ ПАЙКА

Процессы пайки широко используются в технологии современного производства. По оценкам экспертов доля соединений, полученных пайкой, в таких отраслях промышленности, как электронная, радио- и приборостроительная, составляет 40-60 %. Пайкой называют образование соединения с межатомными связями путём нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивание их припоем (при котором происходит физико-химическое взаимодействие расплавленного припоя с материалом, проявляющееся в растекании припоя или образовании мениска с конечным краевым углом смачивания), затекание припоя в зазор и последующая его кристаллизация. Для того, чтобы при пайке образовывалось достаточно прочное соединение, припой должен смочить соединяемые поверхности. Смачивание твёрдого материала жидким припоем определяется наличием окисных плёнок на границе раздела твёрдый материал - жидкий припой и степенью физико-химического взаимодействия паяемого материала и припоя. Можно выделить три способа активировки смачивания:

- 1) уменьшение поверхностного натяжения жидкого припоя на границе с твёрдым паяемым материалом;
- 2) увеличение поверхностного натяжения твёрдого паяемого материала;
- 3) уменьшение поверхностного натяжения жидкого припоя на границе с газовой средой.

Требования, предъявляемые к поверхностям в рамках пайки традиционными способами, остаются в силе и для лазерной пайки. Отличия связаны со специфическими свойствами лазерного излучения как источника нагрева. Для традиционных способов пайки увеличение шероховатости поверхности в определённых пределах повышает качество соединения. При лазерном нагреве наличие шероховатости нужно учитывать в двух аспектах. С одной стороны, фактическое увеличение площади поверхности уменьшает величину реальной плотности мощности, действующей на образец. С другой, когда длина волны падающего излучения соизмерима с величиной микронеровностей, можно отметить увеличение коэффициента поглощения излучения вследствие многократных отражений на шероховатостях. При лазерной пайке, так же как и при обычной, проводят предварительную очистку поверхности, защиту её специальными покрытиями, предотвращающими окисление, используют флюсы, производят поверхностное оплавление покрытия или осуществляют процесс в восстановительной атмосфере.

Лазерная пайка в производстве изделий электронной техники

Для пайки используются лазеры, работающие в режиме свободной генерации. Широко применяются как моноимпульсный, так и импульсно-периодический режимы. Достоинства импульсного режима: точное, прецизионное дозирование энергетического вклада, высокая воспроизводимость технологических параметров, малое время формирования паяного соединения. Высокие значения плотности энергии и плотности мощности излучения позволяют проводить пайку припоями, имеющими высокие (свыше 1000 °С) температуры плавления. Хотя размеры соединения, формируемого за время действия одного импульса излучения, невелики (порядка единиц миллиметра), лазерное импульсное излучение успешно применяется для выполнения протяженных соединений. Для пайки применяют также лазеры, работающие в режиме модулированной добротности. Непрерывный режим позволяет реализовать пайку с мягким нагревом, с выравниванием температуры в зоне пайки. В процессах пайки, как правило, используются лазеры, работающие на длине волны $\lambda=1,06$ мкм. Это связано с распространенностью твердотельных лазеров и простотой управления их энергетическими и оптическими характеристиками. Основные применения пайки в электронной промышленности:

- 1) пайка электрических проводников к поверхности;
- 2) пайка электродной фольги с выводами электролитических конденсаторов;
- 3) пайка плакирующего материала с подложкой;
- 4) пайка выводов к видеоголовкам;
- 5) пайка электронных ЧИПов к контактам;
- 6) соединения типа трубка-лента (рис.2.5);
- 7) пайка конденсаторов и резисторов на контактных площадках микрополосовой линии подложки;
- 8) пайка электрических выводов к тонкоплёночным системам;
- 9) пайка электрических выводов ИС к проводнику;
- 10) пайка проводников с плёнкой на подложке;
- 11) соединение полублоков магнитных головок;
- 12) соединение ИС с печатной платой;
- 13) герметизация малогабаритного корпуса ПП прибора с крышкой;
- 14) соединение нитей (вольфрам) с проволокой (молибден).

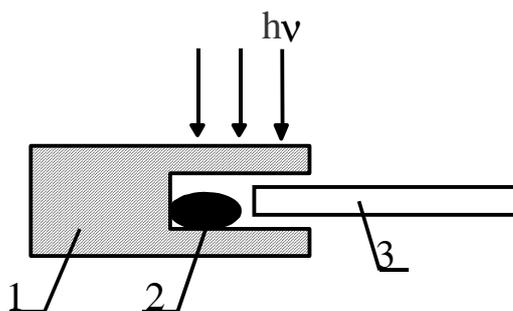


Рис.2.5. Лазерная пайка: 1 - трубка с глухим отверстием, 2 - припой, 3 - лента

Достоинства лазерной пайки: бесконтактность, высокая степень локальности, точность энергозатрат, высокая скорость нагрева, недостижимая в традиционных способах нагрева, пайка в труднодоступных местах, возможность механизации и автоматизации процесса. Лазерная пайка позволяет избежать перегрева радиодеталей при монтаже.

2.2.4 ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

Одним из наиболее широко распространённых лазерных технологических процессов в производстве является сварка. Сварка предназначена для получения неразъёмных соединений и осуществляется локальным приложением различных видов энергии: электрической, механической, химической и др.

Лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, существенно превосходящую другие источники энергии, используемые для сварки. Источником нагрева служит сконцентрированный поток излучения квантового генератора. В результате плавления и кристаллизации возникает прочное сцепление (сварной шов), основанное на межатомном взаимодействии. По совокупности технологических и энергетических признаков лазерная сварка разделяется на:

- непрерывную с глубоким проплавлением;
- импульсно-периодическую с глубоким проплавлением;
- непрерывную лазерную сварку малых толщин;
- импульсную лазерную сварку малых толщин.

Сварку делят на непрерывную и импульсную по характеру изменения мощности во времени.

Некоторые параметры сварки ряда металлов мощными (до 20 кВт) лазерами приведены в табл. 2.2.

Таблица.2.2.

Параметры сварки мощными лазерами.

Материал	Толщина, мм	Мощность, кВт	Скорость сварки, см/с
Низкоуглеродистая сталь	3	15	17
	9,5	14	3,18
Нержавеющая сталь	3,2	14	16,95
	17,8	17	1,06
Высокопрочная сталь	12,7	15	1,27
Инконель	5	14	4,23
Никель-медный сплав	6,3	10,2	5,9
	11,9	14,5	2,12

Режим сварки и параметры сварного шва зависят от плотности мощности лазерного излучения. При плотностях мощности, недостаточных для интенсивного испарения, зона проплавления имеет форму, близкую к сферической. При интенсивном испарении металла происходит прогиб сварочной зоны, и область проплавления становится конической. При

дальнейшем увеличении плотности мощности в центре светового пятна в сварочной ванне образуется узкое глубокое отверстие. После прекращения действия импульса это отверстие заполняется металлом, расплавленным в периферийной зоне светового пятна. Таким образом, широкий диапазон энергетических характеристик лазерного излучения позволяет осуществлять сварку с использованием различных механизмов проплавления, выбор которых определяется свойствами свариваемых материалов и требованиями к параметрам шва.

Лазерная сварка применима для соединения массивных деталей, деталей из листовых материалов, проволок, металлических и полимерных фольг и пленок и т.д.

Особенности сварки изделий электронной техники

Основные сложности, возникающие при сварке изделий электронной техники, связаны с применением в них широкого спектра материалов, резко отличающихся по своим оптическим и теплофизическим свойствам; с необходимостью проводить сварку деталей существенно разных толщин (от 20 мкм до 1,5 мм); с требованиями вакуумной плотности сварных швов, высокой чистоты и отсутствия окисления их поверхности; с недопустимостью перегрева изделий в целом и отдельных участков.

Точечной сваркой соединяют детали катодных и анодных узлов электронных пушек, изготовленные из молибдена, вольфрама, сплавов нихром, монель, константан. Точечной сваркой также соединяют проводники микронных толщин из Au, Cu, сплава 29НК с выводами и контактами из Ni, Cu, бронзы и т.д. С помощью шовной лазерной сварки проводят герметизацию оболочек ЭВП и корпусов модулей твердотельных приборов.

Рассмотрим особенности лазерной сварки на примере герметизации корпусов. Основным требованием при герметизации корпусов твердотельных приборов является предохранение рабочих элементов приборов и металлостеклянных вводов от перегрева. Использование импульсных лазеров позволяет разрешить этот вопрос без применения каких-либо специальных устройств для теплоотвода. С помощью хромель-копелевой термопары измеряли температуру металлостеклянных вводов в штырьковых корпусах интегральных схем при их герметизации на установке шовной лазерной сварки "Квант 17". Корпуса размерами 11×11 и 15×20 мм с суммарной толщиной отбортовки 0,4-0,6 мм заваривали импульсами излучения с плотностью мощности 10^4 Вт/см² при длительности 4 мс, частоте следования 10 Гц и диаметре светового пятна 0,7 мм. Во время заварки корпусов температура в зоне металлостеклянных спаев, расположенных на расстоянии 0,8-1,0 мм от свариваемой кромки, не превышает более чем на 8°С температуру в центре основания корпуса, которая равна 55°С.

Производительность точечной сварки (сварка проводов) примерно 60 операций в минуту. Скорость шовной сварки 100-200 мм в минуту. Очень выгодна возможность вести сварку деталей радиоламп через стеклянный баллон. Для импульсной лазерной точечной сварки разработан ряд

специализированных установок: СПС-10-1; "Квант-10"; "Квант-12" "Квант-17", параметры которых приведены в таблице 2.3. Их используют для соединения металлов в электровакуумных приборах, при герметизации металлических корпусов ИС. Универсальные модели СПС-10-1, "Квант-10", "Квант-12" на основе лазеров на стекле с неодимом обеспечивают глубину проплавления металлов 0,3 – 0,5 мм и диаметр зоны сварки 0,4 – 1,5 мм при частоте следования импульсов 0,5 - 1 Гц.

Таблица 2.3.

Промышленные лазерные установки для сварки и термообработки.

Установка	Вид	Мах.глуб пропл., мм	Диаметр сварн., мм	Произв., точ/мин изл.	Мах.энер., Вт	Длит.имп, мс	Частота повт. имп.,Гц
СПС-10-1	Точечная	0,3	0,4-1,5	30	8	2;4	0,1-0,5
Квант-10	Точечная	0,5	0,4-1,5	60	15(30)	4	0,1-1
Квант-12	Шовная	0,3	0,25-1	150	3	4	10
Квант-16	Точечная	0,7	0,4-1,4; 2-6	30	30	6-7	0,1-0,3
Квант-17	Шовная	0,15	0,5-0,8	500	4	4	10

Производительность двухлучевой установки шовной сварки "Квант-17"-до 500 мм/мин при глубине зоны сварки 0,15 мм. Дополнительное использование электрической дуги значительно повышает эффективность сварки и позволяет проводить её в условиях, в которых сварка только лазером невозможна.

Преимущества и особенности процесса лазерной сварки могут быть сформулированы следующим образом:

1. За счёт высокой концентрации энергии и малого пятна нагрева объём сварной ванны при лазерной сварке в несколько раз меньше чем при других видах. Этот фактор положительно сказывается на целом ряде характеристик сварного шва.
2. Отсутствие электрода или других элементов обычных сварочных устройств, близко расположенных к поверхности сварочной ванны, исключает попадание в неё инородных материалов, что практически во всех случаях наблюдается при дуговой сварке.
3. Острая фокусировка луча и возможность передачи его на значительные расстояния позволяет осуществлять сварку в труднодоступных местах (углублениях, внутренних полостях и др.).
4. Размер сварной точки при лазерной сварке существенно меньше, чем при контактной, что даёт возможность соединять миниатюрные детали.
5. Отсутствует механическое давление при получении сварного соединения, что позволяет соединять хрупкие и легкодеформируемые детали.
6. Время получения одной точки при лазерной сварке составляет 0,01-0,001 с, тогда как при контактной сварке оно равно 0,5-1 с, т.е. производительность лазерного луча в сотни раз выше.

7. Возможность сварки материалов с резко отличающимися физическими свойствами и в первую очередь электрическим сопротивлением. Кроме того, возможно, использовать лазерный луч, генерируемый из одного источника, на нескольких рабочих местах за счёт его отклонения и расщепления. На рис.2.6 показан пример использования непрерывно генерируемого луча на двух рабочих местах.

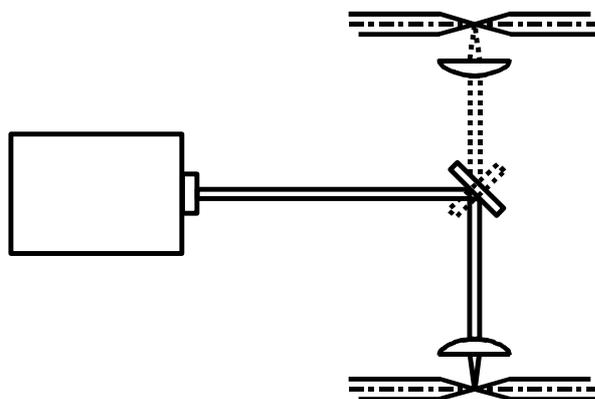


Рис.2.6. Схема использования одного лазера для сварки на двух рабочих местах

Лазерная сварка имеет и некоторые особенности, затрудняющие её универсальное применение:

1. Высокая стоимость лазерного оборудования и оснастки. Цена его значительно превышает стоимость, например, дуговых источников нагрева.
2. Лазерную сварку отличает невысокая энергетическая эффективность, так как КПД лазерных установок редко превышает 10 %.

Наконец, существует целый ряд традиционных методов сварки, способных удовлетворить большинству технических требований, которые предъявляются к процессу сварки. Главная достоинство традиционных методов это отработанность и внедренность. Эти особенности ограничивают применение лазерной сварки такими специальными случаями, когда использование традиционных методов сопряжено с определёнными трудностями или не обеспечивает необходимого результата.

2.2.5 ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА

Резка относится к числу первых технологических применений лазерного излучения, апробированных ещё в начале 70-х годов. При резке обычно лазерное излучение фокусируется в круглое пятно радиусом r , которое перемещается по поверхности материала со скоростью v . Если скорость движения пятна меньше скорости установления стационарной температуры, то режим резки считается медленным, а максимальное значение температуры достигается в центре пятна и определяется уравнением для неподвижного теплового источника:

$$T \approx \frac{qr}{k} \left(1 - \frac{vr}{4a} \right) + T_H, \quad (2.21)$$

где a - коэффициент температуропроводности; T_H - начальная температура материала; q - поверхностная плотность мощности.

Лазерная резка большинства металлов и полупроводников ($a = 0,1 - 1 \text{ см}^2/\text{с}$) при скорости резания до 1 см/с соответствует условию медленного движения источника тепла. При этом температуру в центре зоны облучения можно оценить по уравнению:

$$T \approx \frac{qr^2}{2kh} \ln \frac{2,25a}{rv} + T_H, \quad (2.22)$$

где h - толщина обрабатываемого материала.

Из формулы (2.22) видно, что плотность потока, необходимая для достижения заданной температуры, линейно растет с толщиной пластины.

Для сред с малой температуропроводностью (диэлектрики, металлические пленки на диэлектрических подложках) часто проявляется приближение быстродвижущегося теплового источника. Максимум температуры в этом случае сдвигается к краю движущегося пятна, и справедлива формула:

$$T \approx 1,6 \frac{q}{k} \sqrt{\frac{ar}{v}} + T_H. \quad (2.23)$$

При этом максимальная температура материала равна температуре поверхности при времени действия источника тепла, равном времени прохождения световым пятном своего диаметра.

Созданы лазерные установки с широким диапазоном мощности от нескольких десятков ватт до нескольких десятков киловатт, обеспечивающие эффективную резку металлов с использованием вспомогательного газа, поступающего в зону обработки одновременно с излучением лазера. Лазерное излучение нагревает, плавит и испаряет материал по линии предполагаемого реза, а поток вспомогательного газа удаляет продукты разрушения. Данный способ разделения металлов известен под названием газолазерной резки (ГЛР). Газовый поток не только транспортирует продукты разрушения. При использовании кислорода или воздуха при резке металлов на поверхности разрушения образуется окисная плёнка, повышающая поглощательную способность материала, а в результате экзотермической реакции выделяется достаточно большое количество тепла. Для резки металлов применяются технологические установки на основе твердотельных и газовых CO_2 -лазеров, работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах излучения. Применение лазеров для резки металлов, так же как и неметаллов, обусловлено следующими преимуществами по сравнению с традиционными методами: обширным классом разрезаемых материалов; возможностью получения тонких разрезов благодаря острой фокусировке лазерного луча; малой зоной термического влияния излучения; минимальным механическим воздействием,

оказываемым на материал; очень высокой производительностью процесса; возможностью автоматизации процесса резки и резки по сложному профилю в двух и даже трёх измерениях.

Схема установки газолазерной резки приведена на рис. 2.7.

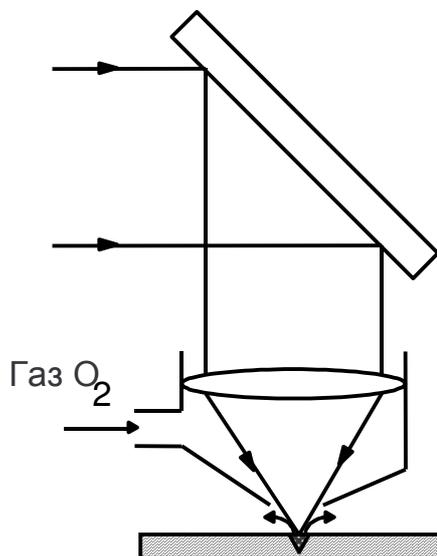


Рис.2.7. Схема резака для газолазерной резки

В большинстве случаев резка осуществляется CO₂-лазером непрерывного действия, несмотря на высокую отражательную способность металлов в ИК-области. Высокая отражательная способность является проблемой лишь для чистых металлических поверхностей при комнатной температуре, т. к. коэффициент отражения R уменьшается с ростом температуры и при окислении. Кроме того, с началом разрушения поверхности R падает практически до нуля.

Хотя на практике R не столь велик, как в теории, для резки металлов требуются большие средние мощности, наиболее легко получаемые при использовании непрерывного CO₂-лазера. Скорость резки металлов толщиной порядка одного миллиметра обычно составляет 0,5 - 5 см/с, ширина реза 0,5 - 1 мм. С увеличением толщины материала качество реза ухудшается. Так, при резке листа толщиной 10 мм, рез со стороны луча получается ровный, шириной около 1 мм, а на выходе кромка оплавлена, и ширина реза достигает 3 мм.

Для резки неметаллических материалов (бумага, стекло, кварц, фанера, полимеры, кожа) используются также CO₂-лазеры непрерывного действия, только меньшей мощности (≈ 500 Вт). Так как теплопроводность электрически непроводящего материала сравнительно невелика, скорость процесса определяется в основном теплотой испарения его. Для оценки максимальной скорости резания диэлектрических материалов можно использовать уравнение:

$$P = \Theta \cdot W \cdot L \cdot v , \quad (2.24.)$$

где Θ - энергия испарения, кДж/см³; W - ширина реза; L - толщина листа материала; v - скорость резания, см/с; P - мощность лазера.

Скорости резания тонких полимерных пленок могут достигать 10 м/с. Для ряда материалов испарение не является основным механизмом процесса. Важным фактором может быть выдувание мелкодисперсных и капельных фракций.

Для разделения хрупких диэлектрических материалов обычно используется метод создания термонапряжений. Этот метод более экономичен, чем газолазерная резка. Создание термических напряжений в материале приводит к образованию трещин заданной глубины или полному разрушению его в зоне воздействия излучения. В первом случае разделение производится механическим разламыванием по заданной трещине (скрайбирование). Методом создания термонапряжений режут стекло, ситалл, кварц, некоторые виды керамики, сапфир, ферриты и другие материалы.

2.2.6. ПРОШИВКА ОТВЕРСТИЙ

Применение лазеров для сверления отверстий в металле весьма целесообразно и экономически оправдано во многих случаях: получение особо малых отверстий, сопел, апертур для электронно-лучевых приборов. Лазеры позволяют получать отверстия диаметром от 0,005 до 5 мм и глубиной от 0,5 до 10 мм. Отверстия диаметром 0,1-1 мм 3-4-го классов точности образуются при воздействии одиночных миллисекундных импульсов энергией в несколько джоулей. Более высокая точность обработки достигается при кратковременном воздействии слабыми кратковременными импульсами с энергией 0,1 Дж. Использование лазера в качестве сверлящего инструмента даёт следующие преимущества:

- 1) отсутствует механический контакт между сверлящим инструментом и материалом, а также поломка и износ свёрл;
- 2) увеличивается точность размещения отверстия. Отверстия могут быть ориентированы в любом направлении;
- 3) достигается большое отношение глубины и диаметра сверления, чем это имеет место при других способах сверления;
- 4) возможность фокусировки лазерного излучения в пятно очень малых размеров позволяет получать отверстия малых диаметров;
- 5) высокая управляемость процессом сверления, совместимость с компьютерным управлением.

Лазерная технология пробивки отверстий применяется в случаях, когда применение обычных методов затруднено или невозможно, и является дополнением традиционных технологий. Так, нет никаких преимуществ в использовании лазера для создания отверстий диаметром более одного миллиметра в медной или стальной пластине. Но при сверлении отверстий диаметром 0,02 мм в фольге толщиной 0,02 мм они бесспорны.

Применение лазеров наиболее эффективно там, где обычная технология неприменима. Но лазеры могут эффективно конкурировать и с

имеющимися технологиями. Например, сверление отверстия в алмазных фильерах с помощью лазера осуществляется за 0,5 минуты, а электронным лучом - за 20 минут.

Геометрия отверстия существенно зависит от положения пятна относительно обрабатываемой поверхности. Отверстия имеют максимальную глубину и цилиндрическую форму при положении фокуса лазерного сфокусированного луча на поверхности обрабатываемого изделия. При мощности лазера 1000 Вт в материалах с высокой теплопроводностью (Ag, Cu) можно сверлить отверстие глубиной до 1 мм, а в некоторых других - глубиной до 16 см. Лазеры, применяемые для сверления отверстий в металле, должны обеспечивать в сфокусированном луче плотность мощности порядка $10^7 - 10^8$ Вт/см. Сверление отверстий сверлами диаметром меньше 0,25 мм является трудной задачей, в то время как лазерное сверление позволяет получать отверстия диаметром, соизмеримым с длиной волны излучения, с достаточно высокой точностью размещения.

Лазерное излучение с критической плотностью, попадая на поверхность материала, нагревает его со скоростью, существенно превышающей скорость отвода теплоты за счёт теплопроводности, конвекции и обратного излучения. Начинается испарение, и на поверхности формируется лунка, которая развивается в глубь материала и приводит к образованию канала, заполненного парами материала. Одновременно с началом образования канала над поверхностью материала появляется светящийся факел, состоящий из продуктов испарения и выброса, а также частиц конденсированного пара. Этот факел снижает интенсивность излучения, из-за поглощения и дефокусировки излучения. При соответствующей скорости перемещения луча канал приобретает динамическую устойчивость и распространяется в глубь материала. На передней стенке канала происходит плавление материала, а затем затвердевание. Наличие канала даёт возможность лазерному излучению проникать в материал на некоторую глубину.

В глубину отверстие растёт в основном за счёт испарения, а по диаметру за счёт плавления стенок и вытекания жидкости при создаваемом избыточном давлении паров. Согласно модели кинетики образования отверстия в непрозрачном материале, глубина h и диаметр отверстия D определяются по формулам:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\operatorname{tg} f}\right)^2 + \frac{3E}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 f \cdot L_0}} - \frac{r_0}{\operatorname{tg} f}, \quad (2.25)$$

$$r = \sqrt[3]{r_0^3 + \frac{3E \cdot \operatorname{tg} f}{\pi L_0}},$$

где r_0 - начальный радиус лунки; E - энергия излучения в импульсе; f - половинный угол раstra светового конуса; L_0 - удельная энергия испарения материала при $T=0$ К.

Из формул видно, что и глубина, и диаметр отверстия нелинейно зависят от энергии излучения. Так, при $D \gg 2r_0$ $h \sim E^{1/3}$ и $D \sim E^{1/3}$.

Параметр, характеризующий данный технологический процесс - это отношение h/D . Чем больше отношение, тем более эффективно используются возможности технологической установки. Чем меньше tgf , тем больше отношение глубины отверстия к его диаметру:

$$\frac{h}{D} = \frac{1}{2\text{tgf}} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3E\text{tgf}}{\pi r_0 L_0}}} \right], \quad (2.26)$$

поэтому для получения глубоких узких отверстий оптимальным является случай, когда tgf равен нулю. При этом:

$$h = \frac{E}{\pi r_0 L_0}; \quad D = D_0 = 2r_0; \quad \frac{h}{D} = \frac{E}{2\pi r_0 L_0}. \quad (2.27)$$

Обычно tgf отличен от нуля, поэтому существует предел в диаметре и глубине отверстия, выше которого будет недостаточно плотности излучения для испарения материала из-за расфокусировки:

$$D_{\text{ПР}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{E}{\pi Q_{\text{П}}}}; \quad h_{\text{ПР}} = \frac{\sqrt{\frac{E}{\pi Q_{\text{П}}} - r_0}}{\text{tgf}}, \quad (2.28)$$

где $Q_{\text{П}}$ - пороговая плотность энергии, соответствующая установлению процесса квазистационарного испарения.

В настоящее время для сверления отверстий используются в основном лазеры на АИГ. Они обеспечивают частоту следования импульсов до 1000 Гц и мощность в непрерывном режиме от 1 до 1000 Вт, в импульсном до сотен киловатт, а в режиме с модулированной добротностью до нескольких мегаватт. Другим широко применяемым для сверления лазером является CO_2 -лазер. Операции сверления и фрезирования, базирующиеся на серийных установках "Кристалл-6" и опытных установках "Кристалл-7", успешно применяются для сверления отверстий в керамических деталях электронных приборов и др. деталях. Обрабатываются отверстия диаметром 0,05-0,6 мм в деталях толщиной 0,5-8 мм. На базе опытных установок "Кристалл-16" разработана технология сверления точно координированных отверстий в цветоделительных масках электронно-лучевых приборов, что обеспечивает повышение производительности в 3 - 5 раз.

2.2.7. РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК

Испарение материалов эффективно применяется для размерной обработки тонкопленочных изделий. С развитием микроэлектроники значительно возрос интерес к методам высокоточной и производительной обработки пленок из различных материалов (в частности, металлических) толщиной 500—5000 Å на диэлектрических подложках.

При плотностях мощности порядка 10^8 Вт/см² и более в зоне обработки

температура возрастает со скоростью 10^{10} °C/с, а температурный градиент составляет 10^6 °C/см, т.е. сохраняется резкий высокотемпературный контур изображения. Уже после 5 нс после начала воздействия излучения на поверхности достигается температура испарения материала, а после 50 нс металл проплавляется на глубину до 2 мкм.

С целью эффективной обработки вначале выбирают лазер с большим поглощением его излучения материалами пленки, затем определяют оптимальный импульсный режим. Обычно для обработки пленочных металлических структур плотности энергии составляют 1-60 Дж/см² при длительностях импульсов 1-500 нс. Используя режимы одноимпульсного и многоимпульсного воздействия излучения твердотельного или газового лазера, обработку проводят проекционным, контурно-лучевым или контурно-проекционным методом.

При этом на обрабатываемых участках должна быть превзойдена пороговая плотность мощности:

$$q_{\text{п}} = \frac{L_0 \cdot d}{A \cdot \tau}, \quad (2.29)$$

где L_0 - энергия испарения единицы объема вещества пленки; d - толщина пленки; A - поглощающая способность; τ - длительность импульса.

Если мощность в импульсе W , то за один импульс можно удалить участок пленки площадью $S = W/q_{\text{п}}$, для ориентировочных оценок площади пользуются понятием о характерном диаметре круга обработки D_0 :

$$D_0 = 2\sqrt{A \cdot W / (\pi \cdot L_0 \cdot d)}, \quad (2.30)$$

где W - энергия импульса.

Например, чтобы обработать пленочный хромовый фотошаблон размером 40×40 мм с удалением 50% материала с его поверхности при толщине пленки 500 Å, при удельной энергии испарения хрома 50 кДж/см³ и поглощающей способности $A=0,5$ потребуется 10^5 импульсов излучения лазера на АИГ, с энергией в импульсе, равной $7 \cdot 10^3$ Дж и длительностью импульсов 8-15 нс при частоте их повторения 100 Гц, время обработки составляет 16-17 мин.

При контурно-лучевом методе, управляя движением луча по поверхности с помощью оптической системы, можно последовательно формировать элементы рисунка на плоскости заготовки. Этот метод достаточно широко используется для подгонки номиналов пассивных элементов тонкопленочных и гибридных интегральных микросхем (сопротивлений, конденсаторов), кварцевых резонаторов, локального легирования материалов, в частности, диодных матриц.

В проекционном методе обработки предусматривается предварительное изготовление маски в увеличенном масштабе с прозрачными участками, формирующими изображение объекта обработки. Например, для проведения процесса микрообработки испарением материалов лучом лазера на установке типа «Калан» предварительно изготавливают маску с максимальным размером 20×20 мм. Затем с помощью проекционной

оптической системы ее изображение в прошедшем световом потоке уменьшается в 10-40 раз. Минимальный размер элементов, обрабатываемых на пленках, 3-5 мкм. В установке «Калан» используется твердотельный лазер на стекле с неодимом. Энергия излучения равна 10 Дж при длительности импульсов $5 \cdot 10^{-7}$ с и частоте их повторения 6 имп./мин. На установке проекционной обработки изготавливают элементы микроэлектронных устройств и микрофотошаблоны, маркируют изделия и детали, печатают микротексты и микроизображения.

Чаще для формирования изображений в пленочных элементах применяют контурно-проекционный метод, являющийся комбинацией двух ранее рассмотренных. Элементы изображения здесь синтезируются из необходимого числа линий заданной длины и элементарных прямоугольников или кругов. На рис. 2.8 приведена схема лазерного генератора изображений, в котором используется принцип контурно-проекционной обработки.

В лазерной литографии на таком генераторе изображений обрабатываются пленки толщиной 200-2000 Å при плотности мощности, равной 10^6 - $2 \cdot 10^8$ Вт/см².

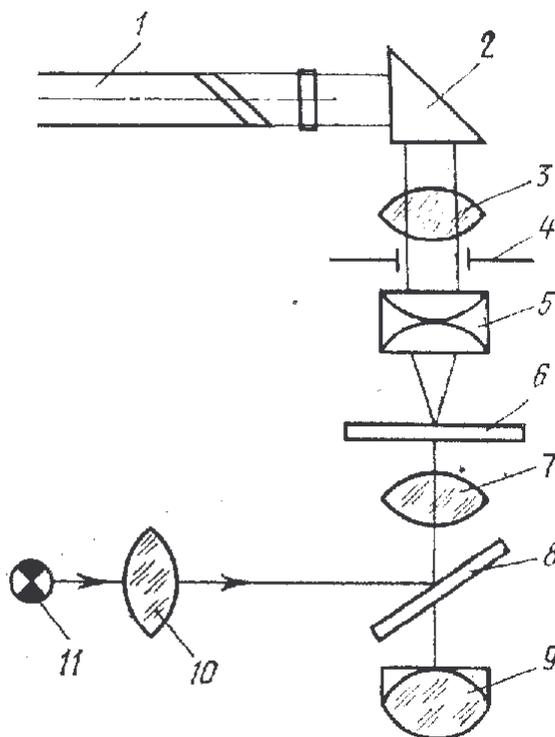


Рис. 2.8. Схема лазерного генератора изображений для контурно-проекционной обработки: 1- лазер; 2-призма; 3-конденсор; 4- регулируемая щель; 5, 7 - объектив; 6 - стол с образцом; 8 - полупрозрачное зеркало; 9-система контроля; 10- конденсор; 11-лампа

С помощью диафрагм формируются элементарные участки обработки - прямоугольники со сторонами от 5 до 35 мкм (на объекте обработки) или круги диаметрами от 1 до 45 мкм. Общий размер поля изображения составляет от 20 до 50 мм² скорость обработки-0,1 мм/с, погрешность

положения и размеров элементов $\pm 1,5$ мкм. Элементы можно контролировать с помощью оптической системы микроскопа с увеличением до 50^{\times} . Для пленок хрома и алюминия толщиной 500 Å минимальный размер элементов изображения 1,1-1,5 мкм.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные элементы лазерной технологической установки.
2. Какие типы лазеров чаще всего используются в качестве технологических?
3. Чем определяется минимальный диаметр сфокусированного лазерного луча?
4. В чем суть лазерного упрочнения металла без плавления поверхностного слоя?
5. Назовите основные преимущества лазерного упрочнения поверхности металла по сравнению с традиционными методами.
6. Как можно осуществить лазерную металлизацию поверхности?
7. Как можно провести процесс азотирования металла лазерным методом?
8. Какие эффекты возникают при плавлении и застывании тонкого поверхностного слоя?
9. Для каких целей может быть использовано поверхностное плавление при лазерном облучении?
10. Каковы преимущества лазерной балансировки быстро вращающихся деталей?
11. В чем преимущества лазерной пайки деталей?
12. Укажите основные области применения лазерной пайки в производстве изделий электронной техники.
13. Почему лазеры не используются при пайке электрических проводов?
14. Как классифицируются режимы лазерной сварки?
15. Назовите основные достоинства лазерной сварки.
16. Укажите основные направления использования лазерной сварки в производстве изделий электронной техники.
17. Каков механизм газолазерной резки материалов?
18. В чем преимущества лазерной резки материалов по сравнению с традиционными способами.
19. В чем суть метода резки материалов путем создания термонапряжений?
20. Назовите основные преимущества лазерного метода создания отверстий в материалах.
21. От чего зависит минимальный диаметр получаемого отверстия?
22. В чем суть лазерной размерной обработки материалов?
23. Приведите примеры процессов практического использования лазерной размерной обработки материалов.
24. Назовите методы лазерной размерной обработки материалов и проведите их сравнение.

2.3. ЛАЗЕРНЫЕ МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Ряд важных промышленных применений лазеров был продиктован нуждами микротехнологии. Преимуществами лазерной обработки в этой области являются:

- малая зона термического влияния;
- регулирование глубины обработки;
- быстрота выполнения;
- производство операций в любой части технологического цикла.

Ниже приведены некоторые примеры реализации технологических процессов в технологии микроэлектроники и электронной техники.

Очистка поверхности

Лазерный нагрев металлов начинается с поглощения излучения в тонком поверхностном слое (скин-слое). Быстрый рост температуры в этом слое может привести к выделению поглощенных поверхностью веществ без существенного нагрева всей массы материала. Поэтому лазерная десорбция является эффективным методом очистки поверхности. Такую очистку можно проводить в условиях высокого и сверхвысокого вакуума при введении лазерного излучения через оптические окна вакуумной установки. При этом резко повышается качество очистки, и сокращается время обработки. Так, при получении атомно чистой поверхности кремния время процесса сокращается от нескольких часов до нескольких секунд.

Лазерная доводка резисторов

Сопротивление плёночного резистора определяется формулой:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{h \cdot B}, \quad (2.31)$$

где ρ - удельное сопротивление материала плёнки; h - толщина плёнки; L - длина; B - ширина резистора.

Видно, что изменения R можно достичь, воздействуя на структуру плёнки, то есть меняя либо её удельное сопротивление ρ , либо её толщину h , либо конфигурацию или размеры резистора L и B .

Подстройка сопротивлений плёночных резисторов достигается испарением части резистивного слоя. При испарении материал можно удалить либо в виде серий отверстий, либо непрерывно в виде линий (рис.2.9).

Изменение сопротивления резистора в этом случае зависит от площади удалённой линии - длины и ширины прорези и её ориентации на резисторе. Наиболее употребительными формами резисторов являются прямоугольная и трапециевидная, а прорезей в них - X-рез (вдоль линий тока); Y-рез (поперёк линий тока); L-рез (комбинация X- и Y-резов).

Изменение сопротивления резистора в этом случае зависит от площади удалённой линии - длины и ширины прорези и её ориентации на резисторе. Наиболее употребительными формами резисторов являются прямоугольная и

трапецевидная, а прорезей в них - X-рез (вдоль линий тока); Y-рез (поперёк линий тока); L-рез (комбинация X- и Y-резов).

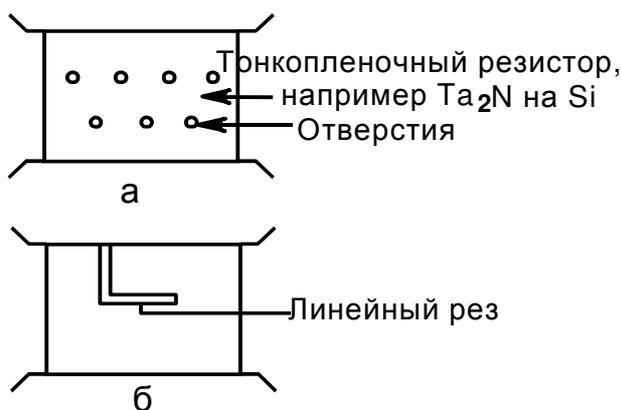


Рис.2.9. Доводка резисторов. а) удаление материала на дискретных участках; б) удаление материала посредством линейных резов.

Несмотря на удовлетворительные результаты и широкое распространение метода подгонки испарением, большой интерес представляют также возможности изменения сопротивлений резисторов без разрушения. Сопротивление резисторов необратимо меняется при нагревании с помощью лазерного излучения: в сторону уменьшения - вследствие отжига дефектов и в сторону увеличения - в результате окисления при облучении на воздухе. Оба эти явления позволяют не только увеличивать, но и уменьшать сопротивление резисторов при подгонке и стабилизируют его параметры. В зависимости от условий осаждения и облучения плёнок может преобладать один из двух указанных эффектов.

Подстройка параметров и изготовление СВЧ-схем

Интенсивное развитие полупроводниковой микроэлектроники привело к созданию ряда новых приборов для СВЧ-диапазона, таких как лавинно-пролётные приборы, приборы на основе эффекта Ганна, диоды с барьером Шоттки, *p-i-n*-диоды и другие. При конструировании подобных устройств значительную трудность представляет реализация с высокой точностью заданных параметров. Одним из наиболее эффективных методов подстройки параметров СВЧ-схем является лазерный. Вопросы, касающиеся подстройки некоторых элементов микросхем, таких как плёночные резисторы, были рассмотрены выше и полностью справедливы в диапазоне СВЧ для пассивных элементов. При подстройке параметров активных элементов необходимо обеспечить кратность длин отрезков микрополосковых линий, обуславливающих получение оптимальных сопротивлений элементов схемы, длине волны электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, на которую рассчитана схема. Настройка с помощью лазерного излучения микросхемы генератора Ганна производится путём изменения длины отрезка микрополосковой линии. Это позволяет настраивать генератор на оптимальную мощность практически при неизменной частоте. Аналогично

изменением длины отрезка можно подстроить частоту генератора Ганна при постоянной мощности.

Подстройка параметров кварцевых пьезоэлементов

Кварцевые резонаторы и фильтры являются важными элементами современной навигационной и измерительной аппаратуры. Они используются либо для стабилизации частоты, либо в качестве фильтров высокой избирательности. При этом предъявляются жёсткие требования к точности частоты кварцевых пьезоэлементов. Высокую точность частоты резонаторов и фильтров можно получить в результате прецизионной подстройки на завершающих стадиях их изготовления. В последнее время наибольшее внимание уделяется методу подстройки частоты, основанному на изменении массы пьезоэлемента за счёт локального испарения материала электродов сфокусированным излучением лазера. При уменьшении массы пьезоэлемента частота его колебаний увеличивается, а с увеличением массы она уменьшается. Увеличение массы пьезоэлемента можно осуществить путём лазерного переноса материала (рис.2.10). Перенос представляет собой разновидность лазерного напыления тонкой плёнки. При этом в качестве источника используется плёнка материала, напылённого на прозрачную пластину (донор). Сущность процесса лазерного переноса заключается в испарении донорного материала, который затем осаждается на подложке, называемой акцептором. При подстройке частоты, таким акцептором является пьезоэлемент.

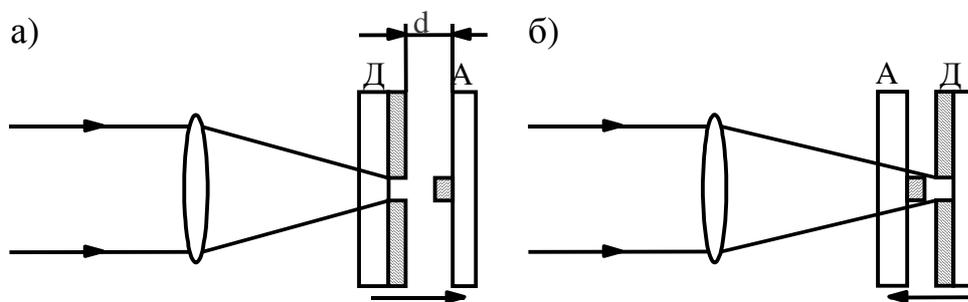


Рис.2.10. Схема прямого (а) и обратного (б) локального лазерного переноса вещества: Д - донор; А - акцептор (стрелка указывает направление переноса)

Перенос в общем случае может быть двух видов: прямой и обратный. При прямом переносе донор облучается со стороны прозрачной пластины, и продукты разрушения летят по ходу лазерного излучения. При обратном переносе донор облучается со стороны плёнки, и продукты разрушения летят навстречу лучу.

Лазерный отжиг

Лазерный отжиг устраняет повреждения в полупроводниках, вызванные внедрением (имплантацией) ионов. Так как внедряемые ионы предварительно ускоряются до энергий в несколько десятков или сотен килоэлектронвольт, легирование указанным способом сопровождается

повреждениями кристалла в виде дислокаций, сдвигов, дислокационных петель и разнообразных точечных дефектов. Указанные повреждения частично устраняются термическим отжигом, т.е. нагревом всего полупроводника в регулируемой атмосфере в печи. Однако при такой обработке образец нередко загрязняется, ухудшаются его электрические характеристики. Кроме того, при нагреве всего образца возможны диффузия и рекомбинация вносимых примесных атомов и даже выпадение их в осадок. Лазерный отжиг имплантированного слоя позволяет устранить многие из этих недостатков термического отжига. Поскольку при лазерном отжиге нагревается только слой с повреждениями, свойства подложки не ухудшаются. Нагрев импульсным или непрерывным лазером приводит почти к полной перекристаллизации слоёв с минимальными остаточными повреждениями и без диффузии примесных атомов. Хотя лазерный отжиг устраняет многие недостатки обычного термического, он порождает другие дефекты. Так при отжиге импульсным лазером могут появляться нерегулярности на поверхности полупроводника и напряжения на границе жидкой фазы. В последние годы для отжига начали применять эксимерные лазеры, позволяющие отжигать большие площади, что перспективно для технологии СБИС при переходе к пластинам большого диаметра. Схема сканирующей непрерывной лазерной установки показана на рис.2.11.

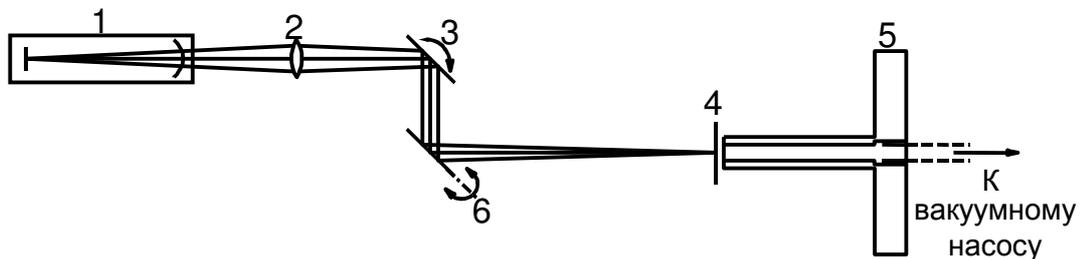


Рис.2.11. Система отжига непрерывным ионно-аргоновым лазером:
 1 - Ar^+ -лазер, мощность $W_{max}=15$ Вт; 2 - линза; 3 - зеркало, вращающееся относительно оси X; 4 - полупроводник; 5 - держатель; 6 - зеркало, вращающееся относительно оси Y

Перекристаллизация

Перекристаллизация тонких плёнок энергетическими пучками, особенно лазерным, является одним из наиболее эффективных методов получения ориентированных плёнок на диэлектрических подложках. Плёнка аморфного или кристаллического кремния осаждается на диэлектрическую подложку, а затем с помощью лазерного излучения плавится. В результате жидкофазной кристаллизации формируется крупнокристаллическая или, при определённых условиях, монокристаллическая структура. Сканируя лазерным лучом вдоль поверхности, достигают кристаллизации всей осаждённой плёнки. Использование затравки для ориентированной перекристаллизации позволяет исключить процесс случайного кристаллообразования. Таким образом, перекристаллизация - перспективный

метод получения крупнозернистых полупроводниковых структур. Так, например, облучение плёнок Ge на подложке из молибдена или графита, нагретых до 400 - 500 градусов, приводит к перекристаллизации на площади около 2,5×2,5 см. Возможно, что этот процесс ляжет в основу метода получения монокристаллических листов для изготовления солнечных элементов. Для перекристаллизации используются Nd-АИГ сканирующие лазеры непрерывного действия.

Образование силицидов

Электрические контакты и токоведущие дорожки на кремниевых микросхемах часто создаются силицидами металлов. Последние обычно формируются осаждением тонкого слоя металла на Si-подложку. Система металл-кремний нагревается затем до нескольких сотен градусов в атмосфере инертного газа. Силицид образуется в результате реакции металла и Si. Аналогичный результат за более короткое время можно получить с помощью лазерного нагрева. Кроме того, процесс лазерного нагрева может производиться до более высоких температур отжига без нагрева соседних структур. Силициды получают с помощью Nd-АИГ-лазера с модуляцией добротности. Используется лазер в режиме повторения импульсов со сканированием луча, что позволяет обрабатывать площадь, большую площади фокусного пятна. Высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к образованию нескольких различных соединений в плёнке силицида ($MeSi$, Me_2Si , Me_4Si и чистый Si.).

Формирование омических контактов и переходов

Формирование омических контактов и переходов осуществляется методом лазерного легирования. При лазерном легировании на поверхность образца наносится тонкий слой примеси или материала, содержащего примесь, используя методы электронно-лучевого или вакуумного напыления, окраски поверхности или центрифугирования. При последующем облучении образца поверхностный слой расплавляется, и примесь диффундирует в глубь расплавленного материала. При этом примесные атомы занимают узлы кристаллической решётки, причем концентрация примеси может превышать предельную равновесную растворимость. Омические контакты в кремнии получают при облучении импульсными Nd-АИГ- или CO_2 -лазерами. Облучение Si n -типа с В или Si p -типа с Р даёт выпрямляющие $n-p^+$ и $p-n^+$ - переходы.

2.4. ЛАЗЕРНОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК

Самые высокие скорости осаждения (100-1000 мкм/с) плёнок достигаются при термоионном осаждении импульсными методами. Среди импульсных устройств наибольшее распространение получили лазерные устройства. Плотность потока энергии (E) на мишень из рабочего вещества, длительность импульса (t) и длина волны (λ) лазера определяют характер взаимодействия излучения с веществом и параметры образующейся плазмы.

Плазма образуется при работе лазера в режиме с модулированной добротностью при $E > 10^8$ Вт/см². Металлы и большинство полупроводниковых материалов при этом испаряются без образования капель. Образующаяся над рабочим веществом плазма взаимодействует с излучением, нагревается и под действием силы инерции разлетается. Так как плёнка получается в результате осаждения испаряющегося вещества мишени, то данный метод получил название лазерного испарения. Для осаждения тонких плёнок испарением используются лазеры на CO₂, Nd-АИГ- или рубиновый лазер. Для испарения изоляторов и большинства полупроводниковых материалов предпочтительнее CO₂-лазеры, тогда как Nd-АИГ- или рубиновый лазер предпочтительнее для испарения металлов. Состав получаемой плёнки зависит от геометрических факторов и интенсивности импульса. Так, с помощью импульсного CO₂-лазера с максимальной мощностью в импульсе 160 - 1600 Вт можно получать высококачественные плёнки различных тугоплавких материалов. Скорость осаждения в таких условиях составляет менее 1 Ангстрема на импульс. Таким образом получают плёнки многих чистых металлов, причём полученные плёнки являются поликристаллическими.

Фотолиз (фотоосаждение)

Разложение молекулы под действием лазерного излучения называется лазерным фотолизом. Стимуляция процессов осаждения плёнок с помощью лазеров с перестраиваемой длиной волны обеспечивает разрыв строго определённых химических связей, необходимых для получения плёнок того или иного материала.

При лазерном фотолизе можно независимо менять мощность, длину волны излучения и положение пластины в пространстве. Поскольку фотолиз протекает вдоль пути распространения лазерного луча, получаемые при этом плёнки содержат меньшее число примесей, чем при плазменной стимуляции осаждения, когда пластины могут загрязняться примесями, образующимися в результате бомбардировки стенок реактора высокоэнергетическими ионами. С помощью фотолиза могут быть получены плёнки металлов, SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃ и др. Скорость осаждения при фотолизе определяется мощностью лазерного импульса, давлением в камере и площадью, на которую осаждается плёнка, и обычно лежит в диапазоне от 20 до 300 мкм/мин. Изоляционные плёнки, полученные методом фотолиза, характеризуются малой плотностью дефектов и высоким пробивным напряжением. Плёнки пригодны в качестве межслойных диэлектриков, для изготовления масок в процессе диффузии и пассивирующих слоёв в производстве СБИС.

Электроосаждение

Эффективность осаждения при комбинированном электроосаждении с лазерным излучением повышается. Схема установки для электроосаждения при воздействии лазерного излучения в области оптического поглощения на катоде показана на рис.2.12. Лазерное излучение падает на оптически прозрачную подложку с предварительно осаждённой тонкой плёнкой.

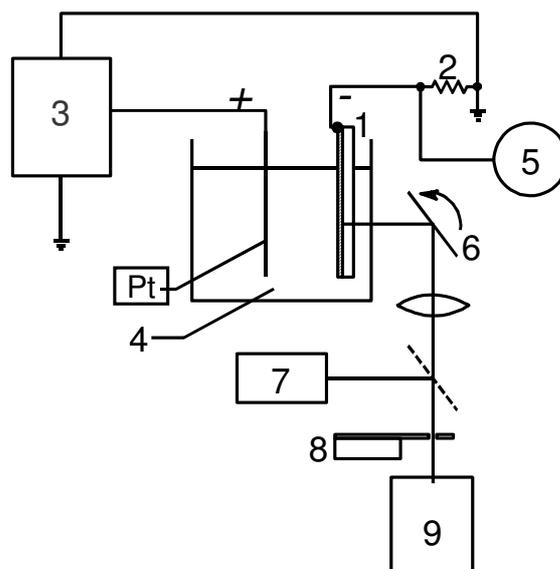


Рис.2.12. Схема установки для электроосаждения при воздействии лазерного излучения в области оптического поглощения на катоде: 1 - подложка (катод); 2 - регулирующее ток сопротивление; 3 - источник тока; 4 - электролит; 5 - ЭЛТ; 6 - колеблющееся зеркало; 7 - оптический регистратор интенсивности излучения; 8 - прерыватель светового луча; 9 - лазер непрерывного действия

Химическое осаждение из паровой фазы

Химическое осаждение из паровой фазы представляет интерес с точки зрения получения зернистых плёнок Si пиролизом силана. Осаждение Si происходит при пиролизе SiH_4 (или SiCl_4) в области лазерного нагрева. Это позволяет получать образцы на подложке без необходимости нанесения маскирующего покрытия и травления. Схема установки для лазерного химического осаждения из паровой фазы показана на рис.2.13.

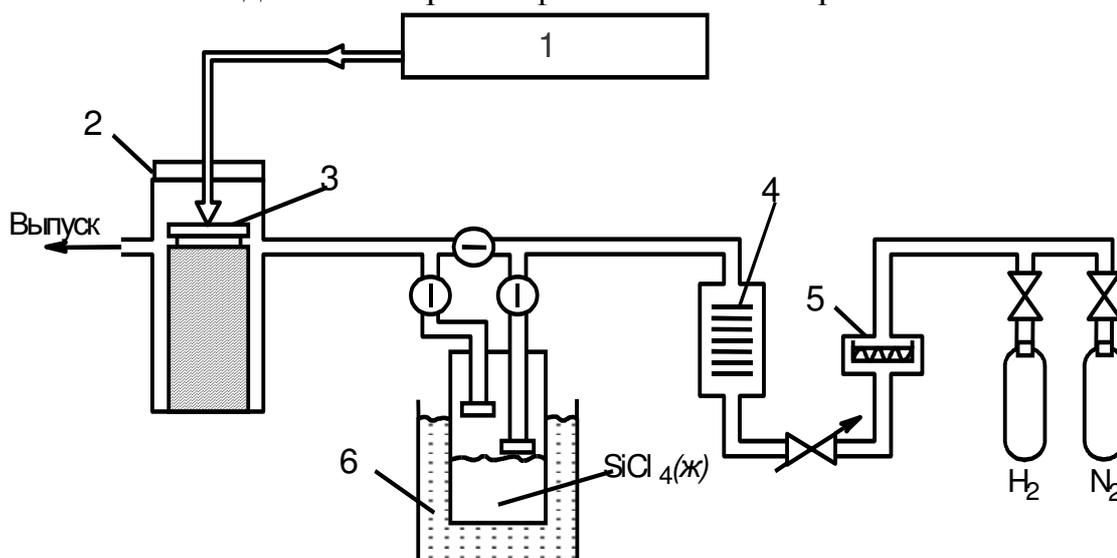


Рис.2.13. Установка химического осаждение из паровой фазы: 1 - CO_2 -лазер, 50 Вт; 2 - окно ZnS ; 3 - подложка; 4 - расходомер; 5 - ловушка; 6 – термостат

Скорость осаждения быстро растёт с увеличением мощности лазера и достигает предела при высоких мощностях. Для получения покрытий в виде полос используется сканирование перемещением подложки.

Контрольные вопросы

1. В чем суть лазерной очистки поверхности?
2. Перечислите основные направления использования лазерных процессов в микро- и нанотехнологиях.
3. Как меняется сопротивление резистора при подгонке номинала методом испарения?
4. Как можно уменьшить сопротивление резистора в процессе подгонки?
5. В чем суть прямого и обратного переноса вещества при лазерной подстройке частоты пьезоэлемента?
6. Как происходит устранение дефектов структуры при лазерном отжиге?
7. Сформулируйте основные преимущества лазерного отжига дефектов структуры.
8. Назовите основные варианты реализации и применения лазерной перекристаллизации материалов.
9. Сформулируйте принципы и перспективы лазерных методов получения тонких пленок.

2.5. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Появление лазеров способствовало бурному развитию многих разделов фотохимии. До появления лазеров такие области химической технологии, как инфракрасная фотохимия и оптическое разделение изотопов, практически не были исследованы. В настоящее время эти области очень быстро развиваются, предоставляя новую обширную информацию о ходе химических реакций. Некоторые применения лазеров в химии и химической технологии рассмотрены ниже.

Лазерное разделение изотопов

Разделение изотопов возможно в том случае, если скорость реакции возбужденного атома или молекулы с определенным реагентом выше скорости процесса с участием атомов или молекул в основном состоянии. Селективность процесса обеспечивается возбуждением только одного изотопа смеси. Так, в первом успешном процессе разделения изотопов смесь молекул CH_3OH и CD_3OD 1:1 облучалась излучением HF-лазера в области длин волн 2,64 - 2,87 мкм. Поглощение излучения приводило к избирательному возбуждению колебаний радикала OH в молекуле CH_3OH , которые в дальнейшем реагировали с бромом. Непрореагировавшие молекулы CD_3OD отделялись, причем степень обогащения достигала 95 %. При разделении изотопов использовались также избирательные процессы двухфотонной и многофотонной диссоциации, двухступенчатой диссоциации, фотоизомеризации и другие.

Химические реакции, инициируемые лазерами

Эффективное протекание многих фотохимических процессов требует достаточно мощного селективного светового потока, который может быть создан только лазером. Поглощение инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения, происходящее в исходных реагентах или промежуточных продуктах, приводит к изменению их реакционной способности и инициированию или значительному ускорению химической реакции. Подбирая длину волны лазера, можно селективно вводить энергию на определенные уровни. Использование мощных лазеров с инфракрасным излучением позволило реализовать многофотонные химические процессы, то есть процессы, связанные с возбуждением достаточно высоких колебательных или электронных уровней путем многофотонного поглощения.

Лазерный катализ

Возбуждение молекул газов инфракрасным лазерным излучением может ускорить реакцию и изменить ее направление. Таким способом, в частности, можно было бы повлиять на ход каталитических реакций, происходящих на поверхности твердого катализатора при лазерном облучении.

Лазерный нагрев

Лазерный нагрев можно непосредственно использовать для осуществления химических процессов. Примером являются эксперименты по пиролизу смесей углеводородов с SF₆. Лазерным излучением осуществляется инициирование реакций между частицами C_n и органическими молекулами в газовой фазе при испарении C_n из графита в результате лазерного нагрева. Преобладающим продуктом является ацетилен C₂H₂. Лазерный пиролиз в некоторых случаях может иметь некоторое преимущество по сравнению с обычным тепловым испарением углей. Одно из них заключается в том, что достигаемые при лазерном нагреве высокие температуры могут ускорить превращение метана в ацетилен:



Лазерный нагрев был предложен в качестве метода определения содержания углеводородов в нефтяных сланцах. Основное преимущество лазерного пиролиза заключается в быстром нагреве малых площадей и объемов образцов до высокой температуры. Быстрые нагрев и охлаждение могут "заморозить" продукты, соответствующие высокотемпературному химическому равновесию, и привести к образованию химических соединений, отличных от наблюдаемых при обычном пиролизе.

Лазерная полимеризация

Поскольку полимеризация может быть инициирована различными видами излучения, то неудивительно, что такой эффект вызывается и лазерным излучением. Первичный процесс инициирования

фотополимеризации состоит в поглощении света молекулой сенсбилизатора или непосредственно мономером. В сходных условиях было найдено, что при использовании резонансной частоты лазерного излучения существенно повышается степень полимеризации эмалей на основе алкидных смол и лаковых покрытий, а также сокращается время сушки. Использовалось лазерное излучение с частотой, соответствующей характерным инфракрасным резонансам связи. Полимеризация может быть также инициирована лазерным пробоем. Лазерная плазма в месте пробоя внутри раствора мономера, по-видимому, является локальным источником тепла и ультрафиолетового излучения, а также источником свободных радикалов, вызывая полимеризацию вещества вблизи зоны пробоя. Возможность осуществления этого и других процессов лазерной полимеризации определяется прозрачностью раствора мономера для лазерного излучения. При большом коэффициенте поглощения полимеризация будет ограничена тонким поверхностным слоем.

2.6. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ И ХИМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

Современные тенденции усложнения электронных приборов, повышения уровня миниатюризации и интеграции, применение новых технологических процессов и стремление к улучшению параметров изделий вызывают необходимость разработки новых средств измерения и контроля. К этим средствам предъявляются такие требования, как бесконтактность, информативность и высокая чувствительность измерений, возможность контроля сложных объектов, исследования статических и динамических процессов. Во многом этим требованиям удовлетворяют лазерные методы контроля. Широкое применение нашли интерференционные лазерные методы измерения и контроля.

Лазерная интерферометрия

Электромагнитное излучение, которым является свет, характеризуется частотой, амплитудой, фазой, поляризацией, направлением и скоростью распространения. Его взаимодействие со средой в процессе распространения приводит к изменению этих параметров. Располагая данными об этих изменениях, можно судить о свойствах среды. Непосредственное измерение такого параметра, как фаза световой волны, представляет собой весьма непростую задачу. Фаза и амплитуда могут быть определены путём их сопоставления с известной фазой и амплитудой опорного сигнала, то есть с помощью интерференции волнового фронта исследуемого и опорного сигнала. При этом информация о распределении фазы исследуемого волнового фронта содержится в частоте и конфигурации интерференционных полос, а об амплитуде - в их контрасте. Выполнение условий взаимной когерентности обеспечивается разделением луча света от одного источника. Оптическое устройство, обеспечивающие разделение луча, создание фазового сдвига объектом исследования, сведение лучей под нужным углом

и наблюдение интерференционной картины называется интерферометром. Классические интерферометры Майкельсона и Маха-Цендера изображены на рис.2.14.

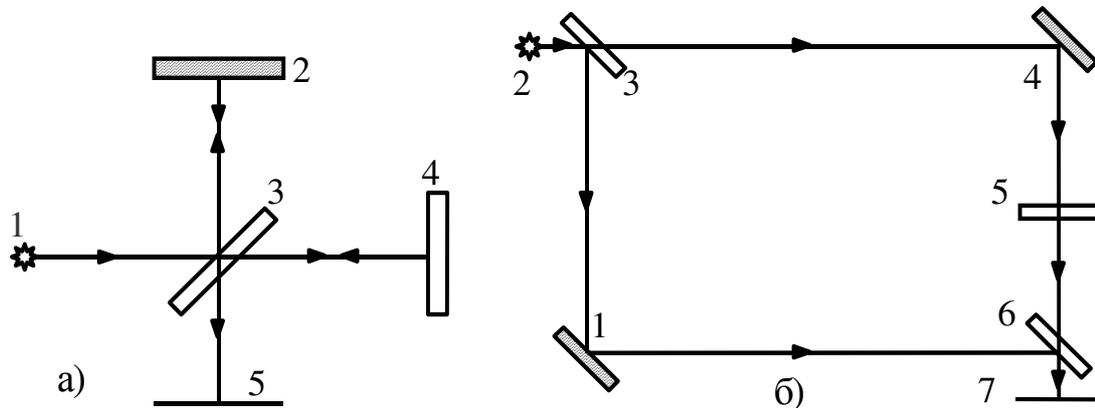


Рис.2.14. Схемы интерферометров: а) Майкельсона. 1-источник света; 2 - опорное зеркало; 3 - полупрозрачное зеркало; 4-исследуемый объект; 5 - плоскость наблюдения; б) Маха-Цендера. 1,4 - поворотные зеркала; 3,6- полупрозрачные зеркала; 5 - исследуемый объект; 7 - плоскость наблюдения; 2 - источник света

Первый служит для исследования формы поверхности, измерения линейных смещений, скоростей и ускорений объектов. Второй - для определения толщины тонких плёнок и кривизны поверхностей.

Голографическая интерферометрия

Голография - это двухступенчатый процесс фотографической записи и наблюдения изображения, при котором фокусируется не само изображение, а волновая картина рассеянного объектом света. В интерференционной картине - голограмме содержится информация об интенсивности и фазе волны. Схема записи изображения на голограмму и восстановления записанного изображения представлена на рис.2.15.

Интерферометр называется голографическим, если, по крайней мере, один из волновых факторов восстановлен с записанной ранее голограммы.

Измерение параметров тонких плёнок

В основе современного полупроводникового приборостроения лежат эпитаксиально-планарная технология и фотолитографические процессы, поэтому качество приборов в значительной степени зависит от плоскостности подложек, полупроводниковых пластин, фотошаблонов и др. Для контроля плоскостности используются голографические интерферометры (рис.2.16.).

На голограмму записывается эталонная плоская поверхность. Интерференционная картина наблюдается на экране 7. Величина прогиба h пластины определяется из уравнения:

$$h = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot \cos(Q)}, \quad (2.25)$$

где λ - длина волны излучения лазера; m - номер интерференционной полосы, проходящей через данную точку; Q - угол падения на образец зондирующего луча.

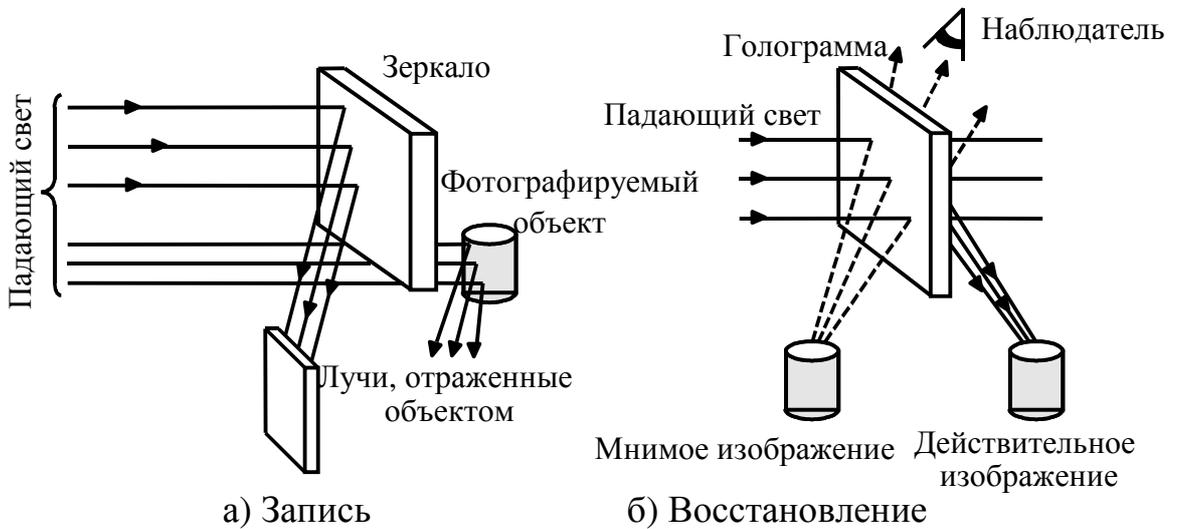


Рис.2.15. Запись (а) и восстановление (б) голографического изображения

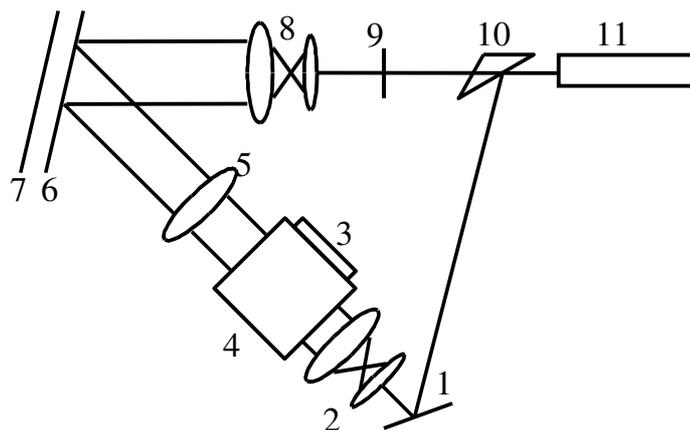


Рис.2.16. Оптическая схема голографического интерферометра: 1 - плоское поворотное зеркало; 2,8-коллиматоры; 3 - образец; 4 - приставка отражения; 5 - линза; 6 - голограмма; 7 - матовый экран; 9 - светофильтр; 10 - полупрозрачное зеркало; 11 - He-Ne-лазер

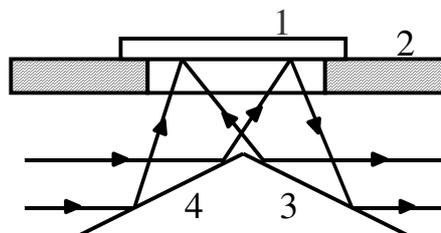


Рис. 2.17. Схема приставки: 1 - образец; 2 - базовая поверхность; 3,4 - плоские зеркала

Полученные интерферограммы дают возможность не только рассчитывать величины изгибов, но и осуществлять качественную оценку

структур, в частности, выявлять такие дефекты, как бугорки, ямы, завалы краёв.

Контроль чистоты обработки поверхности

О чистоте обработки поверхности можно судить по индикатору рассеяния, то есть по пространственному распределению отражённого света. В случае хорошо отполированной поверхности преобладает зеркальное отражение. Если же поверхность шероховата, то кроме зеркальной будет присутствовать также и диффузная составляющая отражённого луча. Эта диффузная составляющая обусловлена отражением на беспорядочно ориентированных поверхностях. Чем грубее обработана поверхность, тем сильнее проявляется диффузный характер отражения. Для автоматического контроля наличия дефектов на поверхности изделий или чистоты обработки поверхности можно использовать установку, изображённую на рис.2.18.

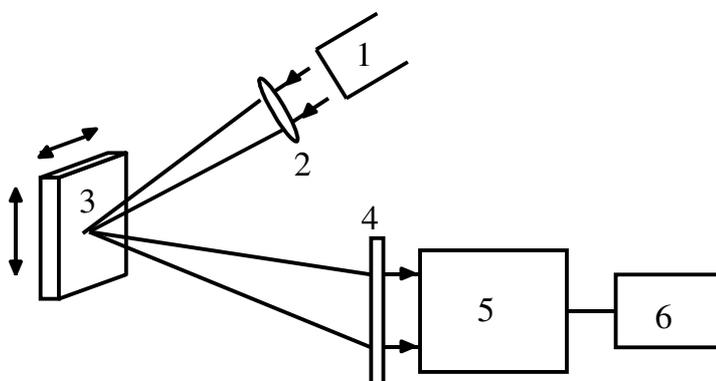


Рис.2.18. Блок-схема установки для автоматического контроля дефектов поверхности

Устройство содержит лазерный источник 1. Луч лазера предварительно пропускают через линзу 2 для создания необходимого освещения участка детали 3. Отражённые лучи проходят через прямоугольную диафрагму 4 и образуют на светоприёмнике 5, которым может служить передающая телевизионная трубка, прямоугольное изображение. Во время контроля деталь 3 перемещается. Поэтому на светоприёмнике трубки последовательной развёрткой проецируется вся поверхность детали. Выход светоприёмника соединён с ЭВМ 6, определяющей единичные дефекты, размеры которых переходят за пределы допустимой величины, или обрабатывающей статистику поверхностных дефектов.

Лазерный анализ атмосферы и контроль окружающей среды

Чистота атмосферы при производстве деталей ЭТ играет важную роль в повышении качества и выхода годной продукции. Поэтому диагностика аэрозолей является одной из важных составных частей современной технологии ЭТ. В общем случае для полного описания аэрозолей требуется измерить следующие параметры: размеры частиц и их распределение по размерам; химический состав, форму и концентрацию частиц. Большую часть этой информации можно получить, исследуя взаимодействие света и

аэрозольных частиц. Это обусловило широкое применение лазеров в данной области. Концентрацию аэрозолей определяют по интенсивности прошедшего через атмосферу излучения. Уменьшение интенсивности света при прохождении через поглощающую среду подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бера. График в координатах оптическая плотность - концентрация аэрозоля должен быть линейным, и прямая должна проходить через начало координат. Построив градуировочный график для известных концентраций аэрозолей, определяют затем по нему концентрацию аэрозоля в исследуемой среде. Измерение концентраций загрязнений в воздухе по их поглощению можно выполнять как локально в отдельной точке, так и вдоль заданного пути луча в атмосфере.

При измерении поглощения молекулами загрязнений луч может отражаться обратно входящим в систему пассивным отражателем или некоторой мишенью. Для измерения концентраций загрязнения в данной точке необходимая длина пути обеспечивается многократными отражениями в кювете. Измерение поглощения выполняется в основном с помощью ИК-лазеров. Ценным в этом отношении является CO_2 -лазер, обе полосы излучения которого попадают в окно прозрачности атмосферы 8 - 13,5 мкм. Однако при использовании лазеров с фиксированной частотой обнаружение того или иного загрязнения основывается на случайном совпадении линии излучения с вращательной линией испускаемой молекулы. Обнаружению искомой молекулы может мешать наложение спектральных линий других молекул. Преимуществом лазеров с перестраиваемой частотой является возможность точной подстройки длины волны их излучения к длине волны исследуемого загрязнения. Информацию о химическом составе аэрозольных частиц можно получить оптически по измерениям спектров комбинационного рассеяния или ИК-спектров поглощения. Эти методы являются дополнением к обычным химическим или спектроаналитическим методам.

Лазеры в химическом анализе

Появление лазеров позволило усовершенствовать многие существующие инструментальные методы анализа и создать новые, отличающиеся очень высокой чувствительностью и селективностью. Подробное рассмотрение этих методов выходит за рамки данного пособия, поэтому ограничимся лишь их перечислением. Это лазерная абсорбционная спектроскопия, лазерный флюоресцентный анализ, лазерно-ионизационная спектрометрия, многофотонная ионизация, спектроскопия комбинационного рассеяния, лазерный магнитный резонанс, лазерная фотоакустическая спектроскопия, лазерный спектральный микроанализ, лазерный масс-спектральный микроанализ, лазерная хроматография и некоторые другие.

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры использования лазерных процессов в химической технологии.
2. В чем суть и каковы возможности лазерной интерферометрии?
3. Что такое голографическая интерферометрия?
4. Приведите примеры использования лазерных методов в химическом анализе.
5. Сформулируйте основные положительные стороны лазерных методов анализа.
6. В чем принцип лазерного измерения запыленности воздуха?

Задания и задачи для практических занятий и самостоятельной работы к главе 2

1. Рассчитайте коэффициент поглощения излучения для трех - четырех металлов (по Вашему выбору) и сравните со справочными данными.
2. Определите максимальную длину волны, при которой возникает фундаментальное поглощение а) в кремнии; б) в германии; в) в арсениде галлия.
3. Оцените время, необходимое для увеличения размеров прогретой лазерным импульсом области в два раза, для а) алюминия; б) титана; в) стекла С50; г) керамики 22ХС.
4. Вычислите кривую распределения температуры поверхности металла (по Вашему выбору) во времени и проведите ее анализ.
5. Вычислите кривую распределения температуры диэлектрика (по вашему выбору) во времени и проведите ее анализ.
6. Оцените скорость нагрева материала (по Вашему выбору) импульсным лазером с длительностью импульса 1 мкс и плотностью мощности излучения 10^5 Вт/см².
7. Оцените время достижения температуры плавления материала (по Вашему выбору) при действии на него лазерного излучения с плотностью мощности 10^5 Вт/см².
8. Рассчитайте критическую плотность мощности лазера, требуемую для достижения на поверхности металла (по Вашему выбору) температуры плавления. Длительность импульса 1 мс.
9. Рассчитайте критическую плотность мощности лазера, требуемую для достижения на поверхности металла (по Вашему выбору) температуры испарения. Длительность импульса 1 мс.
10. Оцените глубину распространения температуры плавления для условий задач 8 и 9.
11. Проведите на ПЭВМ модельное решение уравнения теплопроводности для полубезграничного образца металла, облучаемого равномерно, и проанализируйте полученные результаты.
12. Проведите на ПЭВМ модельное решение уравнения теплопроводности для образца металла, облучаемого равномерно сфокусированным пучком диаметром 20 мкм, и проанализируйте полученные результаты.

13. Вычислить фокусное расстояние и глубину фокуса при фокусировке лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм и диаметром луча 5 мм в пятно наименьшего диаметра.
14. Вычислить фокусное расстояние и глубину фокуса при фокусировке лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм и диаметром луча 5 мм в пятно наименьшего диаметра.
15. Разработать схему установки, выбрать лазер, предложить и обосновать технологический режим упрочнения поверхности стальной детали площадью 20 см² на глубину 1 мкм.
16. Подобрать и обосновать технологический режим поверхностного легирования стальной детали площадью 20 см² на глубину 20 мкм методом поверхностного плавления микропорошка легирующего материала.
17. Разработать схему установки, выбрать лазер, предложить и обосновать технологический режим импульсно-периодической сварки с глубоким проплавлением стальных деталей толщиной 3 мм со скоростью не менее 1 см/с.
18. Разработать схему установки, выбрать лазер, предложить и обосновать технологический режим непрерывной сварки титановой фольги толщиной 50 мкм со скоростью не менее 1 см/с.
19. Оцените максимальную скорость резания фторопластового листа толщиной 5 мм.
20. Рассчитайте диаметр и глубину отверстия, получаемого при воздействии импульсного лазера с энергией импульса 1 Дж, начальным диаметром пучка 50 мкм и углом расхождения луча 1 угловая минута.
21. Проведите модельные расчеты процесса пробивки отверстия с помощью ПЭВМ и определите условия получения максимального отношения глубины отверстия к его диаметру.
22. Рассчитайте предельные значения глубины и диаметра отверстия, которое можно получить в стальном листе при воздействии импульсным лазером с длиной волны 1,06 мкм, энергией 1 Дж, радиусом пучка 100 мкм при значении тангенса угла расхождения луча 0,2.
23. Вычислите параметры отверстия, которое можно получить в стали внутри цилиндрической световой трубки диаметром 100 мкм при действии импульсного лазера с длиной волны 1,06 мкм и энергией в импульсе 1 Дж.
24. Оцените время, необходимое для удаления 50% материала хромового фотошаблона размером 40·40 мм и толщиной 50 нм при обработке импульсным лазером с энергией в импульсе 1000 Дж, длительностью импульса 10 нс, частотой следования 100 Гц. Удельная энергия испарения хрома 50 кДж/см³, поглощающая способность 0,5.

Глава 3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

3.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Электронно-лучевая технология уже сейчас успешно конкурирует со многими традиционными методами обработки материалов и контроля их свойств. Это прежде всего обусловлено уникальными возможностями электронного луча при использовании его в качестве технологического инструмента:

1) *универсальность*: объектом электронно-лучевой технологии может быть большинство металлов, диэлектриков и полупроводников с различными физико-химическими свойствами; огромный диапазон удельной мощности в пределах $0,1-10^{16}$ Вт/см²; возможность локального или селективного воздействия на объект;

2) *отсутствие источников загрязнений*: процесс протекает в высоком вакууме, сам электронный луч не вносит загрязнений и не подвержен износу, а контроль с его помощью, как правило, является неразрушающим;

3) *исключительная управляемость* по интенсивности, концентрации, месту и времени выделения мощности. Эти параметры можно регулировать, изменяя энергию, фокусировку, модуляцию и отклонение электронных потоков. Малая инерционность облегчает быстрое перемещение пучка с одного участка на другой и обеспечивает высокую скорость обработки или локального анализа;

4) *возможность полной автоматизации* технологического процесса, поскольку все управление любой электронно-лучевой установкой можно осуществлять путем изменения соответствующих электрических величин. Это позволяет сравнительно легко сопрягать такие установки с ЭВМ и АСУТП.

В настоящее время наибольшее распространение получили термические способы электронно-лучевой обработки. Примером применения нетермической обработки служит электронная литография или получение тонких пленок при разложении химических соединений.

Хорошо зарекомендовали себя и электронно-зондовые методы контроля, с помощью которых получают уникальную информацию в таких областях науки, как физика твердого тела, металлофизика, минералогия, биология и др. Все шире подобные методы внедряются в производство для непосредственного контроля за ходом технологического процесса. В микроэлектронике, например, для исследования свойств полупроводниковых материалов и элементов микросхем с успехом применяют растровый электронный микроскоп в сочетании с рентгеновским или оже-микроскопическим анализатором. В современных технологических установках для выращивания тонких пленок методом молекулярно-лучевой эпитаксии обязательно предусмотрен контроль за свойством пленок в ходе роста

методами дифракции быстрых и медленных электронов и электронной оже-спектроскопии.

Можно привести еще множество примеров такого рода. Нет сомнения, что по мере углубления наших знаний о физике взаимодействия электронов с веществом и совершенствования технологической базы электронный луч будет находить более широкое применение в самых различных областях науки и техники. Эта уверенность подтверждается общей тенденцией современной технологии, заключающейся в переходе к управлению процессами, в которых участвуют все более высокие энергии во все меньших пространственно-временных областях.

3.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ

3.2.1. Процессы, происходящие при бомбардировке вещества электронами, и возможности их использования в технологии

При взаимодействии ускоренных электронов с твердым телом происходит множество взаимосвязанных процессов, в результате которых наблюдается эмиссия с облучаемой поверхности электронов, фотонов и атомных частиц, а свойства самого твердого тела могут существенно измениться. Падающий электронный поток частично отражается, частично проникает в твердое тело. Отражение электронов от поверхности приводит к понижению эффективности использования потока электронов, но зависимость параметров отраженных электронов от состава и структуры поверхности позволяет использовать этот эффект в аналитических целях. Электроны, попавшие в твердое тело, возбуждают или ионизируют узлы решетки. Эти процессы сопровождаются излучением (в том числе рентгеновским) и испусканием свободных электронов (вторичной электронной эмиссией). Соответствующие явления широко используются для анализа и исследования свойств твердого тела и поверхности. Кроме того, передача энергии первичных электронов твердому телу сопровождается нагреванием его и стимуляцией различных химических процессов.

Рассмотрим основные физические явления, сопровождающие электронную бомбардировку.

На своем пути первичные электроны испытывают многочисленные акты взаимодействия с атомами твердого тела, которые можно разделить на два основных класса - упругие и неупругие.

Под упругим понимают такое взаимодействие, при котором участвующие в нем частицы обмениваются кинетической энергией, а их внутренняя энергия не изменяется. Из законов сохранения энергии и импульса следует, что при упругом соударении электрона с неподвижным атомом максимальное значение переданной кинетической энергии определяется соотношением масс взаимодействующих частиц и не может превышать нескольких сотых долей процента от начальной энергии электрона E_1 . Тем не менее при очень больших значениях E_1 (сотни кэВ,

единицы МэВ) переданной энергии становится достаточно для выбивания атомов из узлов кристаллической решетки. Это приводит к появлению дополнительных, не находящихся в тепловом равновесии с решеткой, дефектов кристаллической структуры - одной из разновидностей радиационных дефектов. Облучение мегавольтными электронами используют на практике, например, для упрочнения некоторых сплавов, для уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводниках и т.д. Обычно в электронно-лучевой технологии энергия электронов не превышает 100 - 200 кэВ. При такой энергии электрон, упруго рассеиваясь на атоме твердого тела, уже не может разорвать связь с соседями, а лишь смещает его. Смещение любого атома при соударении с электроном вызывает соответствующие смещения соседних атомов, и по атомной цепочке распространяется *упругая волна*. Такие волны в кристалле могут возникать лишь на определенных дискретных частотах, каждой из которых соответствует свой квант энергии - *фонон*. Поэтому в каждом акте упругого рассеяния первичный электрон теряет энергию дискретными порциями, соответствующими возбуждению одного или нескольких фононов. Строго говоря, этот процесс не является чисто упругим, поскольку он сопровождается возрастанием внутренней энергии твердого тела - энергии тепловых колебаний. Однако так как энергия фононов значительно меньше, чем энергия первичных электронов, то такое рассеяние считают обычно *квазиупругим*.

Рассмотрим теперь более обширный класс взаимодействий первичных электронов с твердым телом, в результате которых изменяется не только направление их движения, но и энергия, то есть происходит их торможение. Торможение электронов при движении в веществе может быть обусловлено различными причинами. Одна из них заключается в том, что взаимодействие движущейся заряженной частицы с полем атомов вещества должно по законам электродинамики сопровождаться появлением квантов электромагнитного излучения. Так как движение первичного электрона в твердом теле не является периодическим, то энергетический спектр такого тормозного излучения имеет непрерывный характер и в соответствии с законом сохранения энергии простирается вплоть до энергии квантов, равной E_1 . Поэтому при эксплуатации любой высоковольтной электронно-лучевой установки необходимо применять особые меры для защиты обслуживающего персонала от рентгеновского излучения. Тормозное излучение находит применение в различных источниках рентгеновских лучей.

Основной механизм торможения первичных электронов в веществе связан с процессами неупругого рассеяния, в результате которых электронная система твердого тела возбуждается. В конденсированных средах во взаимодействие с пролетающей частицей может вовлекаться одновременно много атомов. В соответствии с этим различают два основных типа электрон-электронных взаимодействий в твердом теле: коллективные и одночастичные.

При коллективных возбуждениях первичный электрон взаимодействует с системой валентных электронов твердого тела, которую можно в этом случае рассматривать как вырожденный газ или плазму свободных электронов в поле однородно распределенного положительного заряда. При внешнем возбуждении такой плазмы возникают колебания электронной плотности на дискретных квантовых частотах, зависящих от концентрации электронов и свойств материала. Квант энергии плазменных колебаний - плазмон - принято считать квазичастицей твердого тела, обладающей определенными значениями энергии и импульса.

При рассеянии на большие углы импульс, передаваемый электронам твердого тела, достаточно велик, и возбужденные колебания становятся настолько коротковолновыми, что электронная плазма ведет себя по отношению к ним как система отдельных свободных частиц, т. е. проявляет второй тип неупругого электрон-электронного рассеяния - одночастичные взаимодействия, при которых энергия первичных электронов тратится на ионизацию и возбуждение атомов твердого тела.

В каждом акте такого взаимодействия один из электронов твердого тела получает от первичного электрона энергию, достаточную для перехода в состояния с более высокой энергией. На энергетическом уровне, с которого произошел переход, при этом образуется вакансия. Вероятность ионизации внутренних энергетических уровней зависит от энергии первичных электронов E_1 и обычно достигает максимума, когда E_1 в несколько раз превышает энергию связи электрона в исходном состоянии.

Возбужденные электроны в момент образования обладают кинетической энергией, превышающей среднюю тепловую энергию электронов проводимости. В дальнейшем эти электроны постепенно теряют избыточную энергию в многочисленных актах неупругого рассеяния. Часть из них после многократного изменения направления движения может достигнуть поверхности твердого тела. Если при этом у возбужденного электрона еще сохраняется энергия, достаточная для преодоления поверхностного потенциального барьера, то он может выйти в вакуум в качестве вторичного электрона. Большинство возбужденных электронов остается в твердом теле и сравнительно быстро (за время 10^{-14} - 10^{-12} с) теряет всю избыточную энергию в многочисленных актах торможения. В результате в зоне проводимости накапливаются неравновесные электроны с тепловыми скоростями, так называемые термолизованные электроны. В металлах таких электронов значительно меньше, чем электронов проводимости, поэтому заметное влияние на проводимость они могут оказать только в диэлектриках и полупроводниках. В неметаллических веществах время жизни термолизованных в зоне проводимости электронов, как правило, достаточно велико и может достигать десятков и сотен микросекунд. Однако в конечном счете эти неравновесные электроны неизбежно исчезают в результате рекомбинации с носителями противоположного знака.

Если в результате электронных переходов резко возрастают силы отталкивания между соседними атомами и если эти атомы успевают до

начала релаксации разойтись на заметные расстояния (например, при удалении возбужденного или ионизированного атома с поверхности твердого тела), то происходит необратимое изменение состава облучаемого электронами вещества. К процессам такого рода относится электронно-стимулированная десорбция атомов и молекул, а также диссоциация химических соединений, находящихся на поверхности твердого тела. В последнем случае продукты диссоциации или часть их могут удаляться с поверхности как непосредственно во время облучения (при образовании летучих фракций), так и в результате последующей специальной обработки (прогрева, травления и др.).

Электронная бомбардировка может приводить и к образованию химических соединений, если химическая активность атома при возбуждении возрастает. Электронный луч играет в этом случае роль катализатора. Одной из таких реакций является, например, образование диэлектрических пленок в результате полимеризации адсорбированных на поверхности органических молекул.

Все перечисленные явления широко используются в электронно-лучевой технологии, например в электронолитографии, при нанесении тонких пленок, при размерной обработке (сверление, фрезерование, резка) и т. п. В ряде случаев электронно-стимулированные процессы играют вредную роль. Так, электронное облучение в присутствии углеродсодержащих или кремнийорганических паров сопровождается сравнительно быстрым и весьма стойким загрязнением облучаемой поверхности углеродом или оксидом кремния. Это накладывает дополнительные требования на вакуумные условия в электронно-лучевых установках.

Рассмотрим еще один путь, по которому идет процесс преобразования энергии первичных электронов, играющий исключительно важную роль в технологии, - электронно - лучевой нагрев вещества. Электронный пучок при торможении в твердом теле теряет в нем всю энергию в результате различных упругих и неупругих процессов. Некоторая доля этой энергии уносится из образца эмитированными с поверхности электронами, фотонами и атомными частицами, а оставшаяся часть поглощается веществом и в конечном счете переходит в теплоту. Как и в любом другом способе нагрева, эта теплота отводится от облучаемого участка за счет теплопроводности материала и теплового излучения поверхности. Скорость теплоотвода возрастает при увеличении разности температур между нагреваемой областью и окружающей средой. Поэтому с ростом мощности электронного пучка тепловой баланс между выделяемой и отводимой энергией устанавливается при все более высокой температуре бомбардируемого участка. Повышение температуры, в свою очередь, стимулирует протекание ряда химических процессов, структурных фазовых переходов, отжига дефектов, диффузии, плавления, рекристаллизации, десорбции и испарения с поверхности атомных частиц, термоэлектронной эмиссии и др.

Особенностью электронно-лучевого нагрева является то, что можно достигнуть очень высокой концентрации тепловой энергии при сравнительно

малой общей мощности пучка. Это позволяет при необходимости локализовать протекание всех перечисленных процессов в достаточно узкой области образца, температура которой может быть очень высокой. Кроме того, при удельных энергиях первичного пучка более 10^6 Вт/см² возрастают механические силы, действующие на облучаемый участок и обусловленные давлением самого электронного пучка, а также реактивным давлением ("давлением отдачи") испаряющихся с поверхности частиц. В результате может наблюдаться аномально глубокое проплавление вещества (кинжальное проплавление) и даже образование сквозных отверстий в месте попадания пучка.

Явление выделения теплоты при электронной бомбардировке лежит в основе таких широко распространенных электронно-лучевых термических технологических процессов, как отжиг, очистка, испарение, плавка, литье, сварка и размерная обработка. Если нагрев электронным лучом нежелателен, то необходимо либо снижать мощность пучка, либо принимать специальные меры для улучшения теплоотвода от облучаемых узлов установок и приборов.

Таким образом, анализ различных физических процессов и явлений, сопровождающих электронную бомбардировку вещества, показывает, что большинство из них может быть с успехом использовано при решении самых разнообразных технологических задач.

Контрольные вопросы

Какие процессы протекают при упругом рассеянии электронов в твердом теле?

При каких условиях упругое рассеяние электронов в твердом теле приводит к образованию дефектов?

Что такое тормозное излучение и каковы причины его возникновения?

Поясните механизм вторичной электронной эмиссии.

Как влияет появление неравновесных вторичных электронов при электронной бомбардировке на электропроводность а) металлов; б) полупроводников; в) диэлектриков?

Каково время термализации остающихся в металле вторичных электронов?

Приведите примеры процессов изменения состава твердого тела при электронной бомбардировке.

Какой процесс является основным "потребителем" энергии первичного электронного пучка?

Перечислите основные процессы, протекающие при нагревании твердого тела электронным потоком.

3.2.2. Движение ускоренных электронов в твердом теле

Путь, проходимый первичным электроном до термализации, называется траекторным пробегом электрона в данном веществе. Так как этот путь далек от прямолинейного, то на практике важно знать глубину проникновения электронов, которая определяется как проекция траекторного пробега на

нормаль к поверхности. Очевидно, что различие между средними значениями глубины проникновения и траекторного пробега будет тем больше, чем более "изломанной" окажется траектория электронов в веществе.

Длина пробега зависит от начальной энергии электронов и тормозной способности вещества, которая, согласно теоретическим и экспериментальным оценкам, возрастает при уменьшении энергии электронов. Это, в частности, означает, что у поверхности, где скорость первичных электронов еще велика, вероятность потери энергии должна быть меньше, чем в конце пробега. В результате максимум пространственного распределения удельной энергии, выделяемой в образце, расположен не на поверхности, а в объеме твердого тела. Эта особенность отличает электронную бомбардировку от других способов передачи энергии твердому телу (например, от лазерного облучения).

При рассмотрении движения быстрых электронов в твердом теле обычно используют приближение непрерывного торможения. Скорость изменения кинетической энергии электронов вдоль пути в твердом теле, полученная при решении квантовомеханического уравнения Бете, имеет вид:

$$\frac{dE}{dx} = - \frac{2\pi N_A \cdot e^4 Z\rho}{A\epsilon} \ln \frac{b\epsilon}{I}, \quad (3.1)$$

где E - текущая энергия электронов; ρ - плотность твердого тела; N_A - число Авогадро; Z , A - атомный номер и атомный вес; I - средняя энергия возбуждения атома; b - множитель, равный 1,166.

Для практических расчетов траекторного пробега и изменения энергии электронов по глубине обычно используется степенное приближение:

$$E_x^n = E_o^n - \rho \cdot b_1 \cdot x \text{ или } R = E_o^n / \rho \cdot b_1 = E_o^n \cdot k, \quad (3.2)$$

где b_1 - постоянная величина; x - текущая координата; R - глубина проникновения.

Величина показателя n зависит от энергии первичных электронов. Значения показателей n и $k = 1/\rho \cdot b_1$ для различных диапазонов начальных энергий электронов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Зависимость показателя степени n от энергии первичных электронов

Диапазон энергий, кэВ	1-10	5-50	10-100	50-500	$10^2 - 10^3$	$500-5 \cdot 10^3$	10^3-10^4
n	1,35	1,52	1,64	1,77	1,80	1,85	1,87
k	1,37	0,95	0,64	0,36	0,31	0,22	0,20
погрешность, %	5	5	3,5	3	2	1	0,5

Частным случаем уравнения (3.2) при $n = 2$ является уравнение Виддингтона $E_x^2 = E_o^2 - \rho \cdot b_1 \cdot l$, которое часто используется при расчете потерь энергии электронов в металлах.

Еще один эффект, который следует учитывать в электронно-лучевой технологии, состоит в том, что в результате рассеяния электронов при их проникновении в вещество диаметр электронного пучка увеличивается. Если

исходный диаметр пучка меньше, чем глубина проникновения электронов (как это имеет место, например, в растровой электронной микроскопии, при электронно-зондовом микроанализе, при электронно-лучевой размерной обработке и др.), то их энергия выделяется в приповерхностном объеме образца, близком по форме к сферическому. Диаметр этой сферы имеет тот же порядок, что и глубина проникновения электронов, и именно его размером ограничивается пространственное разрешение соответствующего способа микрообработки или микроанализа.

Простая феноменологическая модель диффузного проникновения электронов в вещество предполагает, что электроны сначала проходят некоторый путь без рассеяния (x_d), а затем изотропно (диффузно) рассеиваются. Если диаметр электронного луча мал по сравнению с глубиной проникновения, то поглощение энергии происходит в сфере радиусом $r_d = (R - x_d)$. При этом величины x_d и r_d могут быть приближенно оценены из уравнений:

$$x_d \approx 12R/(Z + 8) \text{ и } r_d \approx (Z - 4)R/(Z + 8). \quad (3.3)$$

3.2.3. Тепловые эффекты при взаимодействии ускоренных электронов с твердым телом

Для практических целей важно знать область распределения выделенной электронами энергии по глубине материала:

$$Q_x = \frac{dE}{dx} \frac{j\tau}{e} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{ef} \frac{j_0 \cdot \tau}{e}, \quad (3.4)$$

где j_0 - плотность тока на поверхности материала; $(dE/dx)_{ef}$ - эффективные энергетические потери, учитывающие разлет электрона.

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{ef} = \frac{E_0}{R} \left(1 - \frac{x}{R} \right)^{5/4} \cdot \left(3 - 2 \exp \left[- \frac{Z+8}{4} \frac{x}{R} \right] \right). \quad (3.5)$$

Из рис. 3.1 видно, что максимум энерговыделения наблюдается на глубине $x_D = \delta$; максимальное значение поглощаемой энергии в 1,5-1,7 раза больше значения энергии $Q_0 = E_0 \cdot j_0 \cdot \tau / (R \cdot e)$, выделяемой на поверхности. Глубина δ максимального энерговыделения определяется из выражения

$$\frac{\delta}{R} = - \frac{Z+13}{Z+8} + \frac{8}{Z+8} e^{+\frac{Z+8}{4} \frac{\delta}{R}}. \quad (3.6)$$

Если учесть выражение (3.2) для полной глубины диффузии, то можно получить из формулы (3.6) следующее неравенство:

$$1 < \frac{8}{Z+8} e^{3\delta/x_D} < 2. \quad (3.7)$$

Отсюда видно, что для веществ с небольшим значением Z глубина максимального энерговыделения всегда меньше диффузионной длины; при росте Z глубина δ приближается к величине x_D .

В качестве примера на рис. 3.2 показано экспериментальное распределение поглощенной энергии по глубине в алюминии.

При расчете нагрева вещества электронным лучом, если при этом нет фазового перехода, т.е. плавления или испарения, необходимо решить уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a^2 \nabla^2 T = \frac{Q_V(x, y, z, t)}{\rho c_V}, \quad (3.8)$$

где a , c_V - соответственно температуропроводность и удельная теплоемкость вещества; Q_V - объемная плотность мощности источника теплоты; ρ - плотность вещества.

Обычно рассматривается осесимметричный электронный луч с гауссовым распределением плотности тока по радиусу:

$$j(r) = j_0 \cdot e^{-r^2/r_0^2}, \quad (3.9)$$

где j_0 - плотность тока на оси луча; r_0 - эффективный радиус луча.

С учетом уравнения (3.6) выражение для объемной плотности мощности будет иметь вид

$$Q_V = Q_{V0} \cdot e^{-\frac{r^2}{r_0^2}} \left(1 - \frac{x}{R}\right)^{\frac{5}{4}} \cdot \left(3 - 2 \cdot e^{-\frac{Z+8x}{4R}}\right), \quad (3.10)$$

где Q_{V0} - объемная плотность мощности на поверхности образца по оси луча.

Если выражение (3.10) аппроксимировать функцией Гаусса, максимум которой соответствует глубине максимального энерговыведения δ (рис.3.3), то распределение температуры $T(r, x, t)$ имеет вид:

$$T(r, x, t) = \frac{Q_{V0} \cdot e^{-r^2/r_0^2}}{2c_V \cdot \rho} \cdot \int_0^{\tau} \exp\left[-\frac{(\delta-x)^2}{4a \cdot t}\right] \times \\ \times \operatorname{erfc}\left[-4\delta \cdot \Delta x_m^2 \sqrt{a \cdot t} \left(1 + \frac{x}{4a \cdot \Delta x_m^2 \cdot \delta \cdot t}\right)\right] dt, \quad (3.11)$$

где Δx_m - полуширина гауссовой функции распределения по глубине; $\delta \approx (0,2-0,4)R$.

Расчеты по этой формуле следует проводить только для режимов нагрева без перехода вещества в жидкую фазу. Энергия электронов E_0 учитывается через параметр $\delta \sim E_0^2$.

Для материалов с хорошей теплопроводностью (медь) температура поверхности слабо зависит от энергии электронов; для материалов примерно с той же плотностью, но со значительно худшей теплопроводностью (нержавеющая сталь), температура поверхности резко падает, в то время как максимальная температура на глубине δ может превышать температуру кипения. Вольфрам имеет значительно большую плотность, поэтому тепловой источник локализуется вблизи поверхности, а относительно высокая теплопроводность позволяет выровнять температуру по глубине.

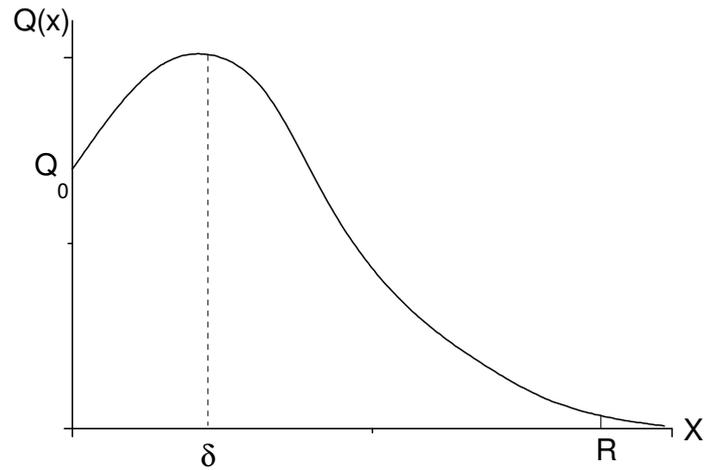


Рис. 3.1. Распределение плотности поглощенной энергии электронов в веществе по глубине

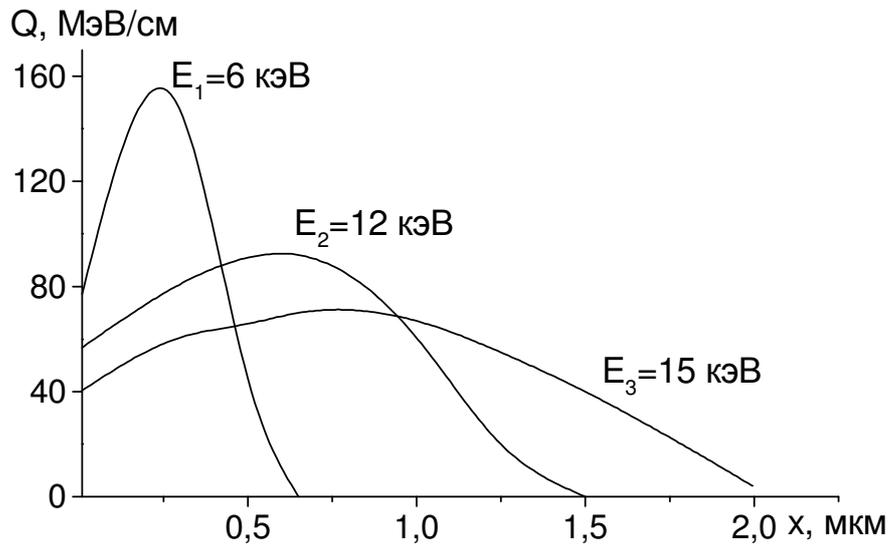


Рис. 3.2. Экспериментальное распределение поглощенной энергии по глубине в алюминии

Относительно просто решается задача о поверхностном испарении материала. В этом случае считается, что при достаточно большой плотности мощности электронного луча происходит испарение вещества без перехода в жидкое состояние (сублимация). Потерями на теплопроводность и лучистое теплоиспускание можно пренебречь. Энергетический баланс можно записать следующим образом:

$$\rho \cdot L_{\text{исп}} \cdot S \cdot \Delta h = P \cdot \Delta t, \quad (3.12)$$

где ρ - плотность материала; $L_{\text{исп}}$ - теплота испарения; S - площадь энерговыделения луча; Δh —глубина испаряемого материала за время Δt - тепловая мощность, выделяемая электронами.

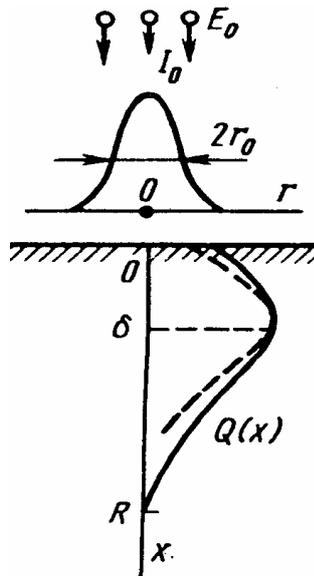


Рис.3.3. Распределение выделенной электронами энергии по объему вещества

При действии луча в течение времени t глубина лунки на образце равна

$$h(\tau) = q \cdot t / (\rho \cdot L_{\text{исп}}), \quad (3.13)$$

где $q=P/S$ - плотность мощности.

В данном приближении считается, что область испарения материала находится в адиабатических условиях, температура поверхности всегда равна температуре испарения. Практически такой режим встречается достаточно редко; даже при размерной обработке (сверлении, фрезеровании) существует теплоотвод благодаря теплопроводности материала, находящегося в твердой фазе. В этом случае граничные условия на поверхности ($x = 0$) при $T=T_{\text{исп}}$ равны $q=\rho \cdot L_{\text{исп}} \cdot dh/dt - \lambda \partial T / \partial x$, где $\partial T / \partial x$ - скорость испарения материала; λ - теплопроводность материала.

Решая уравнение теплопроводности при данном граничном условии, в первом приближении можно получить выражение скорости испарения:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q}{\rho \cdot L_{\text{исп}}} + \varepsilon \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{v^2 \cdot t}{4a} - \left(\frac{\pi \cdot v^2 \cdot t}{a} \right)^{-1/2}} \exp \left(-\frac{v^2 \cdot t}{4a} \right) \right\}, \quad (3.14)$$

где a - температуропроводность материала, $v = \frac{q}{\rho \cdot L_{\text{исп}}} (1 - \varepsilon)$ - скорость

испарения материала при отсутствии теплоотвода; $\varepsilon = \frac{c \cdot T_{\text{исп}}}{L_{\text{исп}}} < 1$ (например,

для Cu, Au, Fe $\varepsilon \sim 0.2$). При малых временах нагрева ($v^2/a \leq 0.1$) скорость испарения резко возрастает, но всегда остается меньше v . Затем по мере роста времени нагрева она стремится к постоянному значению: $dh / dt \rightarrow v$.

Выражение для глубины проплавления h , которое получено при тех же граничных условиях, что и формула (3.14), имеет вид:

$$h = \frac{\pi \cdot q \cdot \tau}{2(c \cdot T_{\text{пл}} + L_{\text{пл}}) \rho} \left[1 + \frac{2c \cdot T_{\text{пл}}}{L_{\text{пл}}} \left(1 + \frac{2a \cdot \tau}{d^2} \right) \right], \quad (3.15)$$

где τ - время облучения; $L_{пл}$ - теплота плавления материала.

Из этого выражения видно, что в начале воздействия электронного луча (малые τ) глубина проплавления линейно зависит от времени облучения τ ; при больших временах облучения скорость проплавления замедляется, и при $\tau > 2d^2L_{пл}/(a \cdot c \cdot T_{пл})$ глубина h не увеличивается.

Наиболее сложен для анализа случай плавления материала при скорости выделения тепловой энергии, превышающей скорость ее отвода за счет теплопроводности, теплового излучения и испарения с поверхности. В этом случае осуществляются глубокое проплавление материала в специфическом режиме «кинжального» проплавления, когда отношение глубины проплавления h к диаметру электронного луча d может достигать величины 40-50. Характерной особенностью такого режима является то, что глубина проплавления значительно превышает глубину проникновения электронов в твердую фазу. Максимальная глубина проникновения зависит от удельной мощности электронного луча и от времени обработки и на несколько порядков превышает траекторный пробег электронов в твердой фазе.

При глубоком («кинжальном») проплавлении глубина h зависит от большого числа факторов. На поверхности расплавленного металла действуют силы, которые стремятся прогнуть поверхность расплава и вытеснить расплавленный металл из зоны воздействия луча, образуя кратер. Они обусловлены давлением электронного луча и реактивным давлением испаряющихся частиц. Эти силы уравниваются гидростатическим давлением столба жидкости и силами поверхностного натяжения жидкого металла. Из условия баланса всех сил можно определить радиус канала R_k (рис. 3.4) по уравнению:

$$R_k = \frac{2\sigma}{v_{и} \sqrt{2k \cdot T / M - \rho h_k}}, \quad (3.16)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения; $v_{и}$ - скорость испарения материала при температуре T ; ρ - плотность жидкого металла; M - молекулярная масса материала расплава; h_k - глубина кратера; k - постоянная Больцмана.

При увеличении мощности луча увеличивается скорость $v_{и}$, следовательно, радиус кривизны будет уменьшаться, но для сохранения баланса сил глубина кратера h_k должна увеличиться.

Параллельно развивается процесс взрывного вскипания вещества, в образовавшемся канале возникает ударная волна, которая выносит жидкую фазу из полости канала наружу. При наличии парообразного состояния в канале происходит увеличение длины пробега электронов и, следовательно, дополнительный разогрев дна канала от электронной бомбардировки. Возможно также усиление нагрева из-за дополнительной фокусировки электронного пучка положительными ионами паров металла в канале. Процесс образования канала при действии столь большого числа сил

неустойчив. Экспериментально установлено, что паровой канал в зоне воздействия пучка периодически открывается за время порядка 1 мс. Весь процесс образования глубокого канала носит пульсирующий характер. Действие столь большого числа факторов не позволяет построить удовлетворительную модель формирования «кинжального» канала, поэтому приходится пользоваться в основном эмпирическими соотношениями.

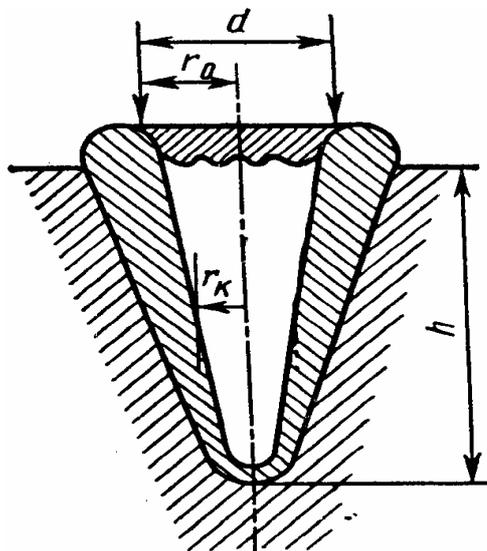


Рис. 3.4. Образование паро-плазменного канала при глубоком проплавлении

Контрольные вопросы

Что такое глубина проникновения электронов в твердое тело, чем она отличается от траекторного пробега?

От каких факторов зависит длина пробега электронов в твердом теле?

Почему при рассмотрении движения быстрых электронов в твердом теле можно использовать модель непрерывного торможения?

Как зависит траекторный пробег от плотности твердого тела?

Как зависит траекторный пробег от энергии первичных электронов?

Почему при движении в твердом теле диаметр электронного пучка увеличивается?

Сформулируйте феноменологическую диффузионную модель рассеяния электронов в твердом теле.

Почему максимум энерговыделения при электронной бомбардировке наблюдается не на поверхности, а на некоторой глубине?

Как влияет теплопроводность материала на распределение температуры по глубине проникновения электронного луча?

Как зависит глубина лунки при испарении от плотности материала?

Как зависит глубина лунки при испарении от теплоты сублимации материала?

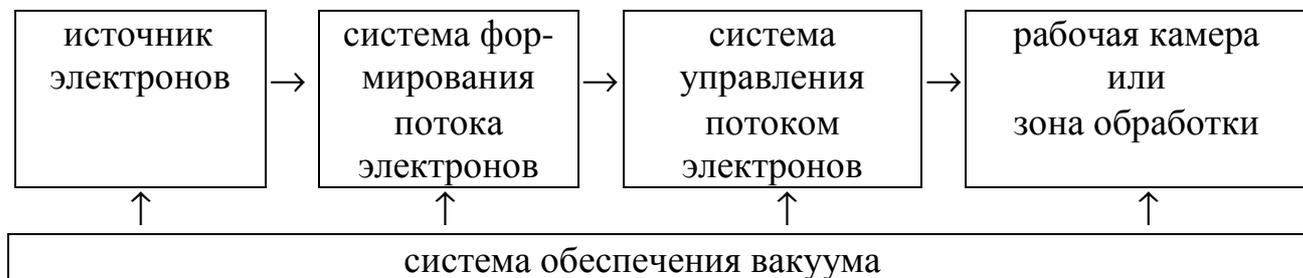
При каких условиях возникает режим кинжального проплавления?

Какие процессы протекают в канале при кинжальном проплавлении?

3.3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ УСТАНОВКИ

3.3.1. Общие принципы построения электронно-лучевых установок

Достаточно многочисленные электронно-лучевые установки имеют ряд одинаковых функциональных узлов. Укрупненная функциональная структурная схема технологической установки может быть представлена в следующем виде:



При большом разнообразии конструктивных исполнений общая компоновочная схема современной технологической установки для электронно-лучевой обработки содержит следующие функциональные узлы: генератор пучка (электронная пушка), систему транспортировки и управления пучка, устройство контроля и регулирования параметров потока электронов, вакуумную систему и технологическую камеру. В зависимости от требований реализуемого процесса в установках могут отсутствовать те или иные элементы, но в любом из них имеются источники электронов.

3.3.2. Источники электронов

Общий диапазон электронных потоков, используемых в технологии и аналитической технике, очень широк и составляет от сотен до 10^{-10} А.

Для генерации пучка электронов в вакууме используются различные физические явления: термоэмиссия, эмиссия под воздействием электрического поля высокой напряженности, вторичная электронная и фотоэмиссия, эмиссия из плазмы и т.д. Часто в одном типе электронного источника одновременно действуют несколько физических механизмов. Условно все типы эмиттеров можно подразделить на два больших класса: с геометрически фиксированной и подвижной эмиссионными границами.

К эмиттерам электронов с фиксированной границей относятся все термокатоды, ненакаливаемые "холодные" катоды: металлические автоэмиссионные, фотоэмиссионные, туннельные структуры МДМ, полупроводниковые структуры МДП. Плазменные источники электронов имеют подвижную эмиссионную границу.

Основные требования, предъявляемые к катодам электронно-лучевых установок, следующие:

- 1 - обеспечение требуемого электронного тока;
- 2 - устойчивость к ионной бомбардировке, долговечность работы;
- 3 - устойчивость и сохранение эмиссионной способности после многократных воздействий воздуха.

Из термокатодов наиболее полно удовлетворяют всем представленным требованиям только гексаборидлантановые катоды. В ряде случаев используются простые металлические термокатоды, в основном, вольфрамовые. Оксидные катоды и многочисленные эффективные термокатоды на основе системы вольфрам - барий неудобны для использования, так как барий на их поверхности быстро окисляется при взаимодействии с кислородом даже при комнатной температуре.

Общий электронный ток от выбранного типа катода определяется, в первую очередь, допустимой плотностью тока j и его эмиссионной поверхностью. При рабочих температурных режимах гексаборидлантанового катода, когда над эмитирующей поверхностью образуется пространственный заряд электронов, эмиссионный ток в вакуумном диоде оценивается по закону Ленгмюра:

$$I_L = G \cdot U_a^{3/2}, \quad (3.17)$$

где G - первеанс источника электронов; U_a - напряжение на аноде.

Металлические катоды промышленных установок чаще всего изготавливаются в виде V-образных проволочных или ленточных конструкций.

Основным источником для получения электронных потоков с большим значением плотности тока являются плазменные эмиттеры на основе тлеющего или дуговых разрядов. Плазменные эмиттеры находят применение в технологических установках с сильными электронными потоками. В этих эмиттерах площадь и форма эмиссионной границы определяется свойствами плазмы и условиями токоотбора. Плотность тока от плазменного источника рассчитывается по формуле:

$$j_e = \frac{1}{4} e \cdot n_e \cdot \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}}, \quad (3.18)$$

где T_e - температура электронного газа в К.

Если принять $T_e = 10^4$ К, $n_e = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ - концентрация электронов в плазме, то из плазменного источника можно получить токи с плотностью 10^3 А/см^2 , что в 10^3 раз больше, чем для рассмотренных твердотельных эмиттеров.

3.3.3. Электронные пушки

Преимуществом электронно-лучевой технологии является сравнительная легкость управления параметрами электронного луча с помощью специальных *электронно - оптических систем* (ЭОС). Как правило, эти системы формируют моноэнергетический пучок электронов, сфокусированный до достаточно малых поперечных размеров и направленный на выбранный участок объекта. Если необходимо увеличить площадь облучаемой поверхности, то такой пучок обычно разворачивают в растр или последовательно перемещают от участка к участку по заданной программе. Возможно и другое решение - использование ЭОС проекционного типа, создающих достаточно широкие электронные пучки с требуемым распределением плотности тока по сечению. Тип ЭОС, диапазон

ускоряющих напряжений, допустимый разброс по энергиям и углам вылета электронов, минимальный поперечный размер пучка и плотность электронного тока в каждом конкретном случае определяют с учетом целевого назначения электронно-лучевой установки.

Электронно-оптические системы содержат катод, фокусирующий электрод и анод с отверстием для вывода пучка. Чаще всего применяют генераторы пучков аксиального типа, в которых поток, а также электростатические и магнитные поля имеют осевую симметрию. Основное назначение электронной пушки - обеспечение на объекте обработки необходимой концентрации мощности электронного потока при заданном его размере. При движении электронного потока под действием собственного объемного заряда может происходить увеличение его поперечных размеров вследствие расталкивания электронов. Для оценки влияния объемного заряда используют первеанс электронной пушки, который представляет собой коэффициент пропорциональности в уравнении трех вторых:

$$G = I_{\text{л}}/U_{\text{а}}^{3/2}, \quad (3.19)$$

где $I_{\text{л}}$ - ток луча; $U_{\text{а}}$ - напряжение на аноде.

Считается, что если $G < 10^{-8}$ А/В^{3/2}, то влиянием объемного пространственного заряда можно пренебречь. В установках электронно-лучевой технологии применяются пучки с первеансом от 10^{-5} до 10^{-8} А/В^{3/2}. При этом в источниках с большим первеансом часто используют ионную самофокусировку луча, когда собственный отрицательный пространственный заряд потока компенсируется ионами остаточных газов.

Фокусировку электронных потоков обычно осуществляют с помощью магнитных, реже - электростатических линз. Короткофокусные магнитные линзы применяют для пучков с высокими плотностями тока при относительно небольших ускоряющих напряжениях. Фокусировку потоков с малой плотностью при ускоряющих напряжениях 100 - 200 кВ проводят длиннофокусными электростатическими линзами.

Для нетермической электронно-лучевой обработки применяют пушки с ускоряющими напряжениями 5 - 25 кВ, а иногда до 60 кВ и мощностью в пучке до нескольких десятков ватт. Система генерации пучков работает с игольчатыми катодами из вольфрама или гексаборида лантана. Диаметр пятна лежит в пределах от нескольких микрометров до 0,01 мм; плотность тока в пятне достигает 100 А/см² и выше. Электронно-оптические устройства оснащены двумя или тремя магнитными линзами. Вследствие необходимости сильного диафрагмирования ток пучка, попадающий на объект, в зависимости от диаметра пучка уменьшается до 1 мкА - 1 нА и даже меньше. Управление электронным пучком во времени производят с помощью электростатических запирающих пластин, имеющих время включения 0,1-0,01 мкс. Для отклонения электронных пучков используются преимущественно магнитные устройства.

3.3.4. Система обеспечения вакуума

Следует иметь в виду, что на пути к поверхности объекта первичные электроны могут терять энергию и изменять направление движения из-за рассеяния на частицах окружающей среды. Число актов рассеяния на частицах определенного сорта пропорционально концентрации этих частиц, сечению соответствующего процесса и протяженности электронного потока. Поэтому рассматриваемый эффект особенно существен, если в электронно-лучевой установке поддерживается недостаточно высокий вакуум или если сама электронная бомбардировка сопровождается интенсивным выделением газов и паров. Типичные значения эффективных сечений соударения электронов с атомами и молекулами газов и паров в диапазоне энергий $10^2 - 10^4$ эВ составляют $10^{-17} - 10^{-15}$ см². Это означает, что при давлении остаточных газов 1 Па на каждом метре пути электрон испытывает в среднем от одного до ста таких соударений. Таким образом, для того, чтобы не менее 99% электронов доходили до поверхности без нежелательного взаимодействия с атомами окружающей среды, необходимо поддерживать давление остаточных газов в установке на уровне $10^{-2} - 10^{-4}$ Па и ниже. Отметим, что столкновения электронов с атомами газообразной окружающей среды в ряде случаев оказываются полезными. Так, ионизацию газа электронным ударом используют в некоторых типах ионных источников, при ионной фокусировке мощных электронных пучков, в газоразрядных приборах, в вакуумной технике для получения и измерения вакуума и т.п.

Для процессов с малой чувствительностью в рабочем пространстве достаточен вакуум около 10^{-3} Па при полном отсутствии паров масла. При работе с фотокатодами во избежание отравления вакуум в прикатодном пространстве должен быть порядка 10^{-5} Па при полном отсутствии паров масла и органических веществ; при применении автоэмиссионных катодов необходимо разрежение до 10^{-7} Па.

3.3.5. Система сканирования

Нередко ставится задача произвести обработку по уже имеющимся на пластине структурам. Ее решение требует сканировать пучок относительно заготовки с точностью порядка сотой доли наименьшего размера наименьшего элемента структуры, то есть доходящей до 0,01 мкм. В этом случае перемещение электронного пучка по мишени осуществляют с помощью электронно-оптических систем. Такое сканирование проводится обычно в сравнительно небольшом интервале расстояний от 1 до 1000 мкм. Для перемещения образца на расстояния более 0,1-1 мм применяются механические системы. Для снижения затрат на механическую часть в большинстве случаев заготовку перемещают с допусками на точность установки 1-10 мкм. Остаточную погрешность механического позиционирования измеряют либо лазерным интерферометром, либо методом самопозиционирования пучка. Предпочтение отдается самопозиционированию, поскольку оно позволяет существенно ослабить требования к длительной стабильности пучка. Кроме того, заготовку на

рабочем столе при этом достаточно установить с таким допуском, который соответствует радиусу действия системы самопозиционирования.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные узлы типовой электронно-лучевой установки.
2. Какие эмиссионные явления используются в источниках электронов ЭЛУ?
3. Какие требования предъявляются к источнику электронов в ЭЛУ?
4. Какие виды термокатодов наиболее полно удовлетворяют требованиям?
5. Почему в электронно-лучевых установках практически не используются эффективные термокатоды на основе системы вольфрам - барий?
6. В чем специфика плазменных источников электронов?
7. Какие из электронных источников обеспечивают наиболее высокие плотности тока?
8. Какие требования предъявляются к электронно-оптической системе ЭЛУ?
9. Как учитывается влияние объемного заряда при формировании электронных пучков?
10. Какие типы линз предпочтительны при формировании мощных низкоэнергетичных электронных пучков?
11. Какие типы линз предпочтительны при формировании маломощных высокоэнергетичных электронных пучков?
12. Сформулируйте условия выбора рабочего давления в электронно-лучевой установке.
13. Почему в ЭЛУ нежелательно применение масляных насосов?
14. Перечислите способы управления электронным лучом в ЭЛУ.
15. Какова чувствительность сканирования электронного пучка с использованием электрических полей?

3.4. ТЕРМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Чаще всего для технологической обработки используют различные тепловые эффекты, сопровождающие электронную бомбардировку. В этом случае, как правило, необходимо нагреть облучаемый участок до очень высоких температур, что возможно только при достаточно большой удельной мощности пучка.

Таблица 3.2.

Параметры электронного пучка при электронно-лучевой обработке

Виды обработки	Энергия электронов, кэВ	Радиус электронного пучка, мкм
нетермическая	250	0,01-10
хим. электронно-лучевая	5000	5-150
плавка	40	5-25
испарение	40	1-15
сварка	175	0,05-3
термическая размерная	150	2-50

Диапазоны мощности и удельной мощности пучка, используемые в основных процессах электронно-лучевой технологии, приведены в табл. 3.2.

3.4.1. Электронно-лучевое испарение материалов (ЭЛИ)

В традиционных способах испарения материалов тепловая энергия подводится к испаряемой поверхности через стенку тигля. Метод ЭЛИ позволяет проводить прямой нагрев поверхности, что дает возможность применять водо-охлаждаемые тигли и, таким образом, исключать взаимодействие испаряемого материала со стенками. В настоящее время ЭЛИ заметно потеснило другие способы термического испарения и широко применяется для решения самых разнообразных задач - от производства тонкопленочных элементов в микроэлектронике до промышленной металлизации бумаги и антикоррозионной защиты стальных лент.

Принцип ЭЛИ поясняет рис.3.5. Поверхность испаряемого материала, помещенного в водоохлаждаемый тигель, разогревается электронным пучком до такой температуры, когда она становится источником пара. В потоке этого пара помещают подложку, на которую производят напыление. Испаритель оборудован средствами контроля и измерения, необходимыми для управления параметрами пучка в ходе испарения. Предусмотрен также ряд вспомогательных устройств: подогреватель подложки, заслонка для перекрытия потока пара, загрузочное приспособление для подачи материала в тигель.

Независимо от мощности установки, в диапазоне от 3 до 250 кВт для испарения применяют пучки с удельной мощностью $10^4 - 10^5$ Вт/см², так как при $P > 10^5$ Вт/см² у многих материалов начинается недопустимое разбрызгивание расплава. Чтобы катод не попадал под прямой поток пара, а сама пушка не затеняла рабочее пространство над тиглем, как правило, используют электромагнитное отклонение пучка.

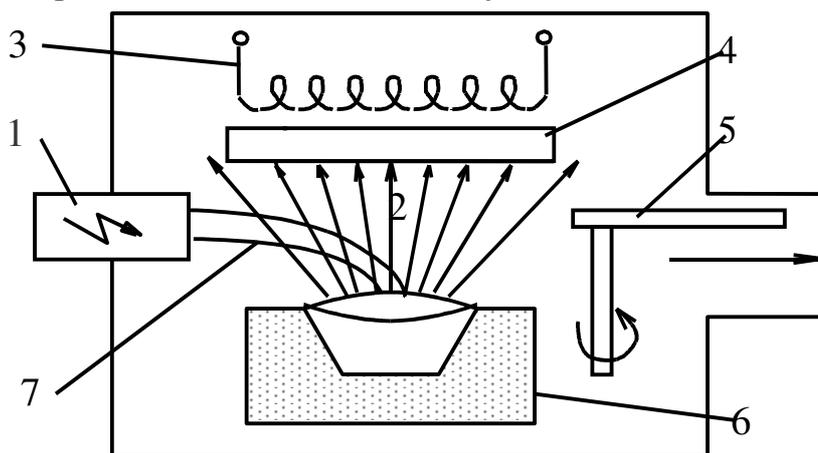


Рис.3.5. Схема осуществления электронно-лучевого испарения

Так как водоохлаждаемый тигель практически не реагирует с испаряемым веществом, то из одного и того же тигля можно испарять различные материалы. Для получения многослойных покрытий используют несколько тиглей, которые поочередно подвергают воздействию

электронного пучка по заданной программе. При высоких скоростях испарения и большом расходе материала необходимо непрерывно пополнять его запасы в тигле.

Для получения особо чистых плёнок при ЭЛИ возможен бестигельный вариант испарителя. В простейшем случае материал можно испарять из жидкой лунки на поверхности массивного слитка. Для сублимирующихся материалов в качестве испарителя обычно используют заготовку в виде стержня или штабика, непрерывно перемещающегося под пучком. Наконец, если не требуются высокие скорости испарения, возможно нанесение покрытия из капли расплава, висящей на торце облучаемого электронами штабика.

Ожидаемое распределение толщины напыляемой плёнки вдоль её поверхности можно оценить, если известно пространственное распределение плотности потока пара, исходящего из испарителя. Для точечного испарителя распределение плотности пара по углам вылета изотропно: $\Phi_{(\theta)} = \text{const}$. Такое приближение, однако, справедливо только при бестигельном испарении из расплавленной капли. Большой интерес представляет характер распределения $\Phi_{(\theta)}$ для пара, испускаемого плоским элементом поверхности, которое, как известно, подчиняется закону $\Phi_{(\theta)} = \Phi_0 \cos \theta$ (θ - угол, отсчитываемый от нормали к поверхности). Однако, и это приближение не всегда отражает реальную картину, так как при используемых удельных мощностях P_e поверхность расплава редко остается плоской. Обычно под действием пучка на поверхности образуется кратер, глубина которого увеличивается с ростом P_e . В результате диаграмма направленности потока пара сужается и, как показывает опыт, при $\theta < 30^\circ$ может быть приближенно описана выражением

$$\Phi_{(\theta)} = \Phi_0 (\cos \theta)^m, \quad (3.20)$$

где $m > 1$ и возрастает с ростом P_e .

Если на расстоянии R_f от источника параллельно его поверхности поместить плоскую подложку (рис.3.6), то зная $\Phi_{(\theta)}$, можно рассчитать толщину наносимого слоя в любой выбранной точке. Действительно, в плоскости подложки интенсивность потока пара, убывающая при удалении от испарителя обратно пропорционально квадрату расстояния, составляет $\Phi_{(\theta)} \cdot \cos^2 \theta / R_f^2$. Так как этот поток падает на подложку под углом θ , то на расстоянии r_f от нормали к испарителю толщина пленки

$$d_\theta = d_0 \frac{\Phi_\theta}{\Phi_0} \cos^3 \theta = d_0 (\cos \theta)^{m+3} = \frac{d_0}{\left[1 + (r_f / R_f)^2\right]^{(m+3)/2}}, \quad (3.21)$$

где d_f и d_0 - толщина плёнки при $\theta = \arctg(r_f/R_f)$ и при $\theta = 0$ соответственно.

Согласно (3.21) относительное изменение толщины вдоль слоя тем больше, чем больше показатель степени m (а, следовательно, и удельная мощность P_e):

$$\Delta d_\theta / d_\theta = (m + 3) \text{tg} \theta \Delta \theta. \quad (3.22)$$

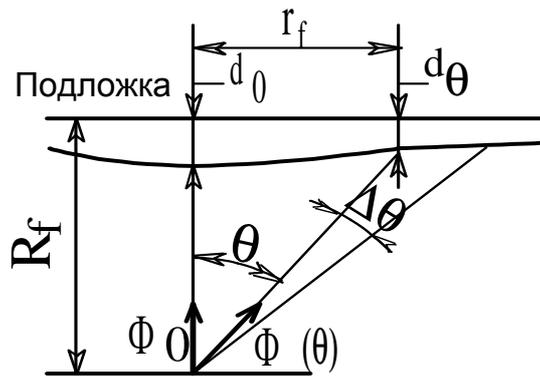


Рис. 3.6. Определение толщины слоя по угловому распределению плотности потока пара

При заданных требованиях к однородности толщины слоя формула (3.22) определяет максимально допустимый угловой размер подложки θ_{\max} . Если ввести коэффициент использования материала f_m , равный той части общей массы испарённого материала, которая достигла подложки, то для точечного испарителя

$$f_m = 1 - (\cos \theta_{\max})^{m+1}. \quad (3.23)$$

Если задать $\Delta d/d = 5\%$, то даже при $m = 1$ максимальный угол, согласно (3.22), не должен превышать $6,5^\circ$. Тогда из (3.25) имеем $f_m = 1,3\%$. Таким образом, в случае точечного испарителя трудно обеспечить удовлетворительную равномерность слоя на достаточно большой поверхности, кроме того, коэффициент использования материала мал.

Чтобы получать при термическом испарении однородные по толщине плёнки большой площади, можно использовать, например, развёртку электронного пучка по поверхности широкого тигля или непрерывно перемещать подложку относительно испарителя.

3.4.2. Нанесение покрытий из сплавов и химических соединений

При одной и той же температуре скорости испарения различных веществ могут сильно отличаться. Это существенно затрудняет термическое получение покрытий сложного состава, в которых необходимо выдерживать заданное соотношение между различными компонентами.

Подобные слои можно наносить из многотигельного испарителя, в котором компоненты испаряются порознь (каждый из своего тигля), а конденсируются на подложке совместно. Для получения покрытий с неизменным составом в этом случае, однако, требуется чрезвычайно высокая точность регулировки температуры. Например, при нанесении никелевых сплавов изменение T всего на 10 градусов приводит к изменению содержания Ni в покрытии на 10%. Поэтому гораздо чаще на практике используется схема ЭЛИ с одним тиглем, содержащим все необходимые материалы. Чтобы состав плёнки при этом не менялся, необходимо производить непрерывную подпитку тигля, причем скорость поступления каждой компоненты должна быть равна скорости её расхода за счет испарения. Поэтому подпитывающий

материал должен иметь такой же точно состав, как и тот, который нужно получить в плёнке. Обычно в тигель сначала загружают материал такого состава и в ходе испарения добавляют его с требуемой скоростью. Нанесение плёнок из сплавов с постоянной подпиткой расплава ограничено интервалом температур, в котором давление паров компонент различается не более чем на три порядка. Методом электронно-лучевого испарения можно получать покрытие из труднолетучих и тугоплавких материалов: Al_2O_3 , SiO_2 , стёкол, карбидов, но при этом наблюдается повышенная диссоциация.

Для приготовления плёнок химических соединений помимо описанных способов, используется реактивное нанесение, при котором в процессе испарения и конденсации материала происходит его химическое взаимодействие с введённым в объем газообразным реагентом.

Особенно широкое применение находит электронно-лучевое нанесение плёнок в микроэлектронике, где используется большая номенклатура самых различных материалов. Плотность мощности на поверхности бомбардируемых мишеней выбирают в диапазоне от 10^4 до 10^7 Вт/см² при скорости испарения от 10^{-5} до 10^{-2} г/(см²с).

При ЭЛИ электронный КПД определяется при переносе мощности, которые в электронно-лучевых испарителях могут быть весьма значительными ввиду сравнительно высокого давления пара. Тепловой КПД зависит от того, какая часть перешедшей в теплоту мощности тратится полезно, т.е. в случае ЭЛИ идёт на нагрев испаряемого материала и его испарение.

Для испарителей средней мощности с небольшим тиглем, который хорошо отводит теплоту, тепловой КПД не превышает обычно несколько процентов. Кроме того, в таких устройствах трудно регулировать скорость испарения, так как возможны неконтролируемые изменения теплового контакта капли раствора с тиглем и, как следствие, колебания температуры расплава при постоянной подводимой мощности. Поэтому использовать небольшие водоохлаждаемые тигли имеет смысл лишь тогда, когда затраты энергии не играют существенной роли, и требования к постоянству скорости испарения невелики.

В испарителях большой мощности проблема экономии энергии становится весьма актуальной. Поэтому в этих случаях обычно используют режимы с высокой температурой испарения поверхности (так как скорость испарения растёт с повышением температуры гораздо быстрее, чем тепловые потери). Тепловой КПД в таких устройствах может быть близок к 100%. Полный КПД установки при этом увеличивается не столь заметно, так как с ростом скорости испарения возрастает и доля мощности, теряемой в оболочке пара. Кроме того, при его расчете необходимо учитывать и коэффициент использования материала, который обычно существенно меньше единицы.

Наиболее полно удовлетворяют высоким требованиям к скорости распыления, чистоте плёнок, эксплуатационной надёжности при длительных стационарных режимах установки с аксиальными пушками. Однако они

сложны по конструкции и дороги. Наибольшее распространение получили системы с поворотом электронного потока на угол $180 - 270^\circ$. В испарителях с поворотом электронного потока силовые линии магнитного поля в области его прохождения имеют выпуклую форму. В результате происходит сжатие ленточного луча в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка. Поперечная фокусировка трансформирует луч ленточной формы вблизи поверхности расплава в поток с сечением, близким к круговому. Плотность мощности возрастает. Её регулирование можно осуществить изменением $U_{\text{уск}}$ и напряжением $U_{\text{ф}}$ на модулирующем электроде пушки. Мощность встраиваемых в установки излучателей не превышает 15 кВт.

В промышленных электронно-лучевых испарителях типа ИЭЛ-2, ИЭЛ-3, ИЭЛ-5 трех электродный электронный прожектор генерирует через щели ленточный пучок, который в секторном магнитном поле поворачивается на углы от 90 до 180° .

Для получения равномерных покрытий подложки размещают на поверхностях с равной плотностью пара. Перемещают подложки относительно парового потока, например, закрепляя их на плоском держателе, наклонённом к оси испарителя и оснащённом планетарным приводом. Целесообразно применять источники пара с большой площадью испарения.

Возникновение паро-плазменного состояния над испаряемым веществом открывает новую возможность технологического использования электронного потока - проведение ионного плакирования материалов. Подавая на подложку отрицательный потенциал порядка 100 В и помещая тигель в магнитное поле, при мощности электронного луча 14 кВт и давлении паров $7 \cdot 10^{-2}$ Па на подложке удаётся получать плотности ионного тока до 100 мА/см². Специальные конструкции плазмотронов для ионного плакирования с электронно-лучевым разогревом материала работают при ещё больших плотностях ионных токов.

Весьма актуальной проблемой современной электроники, в особенности криоэлектроники, является получение плёночных покрытий с ничтожно малыми концентрациями загрязняющих посторонних примесей. Одним из источников их возникновения являются остаточные газы самой вакуумной системы. Хотя электронно-лучевое испарение из-за высоких скоростей процесса позволяет наносить покрытие за малые времена, целесообразно рассматривать возможности снижения парциального давления остаточных газов в технологической камере.

Одно из решений - обеспечение работы устройства по схеме "вакуум в вакууме". Метод квазизамкнутого объёма позволяет реализовать эту схему. Для конденсации плёнок в квазизамкнутом объёме внутри промышленной технологической камеры монтируют тонкостенную съёмную дополнительную камеру. В ней выполнено отверстие малой газовой проводимости для транспортировки внутрь объёма электронного пучка. После начальной откачки основной технологической камеры до 10^{-3} Па включается электронный поток, который испаряет геттерирующий материал

внутри дополнительной камеры. Конденсация плёнки гетера на внутренних стенках её сопровождается улучшением вакуума на 2-3 порядка по сравнению с вакуумом в основной камере. Производительность процесса увеличивается в 5 - 10 раз, так как длительность всего процесса откачки сокращается до 1,5 - 2 часов. После достижения необходимого вакуума поворачивают заслонку и напыляют плёнку на рабочую подложку. Метод позволил получить ниобиевые плёнки с малыми количествами загрязнений, пригодные для применения в криоэлектронных устройствах.

В серийных установках напыления плёнок оценку максимально допустимого остаточного давления газа можно провести по соотношениям частот столкновений атомов газа v_{Γ} и пара v_{Π} с единицей поверхности подложки. Если предположить, что остаточный газ по свойствам близок к воздуху при температуре 293 К, то

$$\frac{v_{\Gamma}}{v_{\Pi}} = 55,5 \frac{M_p \cdot p_{\Gamma}}{\rho V_k}, \quad (3.24)$$

где v_{Γ} и v_{Π} - частоты столкновений атомов газа и пара, приходящихся на единицу поверхности, $1/(m^2 \cdot c)$; M_p - массовое число частиц пара; p_{Γ} - давление газов в технологической камере, Па; ρ - плотность испаряемого материала, $г/см^3$; V_k - скорость конденсации слоя покрытия, $нм/с$.

Задаваясь скоростью конденсации и давлением газа в установке при нанесении выбранного типа покрытия, оцениваем отношение частот столкновений. Если поток молекул остаточных газов в течение процесса конденсации паров в 15-20 раз меньше, чем поток паров, то такое напыление будет эквивалентно высоковакуумному.

Следовательно, необходимо использовать высокоскоростные процессы, реализуемые в импульсных режимах работы электронно-лучевых испарителей. Импульсное напыление на частотах 100-1000 Гц даже при форвакуумном давлении $10 \cdot 10^{-1}$ Па по результатам эквивалентно нанесению плёнок в вакууме порядка $10^{-6} - 10^{-7}$ Па. Импульсный режим способствует образованию сплошной плёнки при меньшей её толщине, а также лучшему сохранению состава исходного сплава.

Типовой режим для установки с электронной пушкой мощностью 3 кВт: ускоряющее напряжение 20 кВ; плотность мощности 10^5 Вт/см²; частота следования импульсов 100 Гц при их длительности 10^{-3} с; скорость конденсации плёнки 1-3 мкм/с, за один импульс испаряется около $10^{-5} - 10^{-6}$ г массы.

Такие режимы могут быть осуществлены на различных электронно-лучевых отечественных установках, в частности ЭЛУ-9, А.306.9, А306.13. Максимальный ток пучка в них составляет 200 мА при регулируемом до 25 кВ ускоряющем напряжении. Частота следования импульсов устанавливается в диапазоне от 7 до 20 Гц, их длительность регулируется от 1 до 50 мс. Диаметр фокального пятна 0,3 – 0,5 мм. Перемещение подложек осуществляют с помощью специального электромеханического привода.

Промышленные установки типа УВН-73П-1 предназначены для групповых методов нанесения плёнок на подложки больших размеров. Для контроля и управления процессом напыления установки типа "Оратория-9" с мощностью испарителя 10-15 кВт оснащены аналоговыми вычислительными машинами.

Нанесение металлических и диэлектрических покрытий осуществляют также на установках УРМ.3.279.011, имеющих пушку мощностью 3 кВт с током луча 300 мА и ускоряющим напряжением 10 кВ. Электронный поток в них имеет поворотную траекторию.

3.4.3. Обработка несфокусированным пучком

Нагрев несфокусированными потоками электронов используется, в основном, для обезгаживания материала деталей, рекристаллизации пленочных композиций перед механической обработкой в вакууме или диффузионной сваркой. Эти процессы целесообразно проводить в вакуумных устройствах больших объемов с вмонтированными в камеры ленточными или проволочными катодами. Обычно катоды устанавливаются по окружности вокруг изделия, на которое подается напряжение. При отключенном анодном напряжении возможен нагрев излучением от термокатодов и предварительное обезгаживание деталей. Нагрев электронной бомбардировкой осуществляется при ускоряющих напряжениях до 10 кэВ.

Переплав используется в технологии особо чистых материалов, а также материалов, обладающих повышенной химической активностью. Металлы в результате вакуумного переплава очищаются от легколетучих примесей, в них снижается концентрация растворенных газов, а пластичность повышается.

В отличие от высокочастотного переплава, при электронном переплаве уменьшается вероятность загрязнения примесями. В установках с несколькими пушками можно переплавлять несколько металлов одновременно, получая сплав требуемого состава. В технологических системах с катодом в виде кольца, внутри которого размещается переплавляемый слиток, можно осуществить очистку материала методом зонного переплава. Концевые участки слитка, обогащенные примесями, удаляют. В результате вакуумного зонного переплава концентрация примесей в полупроводниковых материалах может быть снижена до 10^{-6} - 10^{-7} атомных процентов. При обработке многокомпонентных сплавов на основе железа наблюдается относительное увеличение в них содержания W, Mo, V, Si вследствие их меньших скоростей испарения по сравнению с железом, тогда как концентрация Cu и Mn в переплавленном материале уменьшается.

Электронная плавка используется также для выращивания монокристаллов по методу Чохральского и Вернейля. По первому методу из расплава с определенной температурой, поддерживаемой бомбардировкой электронами, вверх с помощью предварительно ориентированной затравки

вытягивают монокристаллический слиток. В бестигловом методе Вернейля материал в виде порошка подается на поверхность расплава. Эта поверхность непрерывно разогревается электронной бомбардировкой. Монокристалл вытягивается вниз со строго контролируемой скоростью.

3.4.4. Электронно-лучевая обработка

Электронно-лучевые процессы реализуются при воздействии сфокусированного электронного луча на материал. При этом материал можно располагать не только в плоскости наименьшего сечения луча. Изменение поперечного сечения луча вне плоскости фокусировки зависит от расстояния z от этой плоскости:

$$d^2(z) = d_0^2 + 4\alpha^2 \cdot z^2, \quad (3.25)$$

где α - апертура луча.

Так, при $\alpha = 10^{-2}$ уже на расстоянии 50 мм диаметр пучка увеличивается на 1 мм, это позволяет уменьшить плотность мощности на объекте обработки.

Сварка электронным пучком

Особенностью электронно-лучевой сварки является возможность получения очень высоких локальных плотностей тепловой энергии при сравнительно небольшом тепловложении. Это позволяет получать сварные соединения таких материалов, которые не свариваются традиционными методами. Области применения электронно-лучевой сварки очень велики - от сварки корпусов ракет до присоединения контактов в микросхемах.

Процесс сварки можно вести при низком ускоряющем напряжении (до 30 кВ), среднем (до 80 кВ) и высоком (до 200 кВ). Электронный пучок на поверхности стыка материалов фокусируют в пятно диаметром от 0,1 мм до нескольких миллиметров, что при мощности сварочных пушек 1—100 кВт позволяет достигать плотностей мощности $q = 10^5 - 10^7$ Вт/см².

Изменяя параметры процесса, можно получать различные соотношения глубины h проплавления к ширине d шва. По значению этого соотношения различают следующие режимы сварки: мягкий ($h \ll d$), переходный ($h \approx d$), жесткий ($h > d$), с «кинжальным» проплавлением ($h \gg d$). Глубокое проплавление достигается при относительно малом вводе тепловой мощности в материал.

Простота управления параметрами пучка во времени и пространстве позволяет реализовать как непрерывную, так и импульсную обработку; выполнять швы сложной конфигурации. Выбор режима сварки зависит от теплофизических свойств материалов, конструкции сварного соединения и требуемой геометрии зоны проплавления.

Для формирования шва сфокусированный электронный пучок должен перемещаться вдоль линии соединения с определенной скоростью v . При непрерывном процессе сварки чаще всего соблюдают соотношение $h/d = 1$. Глубина проплавления при низких и средних ускоряющих напряжениях зависит от мощности пучка. Если пренебречь рассеянием электронов в парах

материала, то сила тока луча и ускоряющее напряжение примерно одинаково влияют на глубину проплавления. При высоких ускоряющих напряжениях значительная часть мощности расходуется на ионизацию паров в области кратера проплавления.

При транспортировке пучка к свариваемым материалам электроны соударяются с молекулами остаточных газов и паров материала и рассеиваются. Значительное расширение луча наблюдается уже при давлении 1—10 Па. При числах соударений $v_e > 20$ происходит уменьшение отношения h/d , а при $v_e \approx 10^4$, электроны рассеиваются под углом более 10° к первоначальному их направлению, и сварку осуществлять уже невозможно. Поэтому в сварочных камерах поддерживают вакуум $p < 10^{-2}$ Па.

Однако при ускоряющих напряжениях более 125 кВ и расстоянии от выходного отверстия пушки до детали в несколько миллиметров можно выполнять сварку с отношением $h/d = 1 - 5$ даже при атмосферном давлении. Установлено, что при силе тока пучка, выходящего в атмосферу, порядка 30 мА плотность газа в области потока электронов снижается в 8 раз - в результате возможно подведение к поверхности материала потока электронов с достаточной для сварки плотностью.

Одной из проблем сварки является требование ограничения степени закалки и предотвращения появления закалочных трещин. Для этого необходимо снизить скорость нагрева (dT/dt), например, предварительно подогреть области, прилегающие к будущему шву, до температуры 150 – 400 °С. Подогрев можно проводить расфокусированным электронным потоком, сканируя им вдоль и поперек шва и создавая тепловые поля с необходимыми характеристиками. При этом используют пилообразную, меандровую, круговую или синусоидальную развертку.

Для полного или частичного восстановления свойств исходного материала в зоне шва в качестве заключительной операции проводят термический отжиг, технологически осуществляемый так же, как и предварительный подогрев. Выполнение сварных швов со сложными траекториями требует использования специальных поворотных столов, позволяющих перемещать детали в разных направлениях с определенными скоростями.

Особый интерес представляет проведение сварки с глубоким, так называемым «кинжальным» проплавлением, когда можно достичь отношения $h/d = 40$. Этот режим характеризуется большими ускоряющими напряжениями и плотностями мощности $q > 10^7 - 10^8$ Вт/см². Так как глубина проникновения электронов в материал пропорциональна $U_{\text{уск}}$, то основное выделение энергии происходит под поверхностным слоем. Перегрев в глубине материала не компенсируется отводом теплоты за счет теплопроводности. Поэтому возникает пароплазменный канал с высоким давлением пара. Давление пара определяется температурой и может достигать значений от нескольких сотен до тысяч Паскалей в зависимости от вида материала.

Канал с радиусом R_k периодически перекрывается жидкой пленкой,

сквозь которую электроны пучка проходят с малыми потерями (см. рис. 3.4). Энергия потока электронов затрачивается, в основном, на испарение материала у основания канала - в результате в нем еще более возрастает давление паров. Непосредственно после вскипания материала концентрация частиц пара возрастает до 10^{16} - 10^{18} см⁻³. Она достигает критического значения, вызывая разрыв пленки, когда часть парового потока ионизируется, и становятся возможными электронно-плазменные взаимодействия. Результатом этих взаимодействий, как и многократных упругих взаимодействий электронов, является размытие потока и рассеяние электронов на боковые стенки. При рассеянии их до 90-95 % от общего потока энергии пучка тратится на образование жидкой фазы. Жидкая фаза вытесняется вверх реактивной силой паров и снова замыкает канал в его верхней части. Вследствие периодичности процессов внутри канала наблюдается волнообразный характер его сечения по глубине. При критическом давлении пара перед разрывом пленки пучок отдает в вещество наибольшую энергию, зона теплового воздействия расширяется.

На определенном этапе рассматриваемого процесса может проявляться эффект ионной фокусировки электронного пучка, когда ионизированная паровая компонента действует как электростатическая линза.

Определить значение критического давления $p_{кр}$ можно из равенства сил, действующих на жидкую пленку (силы давления паров и силы поверхностного натяжения), тогда $p_{кр} = 2\sigma/R_0$, где R_0 - радиус жидкой пленки на поверхности; σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Расчеты для расплава железа показывают, что при $\sigma=1,5$ Н/м величины $R_0=1,5 \cdot 10^{-4}$ м; $p_{кр} \approx 20$ кПа (≈ 150 мм рт.ст.). Если рассмотреть пленку над паровым каналом в состоянии динамического равновесия, то можно оценить температуру T_k внутри канала по измеряемой температуре жидкой пленки $T_{п}$:

$$T_{п} = T \cdot \left[\alpha \cdot p_{гп} / (2p_{ПАР})^2 \right]^2, \quad (3.26)$$

где коэффициент α учитывает геометрию и изменяется в зависимости от величины h^2 по закону косинуса; $p_{ПАР}$ - давление паров материала при соответствующей температуре пленки.

Ориентировочные расчеты подтверждают, что при температуре поверхностной пленки $T = 2400$ °С на дне канала глубиной $h = 10$ мм должны периодически достигаться температуры $T \approx 4900$ °С, т.е. выше температуры поверхности на 2500 °С .

В режиме «кинжального» проплавления ширина швов b уменьшается пропорционально величине $\sqrt{U_{уск}}$. Если приближенно считать сечение канала постоянным, то изменение глубины h плавления при изменении ускоряющего напряжения можно рассчитать по формуле

$$h_2 = h_1 \sqrt{U_{уск1} / U_{уск2}}, \quad (3.27)$$

откуда

$$\frac{h_1 / b_1}{h_2 / b_2} = \frac{U_{\text{уск1}}}{U_{\text{уск2}}} . \quad (3.28)$$

В некоторых технологических процессах весьма существенным может оказаться тепловое воздействие на области, примыкающие к «кинжальному» каналу. В этих граничных областях возникают высокие градиенты температуры, а тепловая волна имеет малую протяженность. С целью снижения температуры нагрева прилегающих областей целесообразно использовать импульсные режимы обработки.

При скважности импульсов $G \approx 0,1$ наблюдается слабое образование жидкой фазы, и процесс проплавления может перейти в процесс образования отверстия. Изменяя скважность в пределах $G = 0,25 - 1$, можно регулировать количество жидкой фазы и изменять температурное поле в прилегающих к шву областях.

3.4.5. Термическая размерная электронно-лучевая обработка

К термической размерной электронно-лучевой обработке относится группа способов микрообработки, при которых в результате локального нагрева, плавления или испарения материала происходит перестройка структуры или изменение формы облучаемого участка. Примерами такой обработки могут служить получение отверстий или пазов с заданным профилем, бесконтактная резка дефицитных и труднообрабатываемых материалов, фрезерование, полировка и т.д. Главная особенность размерной электронно-лучевой обработки заключается в том, что ее ход и результаты определяются не механическими свойствами материала, как при традиционных способах, а его теплофизическими свойствами. Это изменяет характер обработки, а иногда (например, для хрупких, пластичных и твердых материалов) расширяет ее технологические возможности.

Размерная обработка материалов выполняется с помощью сфокусированных потоков электронов с плотностями мощности $q > 10^6 - 10^8$ Вт/см². Этот вид обработки используется для формирования планарных изображений, подгонки номиналов элементов тонкопленочных схем, обработки изделий микроэлектроники на основе ряда материалов: Si, Ge, керамики, ферритов, керметов и т.д. Мощность установок для этих целей в непрерывном режиме обычно не превышает 1 кВт, а в импульсном - 15 кВт. Длительность импульсов выбирают в диапазоне 0,1 мкс - 1 мс, реализуя моноимпульсный или многоимпульсный режим. Результат размерной обработки зависит от теплофизических свойств материала (температуры плавления, теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности). Профиль канала обработки и его диаметр определяют выбором параметров процесса (плотности мощности q , длительности импульса $t_{\text{имп}}$, тока импульса $I_{\text{и}}$ и положения фокуса относительно поверхности).

3.4.6. Размерная обработка массивных образцов

В основе термической обработки лежат процессы уноса материала в результате испарения, взрывообразного выброса расплава или квазисублимации. Вместе с тем для обработки материалов, обладающих специфическими свойствами, можно использовать их непосредственный переход из твердой фазы в газообразную или удаление продуктов их разложения при последующем травлении в агрессивной среде. Достаточно широко применяют также способы обработки, основанные на тепловых превращениях при кратковременном локальном перегреве и последующем быстром остывании облученного участка. Короткое время пребывания материала в нагретом состоянии способствует существенному изменению микроструктуры обрабатываемой области (например, уменьшению размеров зерен, отжигу дефектов, разрушению сегрегаций и т.д.) и часто сопровождается появлением у материала нужных физико-химических свойств.

Все процессы, лежащие в основе различных методов термообработки, интенсивно протекают лишь при нагреве до температур, превышающих некоторое пороговое значение. Поэтому геометрия обработки определяется, в основном, той граничной поверхностью в объеме образца, на которой достигнута пороговая температура. Чтобы локализовать эту область, необходимо свести к минимуму распространение теплоты за ее пределы, т.е. обеспечить малую продолжительность воздействия электронного пучка в каждой точке. Для этого часто используют импульсный режим облучения. Можно также непрерывно перемещать пучок вдоль поверхности по заданному контуру обработки с достаточно большой скоростью.

Современное состояние технических средств позволяет получать при термической размерной обработке поверхности шероховатостью около 5 мкм и допусками на размеры ± 5 мкм.

3.4.7. Размерная обработка тонких слоев

Для многих отраслей промышленности и в первую очередь, для микроэлектроники особый интерес представляет возможность размерной обработки пленок и покрытий, толщина которых не превышает 10-100 нм. Задачей такой обработки является селективное удаление отдельных участков пленки без заметного повреждения подложки. Добиться этого не так просто, так как даже при использовании минимально возможных для размерной обработки ускоряющих напряжений (20 - 50 кВ) глубина проникновения электронов значительно превосходит толщину пленки, и основная часть тепловой мощности выделяется именно в подложке.

Рассмотрим, что происходит на поверхности пленочной системы при увеличении удельной мощности электронного пучка. До тех пор, пока эта мощность не превышает некоторого предела, нагрев образца еще не сопровождается уносом материала и может приводить лишь к различным фазовым переходам в пленке или подложке. При дальнейшем росте

температуры материал пленки начинает плавиться. Если расплав плохо смачивает подложку, он начинает растекаться под действием сил поверхностного натяжения, собираясь в капли. Этот эффект можно использовать для размерной обработки, однако качество такой обработки будет невысоким из-за наростов застывших расплавов на поверхности. Если еще больше увеличить подводимую энергию, то испарение расплавленного материала будет происходить до того, как он успеет собраться в капли, что предпочтительнее для размерной обработки, поскольку дальнейшее повышение мощности сопровождается испарением материала подложки.

Как и при обработке массивных образцов, для выполнения условий квазиadiaбатичности нагрева используют либо импульсный режим, либо быстрое перемещение луча вдоль поверхности по заданному рисунку. Последний способ применяется гораздо чаще, так как им можно обрабатывать большие участки поверхности с высокой скоростью. Размер полей отклонения пучка в установках, предназначенных для обработки пленок, значительно больше обычного и может достигать десятков см². Для оперативного контроля за ходом обработки в таких условиях можно использовать не только растровые методы, но и контроль изменения свойств пленки (например, ее проводимости) в процессе облучения. Мощность установок в большинстве случаев не превышает 100 Вт.

Контрольные вопросы

Назовите основные преимущества электронно-лучевого нагрева по сравнению с термическим.

Как можно получать однородные по толщине пленки при электронно-лучевом испарении материала?

Как обеспечивают постоянство состава при получении пленок сплавов?

Рассмотрите возможности получения пленок химических соединений при электронно-лучевом испарении.

Как влияет мощность электронного луча на скорость роста пленки?

Какие эффекты наблюдаются при обработке материала несфокусированным электронным лучом?

Для каких целей используется электронно-лучевая переплавка материалов?

Сформулируйте основные преимущества сварки электронным лучом.

Назовите основные режимы сварки электронным лучом.

Каковы условия осуществления сварки деталей электронным лучом при атмосферном давлении?

Для чего проводится отжиг сварных швов?

Укажите области применения размерной обработки деталей электронным лучом.

Приведите примеры процессов размерной обработки массивных деталей.

Опишите сущность процессов размерной обработки.

В чем специфика и каковы области применения размерной обработки тонких пленок?

3.5. НЕТЕРМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Взаимодействие электронных пучков с химическими соединениями приводит к возбуждению или ионизации молекул. Следствием этих процессов могут быть такие химические реакции, при которых образуются новые химические соединения или изменяются молекулярные связи. Материал, подвергнутый облучению пучком электронов, приобретает новые или количественно измененные химические и физические свойства. С точки зрения возможных химических реакций и их кинетики существует тесное сродство электронно-лучевых химических процессов с фотохимическими. Однако у последних перенос энергии ограничивается интервалом 3-6 эВ в зависимости от квантов применяемого излучения, так что фотохимическим путем можно лишь возбудить молекулы и атомы в этом диапазоне энергий. Достичь более высоких уровней возбуждения, а тем более ионизации, с помощью фотохимических процессов невозможно. В результате же лучехимических процессов возникает ионизация, которая в большинстве случаев приводит к гораздо большему разнообразию возможных реакций.

Электроны пучка, взаимодействуя с облучаемым веществом, на первом этапе вызывают возбуждение или ионизацию молекул. Возникающие ионы или молекулы в возбужденном состоянии из-за избытка энергии не могут быть стабильными; в результате цепочки реакций, следующих друг за другом, образуются стабильные молекулы, свободные радикалы и ионы. В первом случае процесс на этом заканчивается. Образование же свободных радикалов и ионов дает начало множеству других реакций. Вид реакций, протекающих в конкретных случаях, очень сильно зависит от рода облучаемого вещества и от внешних условий реакции таких, как давление и температура. Эти условия определяют химические, а с ними и физические изменения вещества, которых можно достичь, облучая его электронным лучом.

3.5.1. Реакции, индуцированные радикалами

Реакции, начинающиеся после образования радикалов, составляют важнейшую основу лучехимических процессов. Эти реакции могут быть следующих типов:

- распад молекул (например - деполимеризация);
- замещение (например - хлорирование);
- укрупнение молекул (например - полимеризация, сополимеризация, образование сетчатых молекул).

Для технологического использования лучехимических процессов особенно важна кинетика реакции. В качестве примера может быть рассмотрена упрощенная кинетическая модель лучевой полимеризации. Она состоит из реакции старта, роста и обрыва цепей. Радикалы, необходимые для старта цепей, могут возникать при воздействии электронного пучка как на мономер, так и на молекулы растворителя и на уже образовавшиеся полимеры. Две последние из названных возможностей оказываются весьма

существенными для повышения скорости реакций старта. В фазе роста цепочки радикал присоединяется к мономеру, в результате чего возникает большая частица, которая также имеет характер радикала и способна к следующему присоединению. Вероятность обрыва, а с ней и средняя длина цепи зависят от подвижности молекул полимера, а следовательно, и от вязкости облучаемого вещества. Рекомбинация радикалов уменьшает скорость реакции полимеризации, а дополнительные реакции обрыва цепей понижают степень полимеризации, т.е. среднюю длину цепей. При чрезвычайно высокой концентрации радикалов скорость полимеризации в конце концов перестает зависеть от скорости образования радикалов.

Кинетика реакций определяет зависимость между количеством поглощенной энергии, необходимым для лучехимического превращения, и плотностью поглощаемой мощности. Путем целенаправленного выбора состава реагирующей смеси, например, при химическом электронно-лучевом отверждении лака, удастся повысить скорость реакции и привести её в соответствие с требованиями процесса.

Мерой расхода энергии облучения, необходимого для определенного лучехимического превращения, является доза D . Единицы её измерения - рад или более удобная для практики единица - Мрад. $1 \text{ Мрад} = 10^6 \text{ рад} = 10^4 \text{ Дж}$ поглощенной энергии облучения на 1 кг поглощающей массы.

Соответственно, *мощность дозы* ΔL - это доза, поглощенная за единицу времени: $\Delta L = dD/dt$.

Полимеризация и образование сетчатых молекул ведут к увеличению средней молекулярной массы соединения, а расщепление молекул - к его уменьшению. Молекулярная же масса, со своей стороны, определяет поведение соединения в соответствующем растворителе. Уменьшение молекулярной массы приводит к возрастанию скорости растворения, и наоборот. Если род материала и соответствующая ему энергия выбраны такими, что в веществе преобладают либо процессы полимеризации и образования сетчатых молекул, либо расщепление молекул, то обработанные участки отличаются от необработанных своей скоростью растворения.

Другой химический электронно-лучевой эффект, так же основанный на полимеризации и образовании сетчатых молекул, заключается в консолидации слоя. Поверхность твердого тела, помещенного в газообразную среду, всегда покрыта тонким слоем адсорбированного вещества, чаще всего, мономолекулярным. Если среда содержит пары полимеризуемого соединения, а поверхность подвергается воздействию электронного пучка, то происходит полимеризация молекул, адсорбированных на поверхности. Это снижает концентрацию молекул пара на поверхности и немедленно компенсируется дальнейшей конденсацией. Таким образом, в зоне действия электронного пучка образуется полимерный слой, толщина которого возрастает со временем обработки. Заметим, что именно этот эффект является причиной образования нежелательных примесных слоев на рабочих поверхностях электронно-лучевых установок, откачиваемых паромасляными вакуумными насосами.

Когда паровая среда состоит, например, из металлоорганических соединений, расщепляющихся под действием электронного пучка на летучие компоненты и нелетучий остаток, то в образовании такого слоя участвует только нелетучая компонента. В зависимости от состава паровой среды можно получать таким путем диэлектрические, полупроводниковые и электропроводные слои. Приращение толщины слоя за единицу времени, т.е. скорость роста слоя, определяется удельной поверхностной мощностью, передаваемой в молекулярный слой, и скоростью конденсации. Поэтому у рассматриваемой системы "пар-подложка" на скорость роста толщины слоя можно влиять, изменяя параметры электронного пучка, давление пара и температуру подложки. Так как толщина адсорбированного слоя, составляющего около 0,1 нм, весьма мала по сравнению с глубиной проникновения электронов, удельный расход энергии при таком способе очень велик.

Еще один электронно-лучевой эффект, основанный на диссоциации галогенидов серебра, заключается в чернении фоточувствительных слоев. Так, для осаждения слоя серебра толщиной 0,8 мкм требуется доза 10^{-2} Кл/см². К осаждению SiO₂ и Si₃N₄ приводит облучение силанов электронным лучом.

3.5.2. Электронно-стимулированное травление

Несмотря на то, что эти процессы требуют больших доз (>1 Дж/см², 10^{-2} Кл/см²) по сравнению с фотостимулированными реакциями, они были изучены в начале 1970-х годов как возможный способ травления кремния. Для различных диэлектриков было исследовано увеличение скорости травления после бомбардировки (BEER-bombardment enhanced etching rate), когда кремний или диэлектрик с радиационными дефектами травится в плазме или жидкостном травителе значительно быстрее (более чем в 3 раза) по сравнению с необлученной областью. Для проведения BEER-процессов требуются большие дозы. Поэтому эффективность использования электронного пучка снижается при ужесточении требований на разрешение (<2 мкм). В последнее время стали применять установки экспонирования широким пучком с фотокатодом. Фотокатод в виде пленочного рисунка из Ti на стекле излучает электроны при УФ-облучении. Рисунок кристалла проецировался на кремниевую пластину. Время экспонирования кристалла было снижено с часов до минут, однако фотокатодные системы имеют малое время жизни фотокатода и низкую точность совмещения.

Основным критическим параметром в BEER-процессах является глубина проникновения и расплывание падающего пучка. В большинстве случаев электронный луч выступает в роли локализованного источника тепла, вызывающего физические и термохимические превращения в тонких пленках. Прямая обработка кремниевой пластины электронным лучом возможна при дозах свыше 1 Кл/см². При энергии пучка 25 кэВ наименьшая область, которую можно расплавить, имеет размер порядка 10 мкм, тогда как при 50-100 кэВ этот размер в 2-3 раза больше. Сканирование непрерывным

пучком может быть использовано для осаждения аморфного кремния из паров его соединений.

3.5.3. Электронно-лучевая литография - возможности, оборудование, технология, перспективы

Наиболее широкое применение нетермические лучевые методы нашли в микроэлектронике для создания элементов микронных и субмикронных размеров. До недавнего времени размеры элементов в микроэлектронных устройствах были не более 2 мкм, их успешно изготавливали в массовом производстве методом оптической литографии. С переходом к элементам субмикронного диапазона возникает ряд ограничений в использовании этого метода. Использование ускоренных электронных потоков в качестве технологического инструмента взамен световых привело к возникновению нового процесса - электронной литографии. В 1967 году электронно-лучевую технологию было предложено использовать в качестве экономичного и быстродействующего генератора фотошаблонов для специализированных ИС. Рисунок фотошаблона формировался на помещенной у экрана электронно-лучевой трубки пластинке, покрытой светочувствительной эмульсией. Заказная разводка исполнялась по проекту, выполненному с помощью ЭВМ. В 1968 году электронно-лучевое экспонирование впервые было использовано не для изготовления фотошаблона, а для непосредственного экспонирования резиста на схемной плате. Точное воспроизведение изображения достигалось за счет контроля отклонения луча в сочетании с возвратно-поступательным движением платы, прикрепленной к координатному столу, обеспечивающему позиционирование.

Позднее после усовершенствования генераторов изображения для прорисовки печатных плат и фотошаблонов на покрытых резистом хромированных подложках стала доступной и электронно-лучевая литография непосредственно по кремнию. Электронные генераторы фотошаблонов, хотя и затрачивают до 8 часов на обработку одной заготовки, все-таки гораздо производительнее оптико-механических генераторов, требующих многих часов рабочего времени. В 1976 году фирма IBM впервые сообщила о промышленном применении прямой ЭЛ-литографии по кремниевой пластине для формирования металлизированных межсоединений в полузаказных биполярных ИС. Резистом может служить любой полимер, либо неорганический пленкообразующий материал. Возможна даже безрезисторная литография, поскольку неорганические пленки могут быть подвергнуты непосредственному травлению, испарению или превращению. С помощью ЭЛ-литографии создаются шаблоны для всех остальных видов литографии.

Основной целью электронной литографии является формирование рисунка требуемой структуры из материала резиста на подложке. Фиксация рисунка на резисте происходит в результате экспонирования заданных областей электронным лучом.

Электронные резисты

Одним из основных электронных резистов является полиметилметакрилат (ПММА). На основе ПММА и его аналогов было получено множество новых резистов. На примере ПММА было впервые продемонстрировано влияние молекулярного веса и дисперсности на чувствительность и разрешающую способность. ПММА и его производные имеют сравнительно низкую чувствительность, но обладают высоким разрешением. В основе других, более чувствительных, резистов использованы нестойкие в плазме и при повышенной температуре полиальдегиды и полисульфоны, имеющие низкую температуру поликонденсации (табл.3.3).

В электронной литографии, в основном, используются два метода экспонирования резиста электронным лучом: одновременное экспонирование всего изображения целиком и последовательное экспонирование отдельных точек сканированием луча. Оба этих метода обеспечивают высокую разрешающую способность, позволяющую формировать элементы с субмикронными размерами. Столь высокая разрешающая способность электронной литографии объясняется тем, что диаметр электронного луча можно сделать много меньше дифракционного предела, ограничивающего размеры фотолитографического изображения.

Таблица 3.3

Резисты высокой чувствительности

Доза	Вещество
10 Кл/см	AgBr (Н)
0,1 мДж/см	ПММА-акриловая кислота(Н)
10 Кл/см	Полиэпоксиды (Н)
1 мДж/см	Полисиликоны (Н) Полигалогенакринаты (П) Полиаллилы (Н)
10 Кл/см	Полисульфоны (П) Полиальдегиды (Н)

Примечание: Н-негативный резист , П- позитивный резист.

Для правильного понимания процесса электронно-лучевого экспонирования резиста необходимо выявить параметры, определяющие разрешающую способность метода, к которым относятся энергия электронов и плотность тока луча, а также скорость сканирования электронного луча по поверхности резиста и толщина слоя резиста. Уменьшение размеров изображения в субмикронной технологии требует уменьшения толщины пленки резиста до размера 0,3-0,4 мкм.

Обычно для субмикронной электронной литографии выбирают энергию электронов такой, чтобы глубина пробега электронов в материале резиста была много больше толщины пленки резиста. В этом случае электроны проникают глубоко в подложку. При движении в пленке резиста электроны испытывают упругое рассеяние, в результате чего сечение потока по мере углубления растет, то есть поток расширяется. Одновременно с упругим

рассеянием электроны первичного потока будут передавать молекулам резиста энергию в процессе неупругих столкновений (ионизационные потери). На глубине раздела резист - подложка часть электронов первичного потока отразится от подложки и вернется обратно в слой резиста, сохраняя достаточную энергию для экспонирования молекул резиста. Оставшаяся же часть первичных электронов при движении в материале подложки в конце своего пути будет диффузно рассеиваться, вызывая обратный поток электронов из глубины подложки в слой резиста. Эти электроны также внесут свой вклад в экспонирование. В элементарной области резиста с текущей координатой r и глубиной x_0 плотность поглощенной энергии молекулами резиста может быть представлена суммой

$$Q(r, x_0) = Q_1(r, x_0) + Q_2(r, x_0) + Q_3(r, x_0) + Q_4(r, x_0), \quad (3.29)$$

где Q_1 - плотность энергии, выделенная первичными электронами, движущимися в глубь резиста; Q_2, Q_3, Q_4 - плотности энергии, выделенной электронами, испытавшими рассеяние соответственно в резисте, на границе с подложкой и в подложке. Обычно считают, что величины Q_3 и Q_4 обусловлены электронами, рассеянными в подложке, и их сумму обозначают $Q_{отр} = Q_3 + Q_4$.

Плотность выделенной электронной энергии определяется следующим выражением:

$$Q = \frac{dE}{dx} \frac{j \cdot t}{e}, \quad (3.30)$$

где dE/dx - энергетические потери электронов; j - плотность тока электронов в данной точке резиста с координатами r, x_0 ; t - время экспонирования. Величина jt/e определяет плотность потока электронов в точке с координатами r, x_0 .

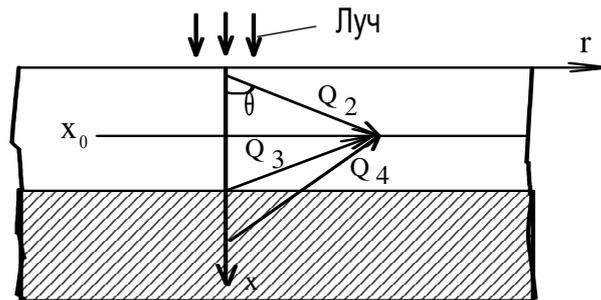


Рис.3.7. Определение плотности поглощенной энергии при облучении пленки резиста электронным лучом

На рис. 3.7 показаны полученные вычислением кривые плотности поглощенной энергии первичных электронов $Q_{прям} = Q_1 + Q_2$ и вторичных отраженных электронов $Q_{отр} = Q_3 + Q_4$. Радиальная координата r здесь отсчитывается от границы невозмущенного луча, то есть от расстояния $d_0/2$ от центра луча.

При определении величины $Q_{отр}$ необходимо учитывать, что общее число отраженных электронов характеризуется коэффициентом неупругого

отражения электронов h , который сильно зависит от типа подложки и слабо от энергии падающих электронов.

Энергетический спектр электронов, отраженных от подложки, имеет максимум вблизи значения, равного энергии падающих первичных электронов E_0 . Распределение электронов по углам вылета из подложки близко к косинусоидальному закону.

На рисунке 3.8 представлено распределение плотности поглотенной резистом энергии на различном расстоянии от оси луча. Видно, что в центре луча и вблизи границы луча энергетический вклад отраженных электронов много меньше, чем первичных электронов. Но уже на расстояниях, равных по порядку толщине слоя резиста (0,4 мкм), плотность поглотенной энергии определяется целиком отраженными от подложки электронами.

Таблица 3.4.

Сравнение способов и режимов сканирования при ЭЛЛ.

Способ сканирования	Источник	Время экспонирования, с	
		области, равной площади луча	области 1 см ²
Векторное	Термокатод W	10 ⁻⁵	4·10 ⁵
	Термокатод LaB ₆	2,6·10 ⁻⁷	10 ⁴
	Автоэлектронный эмиттер	2·10 ⁻⁸	7·10 ²
Растровое	Термокатод W	1,6·10 ⁻⁷	6·10 ³
	Термокатод LaB ₆	2·10 ⁻⁸	8·10 ³

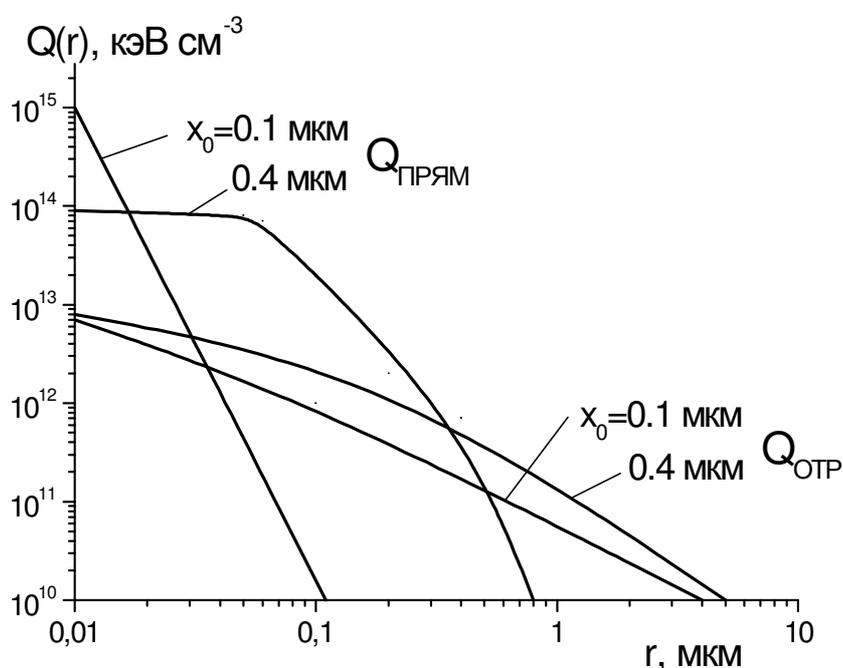


Рис. 3.8. Плотности поглотенной энергии первичных и отраженных электронов на различных глубинах в слое ПММА

На рис. 3.9 показано распределение плотности поглощенной энергии молекулами резиста на поверхности резиста (кривая 1) и на поверхности подложки (кривая 2). На поверхности резиста $Q = Q_0$. Увеличение ширины экспонируемой линии (d_1 и d_2) можно определить по значению $Q_{\text{пор}}$. Из рис. 3.9 видно, что максимальная ширина линии будет на поверхности подложки, где она равна $d_0 + 2d_2$. Разрешающая способность метода электронной литографии будет улучшаться, если увеличивать контраст резиста.

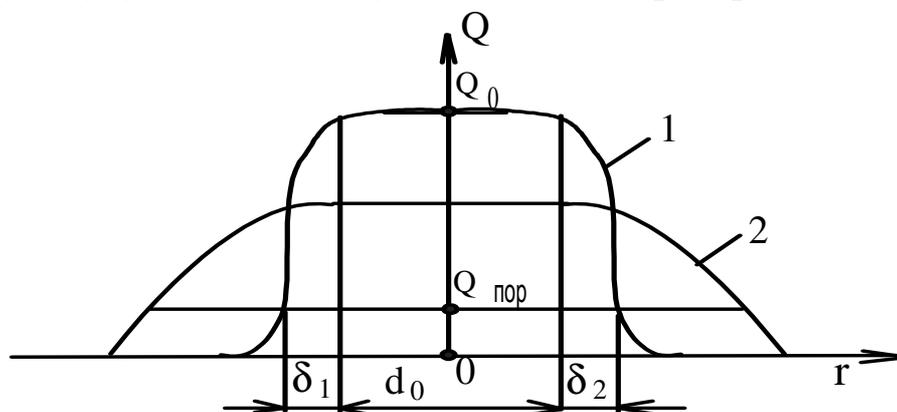


Рис. 3.9 Определение ширины экспонированной линии

Разрешающая способность литографии при одинаковых толщине резиста, дозе облучения и материале подложки улучшается с ростом энергии электронного луча. Это связано с тем, что начинает уменьшаться эффект рассеяния электронов. Однако это же приводит к уменьшению энергетических потерь, поэтому для сохранения оптимального значения количества выделенной энергии необходимо увеличивать время экспозиции или дозу облучения. Это, в свою очередь, увеличивает число обратно отраженных электронов и приводит к разрастанию ширины линии (увеличение d_2). Вторичным ограничением является "эффект близости", усиливающийся с ростом энергии луча. При увеличении энергии электронов растет пробег электронов в подложке, что приводит к "удлинению" хвостов распределения $Q(r)$ и, следовательно, увеличивается взаимодействие близко расположенных элементов рисунка структуры.

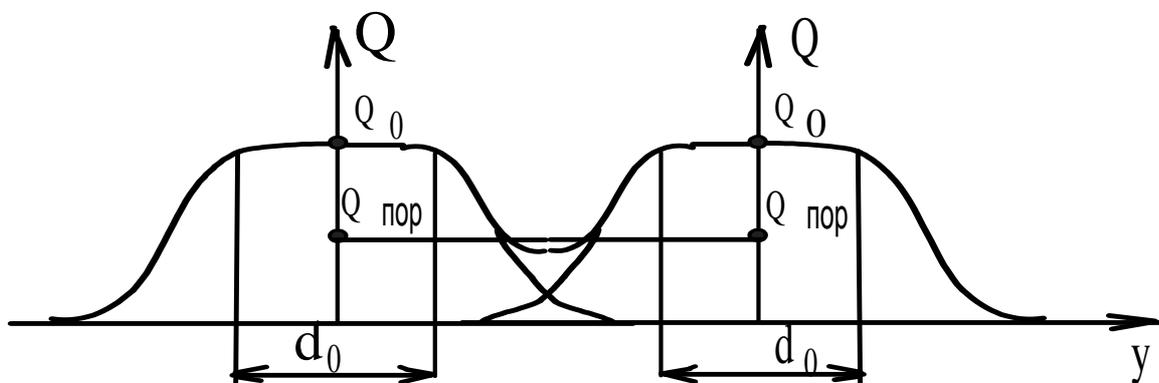


Рис. 3.10. Эффект близости при электронно-лучевом экспонировании резиста

На рис. 3.10 показано влияние внешнего эффекта близости за счет перекрытия областей рассеяния двух соседних элементов. Практически

установлено, что для субмикронной литографии необходимо, чтобы диаметр электронного луча $d_0 = 0,01 \div 0,05$ мкм при плотности тока $10-100$ А/см². В этом случае необходимо время экспозиции $t = 10^{-6} \div 10^{-7}$ с.

Иногда возникает вопрос - нельзя ли улучшить разрешение, избавившись от отраженных от подложки электронов? Этого можно достичь, если длина пробега электронов в резисте будет сравнима с толщиной пленки резиста. Так как толщина пленки резиста лежит в интервале $0,3 \div 0,5$ мкм, то энергия электронов должна составлять 4-6 кэВ. При таких энергиях электроны в пленке резиста рассеиваются диффузно и экспонируют область шириной ~ 1 мкм. Очевидно, что электронная литография в этом случае не имеет никаких преимуществ перед фотолитографией. Кроме того, для оптимального экспонирования необходимо значительно увеличивать дозу экспозиции и трудно обеспечить равномерность экспонирования по глубине пленки резиста.

При получении субмикронных изображений с помощью электронной литографии возникают значительные трудности в управлении электронным лучом. Минимально возможный диаметр луча однозначно связан с силой тока луча, яркостью источника электронов и коэффициентом сферических aberrаций электронно-оптической системы.

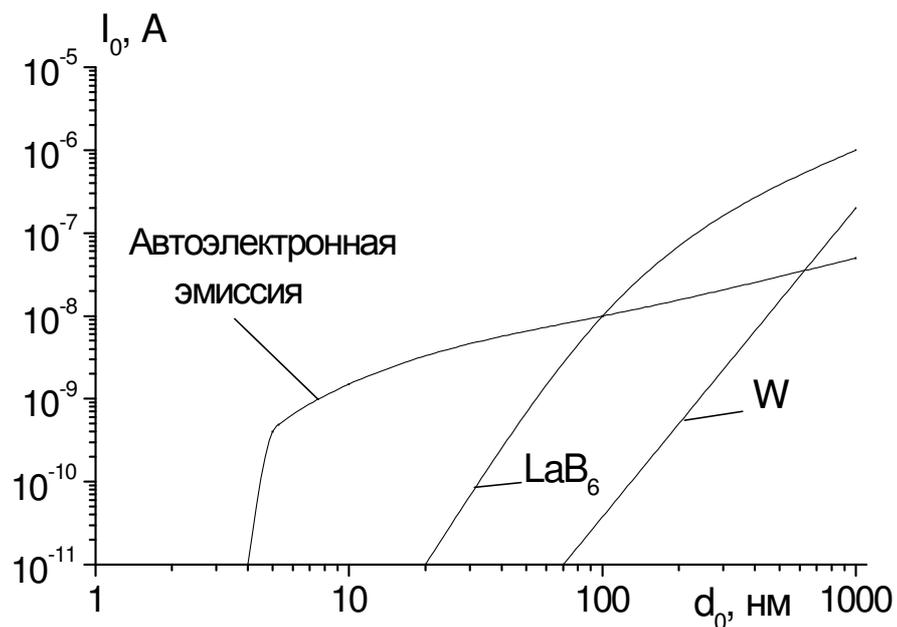


Рис. 3.11. Зависимость тока электронного луча от его диаметра для различных типов катодов

На рис. 3.11 показана зависимость максимальной силы тока от диаметра пучка электронов для различных типов источников электронов при $E_0 = 30$ кэВ.

В субмикронной электронной литографии накладываются ограничения и на максимальный угол отклонения луча, которые связаны с искажением формы сечения луча, а также с уширением экспонируемой линии за счет

изменения угла вхождения электронов в резист. При уменьшении линейных размеров ячейки время экспонирования увеличивается. Кроме того, для получения высокого разрешения необходимо использовать менее чувствительные резисты.

Электронно-лучевые системы литографии подразделяются на три класса: лучевые сканирующие, проекционные и гибридные.

В *лучевых сканирующих* установках литография может выполняться или одним лучем, или одновременно несколькими; при этом их развертка может проводиться по целому растру или же векторно. Развертка в растр предполагает включение и выключение луча при его движении вдоль каждой строчки в необходимых местах для последовательного формирования всей топологии рисунка, без изготовления предварительного шаблона. При векторном сканировании луч перемещается только по вырисовываемым элементам, поэтому такой способ производительнее.

Ещё большую производительность имеют *проекционные* системы, в которых получают копии заранее изготовленных шаблонов с одновременным перенесением всего рисунка шаблона на обрабатываемый объект. Такие копии можно получать с полной передачей размеров элементов в натуральную величину или же с их уменьшением. В проекционном методе требуется предварительное изготовление маски. Маски с линиями субмикронной ширины можно изготовить только на лучевых сканирующих установках. Разработанные в последние годы многолинзовые проекционные системы используют одну маску, а размножение её рисунка происходит несколькими десятками электронных пучков, формируемых набором экранных линз с отверстиями.

В *гибридных* электронно-лучевых системах повышение производительности процесса литографии достигается благодаря применению профилированных электронных потоков или символического проецирования. Векторная развертка позволяет впечатывать отдельные элементы рисунка в требуемые места на объекте обработки, а быстродействующие управляющие устройства - формировать сечение электронного потока. Если требуется многократное повторение геометрии элемента, то целесообразно изготовить шаблон в виде его символа и проецировать изображение профилированным электронным многолучевым потоком.

Отметим, что в субмикронной литографии имеются перспективы применения безрезисторной электронно-лучевой технологии, поскольку электронный луч легко фокусируется, совмещается и перемещается с точностью 0,05 мкм. Однако основным препятствием для практического использования является большая требуемая доза облучения ($>10^{-4}$ Кл/см²) и эффекты обратного рассеяния. Низкая производительность и радиационные дефекты остаются предметом забот с точки зрения экономичности и надежности.

Контрольные вопросы

Укажите механизмы инициирования химических процессов электронами. Назовите основные типы реакций с участием радикалов.

Сформулируйте понятия дозы и мощности дозы облучения при электронно-лучевом воздействии.

Приведите примеры процессов образования пленок металла, полупроводника, диэлектрика при электронно-лучевом воздействии на газопаровую фазу.

В чем суть процесса электронно-стимулированного травления материалов?

Сформулируйте принципы электронно-лучевой литографии.

Каковы возможности электронно-лучевой литографии?

Какие материалы используются в качестве электроночувствительных резистов?

Какие процессы протекают при экспонировании резиста электронным лучом?

Перечислите основные методы экспонирования резиста электронным лучом.

От каких факторов зависит разрешающая способность электронно-лучевой литографии?

Рассмотрите возможности и перспективы безрезисторной ЭЛЛ.

3.6. ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ

Торможение электронов ускоренного пучка в твердом теле сопровождается многими физическими явлениями, которые используются для анализа структуры и состава твердого тела. К таким явлениям относятся: вторичная эмиссия, выход упруго и неупруго отраженных, а также оже-электронов, рентгеновское излучение, люминесценция. Информацию о свойствах тела можно получить также, измеряя ток поглощенных или прошедших электронов.

Зондовые электронные методы исследования веществ имеют уникальную разрешающую способность: практически достигаемая разрешающая способность во вторичных электронах оценивается 30 \AA при полезном увеличении 250000^{\times} . Если использовать регистрацию электронов, прошедших сквозь тонкие пленочные объекты, то можно достичь разрешающей способности $1-5 \text{ \AA}$.

3.6.1. Вторично-эмиссионная и просвечивающая электронная микроскопия

Вторично-эмиссионная микроскопия основана на детектировании истинно вторичных (с энергией $0-50 \text{ эВ}$), а также неупруго и упруго отраженных от исследуемого вещества электронов.

Глубина выхода истинно вторичных электронов для металлов и полупроводников составляет $5-15$ монгоатомных слоев и при значительных ускоряющих напряжениях не зависит от энергии.

Основной характеристикой вторично-эмиссионного процесса является коэффициент вторичной электронной эмиссии σ . Он зависит от энергии электронов, анализируемого материала и угла падения потока на образец и может быть представлен суммой:

$$\sigma = \delta + \eta + R, \quad (3.33)$$

где δ , η и R - коэффициенты истинно вторичной эмиссии, неупругого и упругого отражения электронов, представляющие собой отношения соответствующих токов к току бомбардирующего пучка.

Для металлов обычно $0,4 < \sigma < 1,6$; для полупроводников $1 < \sigma < 1,5$; для диэлектриков $\sigma < 4-5$. У щелочно-земельных элементов и щелочно-галоидных соединений σ может достигать 10-35.

Максимальная глубина выхода неупруго отраженных электронов равна толщине слоя вещества, в котором происходят процессы рассеяния и торможения выходящих наружу электронов с энергиями более 50 эВ. При нормальном падении первичного пучка обычно $\eta < 0,5$.

Наибольшее распространение получили устройства растровой электронной микроскопии. Для получения информационного сигнала токи вторичных электронов в них регистрируются с помощью экранированных цилиндрических коллекторов, сцинтилляторов с последующим усилением сигнала в ВЭУ, каналовых электронных умножителей и полупроводниковых детекторов.

3.6.2. Рентгеновский спектральный микроанализ (РСМА)

При торможении высокоэнергетических электронов в твердых телах возникает рентгеновское излучение со сплошным спектром, на фоне которого имеются характеристические пики. Они определяются природой атома, в котором происходил переход электрона с верхнего энергетического уровня на вакансию, возникшую на нижнем уровне. Эта вакансия - результат взаимодействия налетающего электрона пучка с орбитальным электроном атома. Характеристическое излучение наблюдается в широком диапазоне длин волн от 1400 до 0,05 Å и имеет линейчатый спектр. Переход электрона на вакантное место в К-оболочке атома сопровождается генерацией лучей К-серии, в L-оболочке - L-серии и т.д.

Длину волны λ характеристического излучения в серии определяют по закону Мозли:

$$\frac{1}{\lambda} = R_p (Z - \alpha_{\text{рент}})^2 \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad (3.34)$$

где $R_p = 109737 \text{ см}^{-1}$ - постоянная Ридберга; n_1 и n_2 - значения главных квантовых чисел ($n_1 > n_2$); $\alpha_{\text{рент}}$ - константа, зависящая от серии.

Для детектирования рентгеновского излучения применяют дисперсионный метод измерений по длинам волн с использованием кристаллических детекторов (например, LiF, кварц) и дифракционных вогнутых решеток с числом штрихов-линий до 1200 на 1 мм.

Анализируемый образец в РСМА требует предварительной специальной подготовки, в частности, шлифования и полирования.

По чувствительности метод РСМА уступает некоторым другим физическим методам анализа, однако он позволяет контролировать локальные области размером 1-2 мкм. Общее содержание примесей в них может быть всего 10^{-7} - 10^{-9} мас. %. Если в объеме 10 мкм^3 обнаруживается 0,01 мас. % примеси, то достигаемая чувствительность по массе составляет 10^{-14} г, что превосходит возможности многих других методов.

3.6.3. Электронная оже-спектроскопия

В основе этого метода анализа поверхностей твердых тел лежит регистрация оже-электронов, имеющих в составе вторичных электронов. В оже-спектрах наблюдаются пики при определенных значениях энергии, характерных для данного процесса и не зависящих от E_1 . Причиной их появления является то, что при переходе электрона атома на вакансию, образованную в результате ионизации одного из нижележащих энергетических уровней, выделяющаяся дискретная порция энергии может быть передана безизлучательным образом (путем так называемого оже - процесса) еще одному электрону твердого тела. Если такой электрон выходит в вакуум без потерь энергии, то есть с достаточно малой глубины, то его кинетическая энергия позволяет судить о природе атома, в котором произошел переход. Полное количество оже-электронов определенного сорта пропорционально концентрации соответствующего элемента в приповерхностной области.

Следует отметить, что оже-переходы не подчиняются известным правилам отбора для оптических переходов. Поэтому оже-процесс нельзя рассматривать как снятие возбуждения атома с испусканием промежуточного кванта флуоресцентного излучения, который затем поглощается одним из атомов твердого тела и передает свою энергию фотоэлектрону. Таким образом, оже-процесс принципиально является безизлучательным.

Однако при заполнении вакансии на внутренней электронной оболочке возможно также испускание кванта электромагнитного характеристического излучения. Иными словами, релаксация возбужденного атома может происходить либо безизлучательным, либо излучательным способом. Относительная вероятность каждого из этих процессов зависит от атомного номера элемента и от того, на каком уровне была образована вакансия. Спектр характеристического излучения расположен, как правило, в области рентгеновских длин волн и так же, как и спектр оже-электронов, несет информацию о природе излучающих атомов. Это широко используется при рентгеноспектральном локальном анализе элементарного состава твердых тел. Толщина анализируемой поверхностной области образца при таком методе гораздо больше, чем в оже-спектроскопии, так как не несущие заряда рентгеновские кванты значительно меньше, чем электроны, поглощаются и рассеиваются веществом на пути к поверхности.

3.6.4. Дифракция медленных и быстрых электронов

Если поверхность анализируемого образца бомбардировать электронным пучком малой энергии (порядка десятка электрон-вольт), то электроны не проникают глубже нескольких слоев атомов. Около 1 % вторичных электронов упруго отразится от атомов поверхности и будет удаляться от них с энергиями, близкими к энергии бомбардирующих электронов. При анализе ориентированной монокристаллической мишени упруго рассеянные электронные волны усиливаются в определенных направлениях, зависящих от структуры поверхности.

Дифракция электронов высоких энергий дает сведения о решетке кристалла, позволяет идентифицировать и провести структурный анализ образца как монокристаллического, так и поликристалла. Этот метод анализа непосредственно в процессе роста тонких пленок позволяет контролировать их структуру, исследовать кинетику реакций, адсорбционные процессы.

Контрольные вопросы

1. Определите коэффициент вторичной электронной эмиссии.
2. Сформулируйте принципы электронной микроскопии.
3. В чем суть растровой электронной микроскопии?
4. Какие возможности имеет метод электронной микроскопии?
5. Сформулируйте физические основы рентгеновского микроанализа.
6. Почему при движении электронов в твердом теле возникает рентгеновское излучение?
7. Как осуществляется детектирование рентгеновского излучения?
8. Каковы чувствительность и возможности метода рентгеновского спектрального микроанализа?
9. В чем суть метода электронной оже-спектроскопии?
10. Какие возможности имеет метод электронной оже-спектроскопии?
11. Какова чувствительность метода?
12. При каких условиях возникает дифракция электронов на поверхности твердого тела?
13. Какую информацию дает дифракционная картина?
14. Для каких целей может быть использован метод дифракции быстрых электронов?

Задачи и задания для практических занятий и самостоятельной работы к главе 3

1. Вычислить глубину проникновения электронов в а) алюминий, б) сталь, в) фторопласт, если начальная энергия пучка составляет а) 50 кэВ, б) 100 кэВ, в) 200 кэВ.
2. Определить энергию электронов после прохождения ими алюминиевой фольги толщиной 20 мкм, если начальная энергия электронов составляла 100 кэВ.
3. Рассчитать толщину алюминиевой фольги, после прохождения которой энергия электронов уменьшилась со 120 кэВ до 80 кэВ.

4. Рассчитать распределение выделенной энергии по глубине в стали, если пучок диаметром 1 мм с силой тока 1 мА, ускоренный напряжением 100 В, воздействовал на сталь без плавления материала.
5. Для условий предыдущей задачи определить глубину максимального энерговыделения.
6. Рассчитать (с помощью ПЭВМ) распределение температуры в стали для условий задачи 4.
7. Рассчитать глубину лунки в стали при испарении материала под действием электронного луча диаметром 1 мм мощностью 1000 Вт при времени обработки а) 1 мс, б) 0,1 с, в) 10 с.
8. Рассчитать и проанализировать скорость испарения стали в зависимости от плотности мощности электронного пучка с учетом процесса теплоотвода.
9. Рассчитать и проанализировать зависимость глубины проплавления стали от плотности мощности электронного луча при времени обработки 100 с.
10. Рассчитать и проанализировать зависимость глубины проплавления стали от времени обработки при плотности мощности 10^6 Вт/см².
11. Подберите и обоснуйте выбор источника электронов с плотностью тока 0,1 А/см²; 10 А/см².
12. Оцените плотность тока дугового источника в водороде при давлении 10 атм и температуре 3000 К.
13. Можно ли пренебречь объемным зарядом в пучке электронов диаметром 1 мм с плотностью тока 1 мА/см², если электроны ускорены напряжением 10 кВ.
14. Оцените, до какого давления нужно откачать электронно-лучевую колонну, если расстояние от источника электронов до объекта обработки составляет 80 см, объем вакуумной камеры 10 л. Газовыделением в процессе обработки можно пренебречь.
15. Рассчитать распределение толщины пленки по площади подложки при электронно-лучевом испарении меди из точечного источника при расстоянии испаритель - подложка 10 см.
16. Определить угловой размер подложки, в котором однородность получаемой при испарении из точечного источника пленки составляет а) 10 %; б) 1 %.
17. Определить коэффициент использования материала при напылении из точечного источника пленки с однородностью 5 %.
18. Оценить максимально допустимое давление остаточных газов при напылении медной пленки со скоростью 100 нм/с.
19. Оценить увеличение глубины “кинжального” проплавления при увеличении ускоряющего напряжения в 2 раза.
20. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для получения пленки алюминия на пластине диаметром 20 см с толщиной 500 нм и однородностью по толщине 5%.
21. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для обезгаживания стальной детали площадью 10 см² и весом 20 г.

22. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для выращивания монокристалла кремния по методу Чохральского при электронно-лучевом плавлении материала.
23. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для электронно-лучевой сварки двух стальных листов толщиной 3 мм каждый.
24. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для электронно-лучевой гравировки рисунка на массивной стальной детали.
25. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для формирования рисунка на медной пленке толщиной 500 нм.
26. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для получения пленки кремния из газовой фазы (смесь моносилана с водородом).
27. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для приварки никелевой фольги толщиной 50 мкм к стальной детали толщиной 0,5 мм.
28. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для экспонирования резиста ПММА толщиной 500 нм с разрешением 500 нм.
29. Привести схему установки, выбрать и обосновать технологические режимы для проведения электронно-стимулированного травления кремния в тетрафторметане.
30. Привести схему электронного микроскопа, выбрать и обосновать основные узлы, оценить предельно допустимое давление остаточных газов.
31. Оцените ускоряющее напряжение, при котором может наблюдаться дифракция электронов на кристалле оксида магния.

ГЛАВА 4. ИОННЫЕ И ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

4.1. ВВЕДЕНИЕ

Ионная бомбардировка твердого тела сопровождается многочисленными физическими и химическими эффектами, которые могут быть использованы при получении, технологической обработке и исследовании свойств различных материалов. Спецификой ионного воздействия на материал является достаточно глубокое проникновение ионов высоких энергий в твердое тело, что используется при легировании полупроводников, упрочнении металлов, создании слоев с заданными свойствами. Другой важнейший аспект ионной бомбардировки - распыление материала мишени - является основой многочисленных методов получения тонких пленок.

Ионные пучки в электронике используются для самых различных целей. Области их применения можно разделить условно на три категории:

1) размерную микрообработку с удалением материала; 2) направленное изменение свойств материала легированием; 3) анализ структуры и свойств материалов. Диапазон энергий составляет от единиц кэВ до 1 МэВ, доза - 10^9 - 10^{18} ион/см². Размерная обработка поверхности производится пучками с низкой энергией в результате ионного распыления материала. Направленное изменение свойств материала достигается имплантацией примеси в заданной концентрации и распределением ее в объеме. Известными примерами изменения свойств полупроводникового материала являются создание "скрытых слоев", изоляции транзисторных областей в структуре интегральной схемы, изменение заряда в окисле кремния в структуре SiO₂-Si и др.

4.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ

4.2.1. Движение ускоренных ионов в веществе

При движении ионов в твердом теле происходит их торможение и рассеяние, сопровождающееся образованием дефектов. Теоретическое описание этого движения обычно проводится с учетом ряда упрощающих предположений. Во-первых, столкновения ионов с узлами решетки рассматриваются как парные, то есть влиянием кристаллической решетки на процесс столкновения пренебрегают. Во-вторых, вводится понятие потерь энергии dE/dx , формально соответствующее непрерывному рассеянию энергии, хотя реально процесс имеет дискретный характер.

Передача энергии от ионов к твердому телу осуществляется в результате упругих и неупругих столкновений. Столкновения ионов с узлами решетки рассматриваются как упругие, а соответствующий механизм рассеяния энергии называется ядерным торможением. Рассеяние энергии

ионов на электронах твердого тела описывается моделью неупругих столкновений и соответствует электронному торможению.

При теоретическом описании движения ионов в веществе вводятся понятия ядерной и электронной тормозной способности, которые характеризуют потери энергии ионом на единице пути в пересчете на один атом твердого тела:

$$\frac{dE}{dx} = N[S_n(E) + S_e(E)], \quad (4.1)$$

где N - концентрация атомов в твердом теле; S_n и S_e - ядерная и электронная тормозные способности.

Ядерная тормозная способность может быть вычислена на основе теории столкновений. Основная проблема в этом случае состоит в выборе потенциала взаимодействия. Обычно он представляется в виде произведения кулоновского потенциала на функцию экранирования, учитывающую частичное экранирование ядра атома электронами. Аналитические решения имеются только для отдельных частных случаев, и в общем виде задача обычно решается методами численного интегрирования. Для оценок ядерной тормозной способности могут быть использованы различные эмпирические формулы. В качестве примера приведем формулу, предложенную В.В.Юдиным:

$$S_n(\epsilon) = \frac{A\sqrt{\epsilon}}{(B + \epsilon)}; \quad A = 0,45; B = 0,3, \quad (4.2)$$

где ϵ - безразмерная приведенная энергия:

$$\epsilon = \frac{aM_2E_1}{Z_1Z_2e^2(M_1 + M_2)}, \quad (4.3)$$

где $a = 0,885a_0(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{-1/2}$ - характерный радиус экранирования;

$a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м - боровский радиус атома водорода.

Электронная тормозная способность в первом приближении пропорциональна скорости первичного иона.

$$S_e = K\sqrt{\epsilon},$$

$$K = \frac{0,0793\sqrt{Z_1Z_2}(M_1 + M_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4}\sqrt{M_1^3M_2^3}}. \quad (4.4)$$

Зависимость ядерной и электронной тормозной способности от энергии ионов показана на рис. 4.1. При малых энергиях ионов преобладающим является ядерное торможение, а при высоких – электронное (рис.4.1). Масштаб величин виден из таблицы 4.1.

Таблица 4.1.

Характеристические энергии торможения ионов в кремнии и потери энергии ионами с начальной энергией 100 кэВ.

Ион	E_1 , кэВ	E_2 , кэВ	E_3 , кэВ	$(dE/dx)_n$, кэВ/нм	$(dE/dx)_e$, кэВ/нм
B	3	17	3000	0,037	0,21
P	17	140	30000	0,44	0,28
As	73	800	200000	1,42	0,29
Bi	530	6000	2000000	2,78	0,25

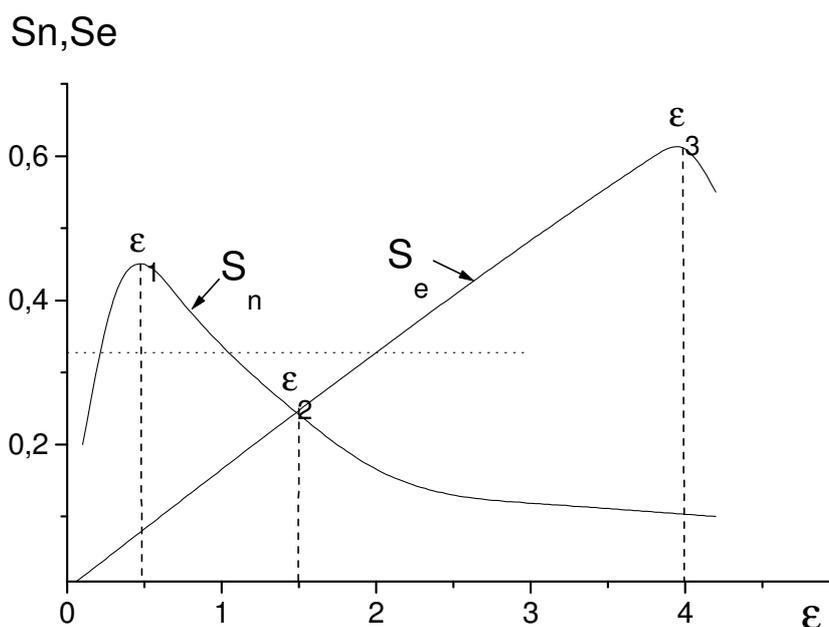


Рис. 4.1. Зависимость тормозной способности ионов в веществе от приведенной энергии ионов

4.2.2. Пробег ионов в твердом теле и их распределение

Важной характеристикой процесса является пробег ионов, то есть расстояние, которое он пройдет в твердом теле до остановки. Для характеристики пути, пройденного ионом в твердом теле, вводят понятия истинного траекторного пробега (траекторный пробег) и проекции пробега на направление первоначального движения (проекционный пробег). В общем случае траекторный пробег может быть найден из уравнения:

$$R_t = \frac{1}{N} \int_0^{\epsilon} \frac{d\epsilon}{S_n(\epsilon) + S_e(\epsilon)}. \quad (4.5)$$

Современные теории позволяют рассчитывать пробег ионов в широком диапазоне энергий с точностью порядка 30 %. Задача обычно решается методами численного интегрирования. В общем случае пробег ионов является статистической величиной, и вводятся понятия средней проекции пробега R_p и среднего нормального отклонения проекции пробега ΔR_p .

Последнее можно приближенно оценить как $\Delta R_p = 0,7R_p \sqrt{M_2 / M_1}$. Для расчета средней проекции пробега, если пренебречь электронным торможением, может быть использовано приближенное выражение:

$$R_p = \frac{6E_1 M_2 (M_1 + M_2) (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}}{\rho Z_1 Z_2 M_1}, \quad (4.6)$$

где ρ - плотность твердого тела.

Соответствующие величины для кремния приведены в таблице 4.2. Величина проекции пробега растет с увеличением энергии падающих ионов (при ядерном торможении по закону, близкому к линейному).

Таблица 4.2.

Проекция пробега R_p и их средние нормальные отклонения ΔR_p в нм для различных ионов в кремнии.

Ион	20 кэВ		60 кэВ		100 кэВ		140 кэВ	
	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p
B	78,4	32,1	243,8	70,8	397,7	93,2	537,4	109,8
P	26	9,4	73,2	23,1	123,3	35,4	175,2	46,6
As	15,9	3,7	37,7	8,4	58,4	12,5	78,9	16,3
Sb	14	2,4	30,8	5,1	45,7	7,4	59,9	9,5

С увеличением массы падающих ионов и проекция пробега, и среднее нормальное отклонение проекции пробега уменьшаются.

При конструировании полупроводниковых приборов нужно знать распределение внедрённых ионов по глубине. Оно определяется, во-первых, величиной ускоряющего напряжения и направлением движения падающих ионов относительно кристаллографической оси мишени. Для выяснения вида распределения необходимо рассмотреть механизм столкновения внедряемых атомов с атомами мишени, что является непростой задачей, поскольку приходится рассматривать взаимодействие различных атомов. Вторым важным фактором, определяющим распределение внедрённых ионов, - это температурные условия при внедрении и условия термообработки после внедрения, так как распределение, определяемое результатами столкновений с атомами мишени, видоизменяется, если температура мишени во время легирования высока или если после легирования проводится термообработка. Диффузия при термообработке ускоряется из-за наличия дефектов, образующихся в результате столкновения внедряемых атомов с атомами мишени.

Распределение внедренных ионов определяется их средним пробегом R_p , стандартным отклонением ΔR_p и дозой имплантации Q :

$$N_x = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \left[\exp - \frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right]. \quad (4.7)$$

Максимальная концентрация внедренной примеси равна

$$N_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \quad (4.8)$$

и располагается на глубине R_p .

Измерение профиля внедрённых ионов проводится различными методами: - радиоактивных изотопов; - исследованием дифференциальной проводимости и эффекта Холла; - определением глубины залегания p - n перехода и др. Наиболее простым является метод радиоактивных изотопов, которым непосредственно определяется распределение внедрённых атомов примеси.

4.2.3. Взаимодействие ионов с монокристаллами, Каналирование

При ионной бомбардировке монокристаллов проявляется эффект каналирования, заключающийся в прохождении ионов между параллельными цепочками атомов в соответствии с кристаллографическими направлениями. Существует определенный критический угол вхождения ионов в канал, образованный параллельными цепочками атомов. При превышении этого угла рассеяние иона происходит так же, как в аморфной мишени. Значения критических углов для большинства комбинаций ион-мишень лежат в пределах 3 - 6° . При каналировании преобладает электронное торможение. Максимальный пробег каналированных ионов примерно на порядок величины превышает пробег при ядерном торможении. Пример распределения каналированных ионов приведен на рис.4.2. Первый максимум принадлежит неканалированным ионам, которые рассеиваются как в аморфном веществе. На эффект каналирования влияет температура мишени, доза облучения и наличие дефектов на поверхности и в объеме твердого тела. Возрастание всех указанных факторов приводит к уменьшению эффекта каналирования вплоть до полного его исчезновения.

Рассчитать распределение ионов, проходящих через каналы, трудно. Причина заключается в сложности учёта числа ионов, попадающих в соседние каналы и средний канал. При некотором отклонении от оси этих каналов сила, действующая на ионы, различна. Движущиеся по каналу ионы по мере их прохождения через мишень отклоняются также из-за тепловых колебаний атомов мишени, дефектов решётки и так далее, причём этот эффект по мере отклонения от центра канала становится всё более заметным. Даже если в начале имеется совершенный монокристалл, то с увеличением количества внедрённых атомов при их столкновении с атомами мишени образуются дефекты решётки, и из-за этих дефектов падающие ионы отклоняются от направления каналирования.

Таким образом, при падении ионов в направлении каналов тип распределения будет зависеть от количества внедряемых ионов. Это явление затрудняет расчёт распределения ионов, падающих в направлении каналирования. Пики вблизи поверхности обусловлены ионами, отклонёнными от направления каналирования при столкновении с атомами

на поверхности, в этом случае распределение пробегов совпадает с распределением пробегов в аморфной мишени. Пики в наиболее далёких от поверхности местах обусловлены каналированными ионами. Для них максимальная длина пробега рассчитывается:

$$R_{\max} = \frac{1}{n_0} \int_0^{\varepsilon} \frac{dE}{S_e(E)} = 2E_1^{0,5} / (n_0 k_e^*). \quad (4.9)$$

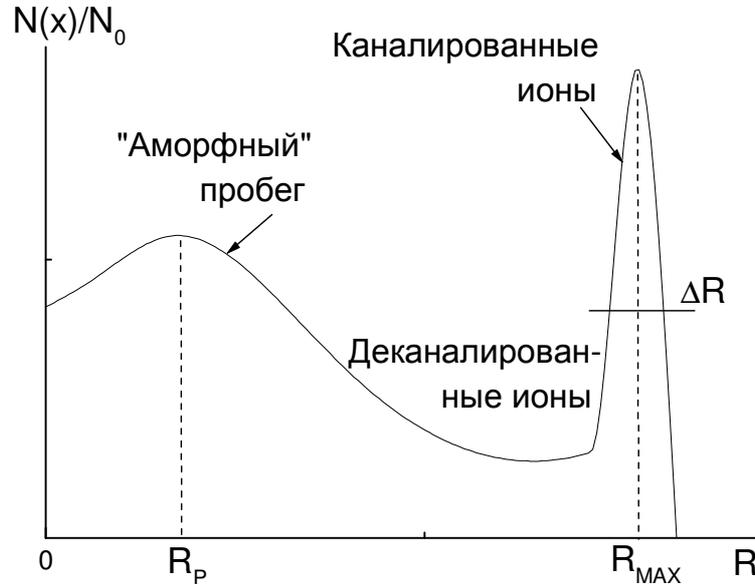


Рис. 4.2. Распределения внедренных атомов при эффекте каналирования

4.2.4. Образование радиационных дефектов при ионной бомбардировке, Отжиг радиационных дефектов

При бомбардировке твердого тела ионами происходит образование дефектов за счет выбивания атомов из узлов решетки и внедрения первичных ионов в междоузлия. Для выбивания атома из узла решетки требуется энергия, называемая энергией смещения. Значения этой энергии составляют от 5 эВ (сложные соединения) до 80 эВ (алмаз). Радиационные дефекты, возникшие при ионной бомбардировке, являются термодинамически неравновесными. Их число при ядерном торможении в модели упругих шаров может быть оценено по уравнению:

$$N(\varepsilon) = E_d / (2E_d). \quad (4.10)$$

Концентрация дефектов в зависимости от расстояния от поверхности имеет вид кривой с максимумом, причем максимум концентрации дефектов расположен несколько ближе к поверхности, чем максимум концентрации внедренных ионов. При образовании большого количества дефектов кристалл может перейти в аморфное состояние, при этом подвижность носителей заряда уменьшается. Радиационные дефекты затрудняют каналирование ионов в монокристаллах.

Термообработка (термический отжиг) в определённых условиях может сократить число дефектов решётки и восстановить её почти до

первоначального состояния. Так как при увеличении температуры внедрённые примеси диффундируют в подложке, температура термообработки должна быть минимальной. Дефекты решётки, препятствуя движению носителей, значительно изменяют коэффициент диффузии примеси в кристалле. Если при диффузии атомов в кристалле имеются вакансии, то энергия активации во время передвижения атомов уменьшается, и диффузия ускоряется.

Увеличение коэффициента диффузии связано с коэффициентом диффузии дефектов решётки и концентрацией вакансий, увеличенной по сравнению с равновесной. Эта зависимость очень важна при конструировании приборов. Если в определённом месте создать область с более высокой концентрацией дефектов, то коэффициент диффузии будет расти только в заданном месте, и можно глубоко внедрять примеси даже при незначительном увеличении температуры.

Для устранения дефектов решётки необходима энергия активации. Эта энергия определена для каждой структуры дефектов. Например, для дивакансий требуется энергия активации 1,25 эВ, в то время как для обычных дефектов 0,33 эВ. Вероятно, многократные дефекты решётки, большие, чем дивакансии, имеют более высокую энергию активации.

4.2.5. Изменение электрических свойств твердых тел при ионной бомбардировке

Внедрение ионов и образование радиационных дефектов сопровождается изменением электрических характеристик обрабатываемого материала. При ионном облучении металлов их сопротивление обычно возрастает из-за уменьшения подвижности электронов и увеличения их рассеяния на радиационных дефектах и внедренных частицах. При больших дозах облучения возможно и уменьшение концентрации свободных электронов в металле, связанное с изменением состава, образованием химических соединений.

Изменение электропроводности полупроводников при ионной бомбардировке связано с внедрением активных примесей, образующих локальные уровни в запрещенной зоне полупроводника. Этим методом можно создавать области с n и p проводимостью, а так же n - p переходы в материалах, для которых диффузионные методы неприменимы, например, в алмазе, сульфидах кадмия и цинка и других.

Контрольные вопросы

Каковы механизмы ядерного и электронного торможения ускоренных ионов в твердом теле?

В каком диапазоне энергий ионов преобладает ядерное торможение?

В каком диапазоне энергий ионов преобладает электронное торможение?

Как зависит энергия, соответствующая максимуму ядерной тормозной способности, от массового числа иона?

Сформулируйте понятие проекции пробега иона в твердом теле.

Как зависит длина пробега от энергии ионов?

Как зависит длина пробега от массового числа иона?

В чем суть эффекта каналирования ионов в монокристаллах?

Укажите механизмы образования дефектов при ионной бомбардировке твердого тела.

Каков механизм процесса отжига дефектов?

Как влияет ионная бомбардировка на электропроводность металлов и полупроводников?

В чем суть радиационно-стимулированной диффузии.

4.3. ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ УСТАНОВКИ

В современных ионно-лучевых установках ионы ускоряются до энергий 20 - 450 кэВ, перспективны и установки с энергией до 1 МэВ. На рисунке 4.3 показана структурная схема ионно-лучевой установки.

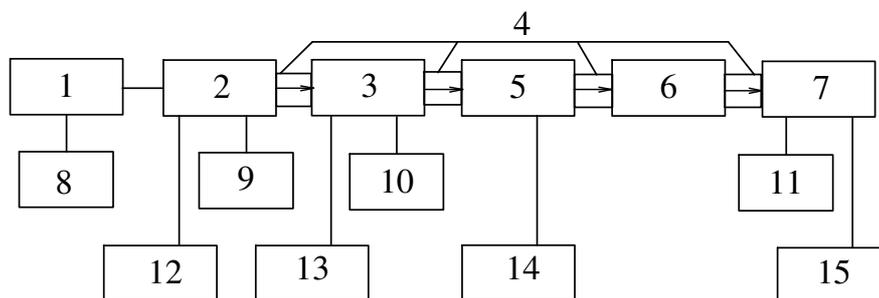


Рис.4.3. Структурная схема ионно-лучевой установки: 1- система напуска рабочего вещества; 2 - ионный источник; 3 - система формирования ионного пучка; 4 - ионопровод; 5 - сепаратор ионов; 6 - система ускорения; 7 - камера с образцами; 8 - 11 - системы откачки; 12 - 14 -блоки питания; 15 - устройство контроля дозы облучения

Основные требования, предъявляемые к ионно-лучевым установкам:

- возможность работать с одно- и многозарядными ионами различных элементов;
- обеспечение ускорения ионов в широком диапазоне энергий;
- точное регулирование и поддержание дозы облучения;
- возможность прецизионной взаимной ориентации ионного луча и образца;
- точное регулирование и поддержание температуры образца в широких пределах;
- наличие высокого вакуума и отсутствие углеводородов в остаточных газах;
- модульное исполнение установки.

Для промышленных установок важнейшими требованиями являются:

- высокая производительность;
- малые габариты и энергопотребление;
- длительная, стабильная и воспроизводимая работа установки и ее узлов;
- возможность автоматизации и управления с помощью ЭВМ;
- безопасность и простота обслуживания.

Все типы установок по системам ускорения ионов можно разделить на три группы:

1. С ускорением до сепаратора. При этом сепаратор и приемная камера находятся под нулевым потенциалом, что удобно для эксплуатации, но сепарация ионов с большой энергией требует крупногабаритных магнитных систем.

2. С ускорением после сепаратора. В такой системе используются умеренные магнитные поля, но приемная камера находится под высоким потенциалом.

3. С ускорением и до и после сепаратора. Такие установки наиболее удобны для работы с высокоэнергетичными ионами, имеющими сравнительно небольшие массовые числа.

В зависимости от дозы облучения выделяют установки малых и средних доз, больших доз и высокоэнергетичные. Рассмотрим подробнее отдельные узлы ионно-лучевой установки.

4.3.1. Источники ионов

Источниками ионов называют устройства, в которых на основе различных принципов ионообразования создается определенная концентрация заряженных частиц - ионов. Ионы образуются из нейтральных молекул или атомов при ионизации электронным ударом, фотоионизации, химической или термической ионизации, ионизации в результате соударений с другими ускоренными ионами и т.д.

Выбор конкретного типа источника для использования в технологической или экспериментальной установке осуществляют на основе сравнения их основных технических характеристик. Можно сформулировать общие требования непосредственно к ионному потоку из источника и к самому источнику.

Ионный поток характеризуют следующие основные параметры:

- общий ток пучка и яркость ионного источника;
- однородность, определяемая составом пучка по массам, а также зарядность ионов (одно-, двух-, трех- и т. д. зарядные ионы);
- распределение ионов по энергиям;
- стабильность тока, количественно оцениваемая степенью модуляции, выражаемая в %;
- расходимость, определяемая системой формирования ионного потока, его первеансом и значениями поперечных скоростей ионов.

Эксплуатационные особенности самих источников определяются целой группой характеристик. Основные из них:

- тип источника в зависимости от вида ионообразования;
- режим работы (стационарный или импульсный);
- возможность ионизации веществ в их различных состояниях (газ, жидкость, твердое тело);

- коэффициент использования рабочего вещества (для газовых источников - газовая экономичность, определяемая отношением числа выходящих из источника ионов к числу атомов, вводимых в источник);

- энергия ионов на выходе;

- необходимость в принудительном охлаждении.

При выборе источника следует учитывать его экономичность, измеряемую отношением ионного тока к мощности, подводимой к источнику. Важной характеристикой для применения источников в технологических установках является их долговечность - период непрерывной работы без замены деталей с разборкой источника.

Ионный источник с поверхностной термической ионизацией

Наиболее простым по конструкции является источник с поверхностной термической ионизацией. Принцип его действия основан на явлении поверхностной ионизации, когда адсорбирующиеся на разогретой поверхности атомы, имеющие меньший потенциал ионизации, чем работа выхода электрона из адсорбента, отдают ему свой внешний электрон. После этого адсорбированные атомы могут покинуть поверхность уже в виде положительных ионов. Если потенциал ионизации адсорбированного атома I меньше работы выхода электрона из материала основы ϕ , то степень ионизации будет описываться экспоненциальным уравнением вида:

$$\alpha = \frac{N_+}{N_0} = A \exp\left[-\frac{e(\phi - I)}{kT}\right]. \quad (4.11)$$

Конструкция такого источника может состоять из прямонакального вольфрамового ядра, выполненного из ленты. На ленту помещают запас щелочного металла или соединения его в виде соли. Обычно на поверхности ионизатора наносят галоидную соль щелочного или щелочно-земельного металла и получают либо поток положительных ионов Na^+ , Li^+ , K^+ , Cs^+ , либо поток отрицательных ионов галогенов F^- , Cl^- , Br^- , I^- . Обычно сначала создают регулируемый поток атомов, направляемых на нагретую сетку, где происходит ионизация. Например, при эмиссии ионов лития исходный материал помещают в танталовый тигель, который нагревается от электронно-лучевой пушки до температуры 543 К. Поток атомов лития после испарения ионизируется на ренийевой сетке с большой поверхностью, нагретой до 1973 К. Для уменьшения расходимости пучка сетка имеет выпуклость в сторону тигля. Ионный пучок вытягивается с помощью экстрактора (диафрагмы с приложенным к ней потенциалом).

Ионные потоки из таких источников характеризуются очень малым энергетическим разбросом ионов (0,1- 0,3 эВ), отсутствием многозарядных ионов, относительной чистотой состава. Плотности тока в таких пучках невелики и составляют 10^{-3} - 10^{-4} А/см².

Ионные источники с ионизацией электронным ударом

Наиболее обширный класс источников основан на ионизации атомов под действием электронного удара в плазме разряда при различных способах

его возбуждения. Примерами таких источников могут быть источники типа "Нира", пеннинговские, плазмотронные, дуговые, высокочастотные и др.

Источники с дуговым разрядом

Широкое распространение получили ионные источники с дуговым разрядом в парах рабочего вещества. Стабильность разряда обеспечивается наличием термокатода и применением внешнего магнитного поля. Упругость пара рабочего вещества регулируют температурой тигля с твердым наполнением в пределах 0,5 - 3 Па. Отличительная особенность этих источников - возможность отбора ионов со значительной площади, что позволяет создавать ионные пучки различной формы - ленточные, круглые, квадратные и т.д.

Ионный источник с дуговым разрядом в парах рабочих веществ

Вольфрамовый стержень, разогретый электронной бомбардировкой при ускоряющей разности потенциалов между ними и термокатодом, эмитирует электроны. Электроны ускоряются в полости рабочей камеры, включенной как анод. Камера находится во внешнем магнитном поле с напряженностью H . Это поле заставляет двигаться электроны вдоль магнитных силовых линий по спиральным траекториям, что существенно увеличивает число актов ионизации. В рабочую камеру подается поток паров или газа рабочего вещества. При давлении паров 1-3 Па внутри камеры возникает сильноточный дуговой разряд, плазма которого содержит определенную концентрацию ионов.

Ионно-оптическая система источника состоит из трех электродов-диафрагм в виде прямоугольных щелей. Они имеют некоторую кривизну в вертикальной плоскости, способствующую снижению расходимости пучка. Основной ускоряющий электрод заземлен. Выходящий ионный пучок ускоряется до энергии, определяемой разностью потенциалов между основным электродом и ионизационной камерой. Промежуточный электрод служит для создания потенциального барьера электронам, стекающим из ионопровода, и компенсирует объемный заряд ионного пучка. Этот электрод находится под отрицательным потенциалом от 2 до 5 кВ. Ток пучка пропорционален концентрации ионов в плазме разряда. Последующая магнитная сепарация позволяет получить моноизотопный пучок однозарядных ионов требуемого элемента.

Дуоплазмотрон

Для увеличения концентрации зарядов можно использовать сужение канала разряда в сочетании с действием магнитного поля. Такая система называется дуоплазмотроном. Катод может быть холодным или нагретым - в зависимости от рода используемого газа. Дуоплазмотроны отличаются высокой газовой экономичностью (50 – 95 %) и могут создавать токи ионов от 0,25 до 700 мА. Типичная схема дуоплазмотрона изображена на рис.4.4.

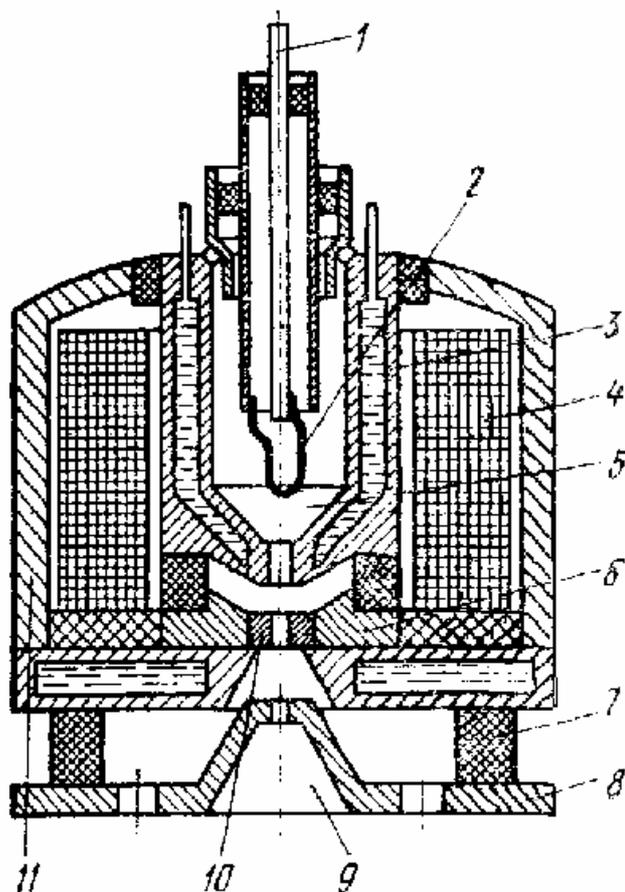


Рис. 4.4. Конструкция дуоплазмотрона:

1- система напуска газа; 2- термокатод; 3- промежуточный электрод; 4- обмотка электромагнита; 5- область начального зажигания разряда; 6- анод; 7- изолятор; 8- вытягивающий электрод; 9- выход ионного пучка; 10- тугоплавкая вставка; 11- корпус.

Рабочий газ или пары вещества поступают через трубку напуска 1 в рабочую камеру. Термокатод 2 эмитирует электроны, ускоряемые электрическим полем к промежуточному электроду 3. Дуговой разряд зажигается при давлении газа 0,1-1,0 Па в области 5. Плазменный шнур разряда сжимается за счет сужения отверстия промежуточного электрода. Разряд перебрасывается далее на анод 6, который является составной частью магнитопровода 4. В зазоре между промежуточным электродом и анодом электроны движутся в неоднородном магнитном поле, в результате чего их траектории удлиняются, а вероятность акта ионизации увеличивается. Кроме того, магнитное поле в этой области дополнительно стягивает плазменный шнур разряда до малого диаметра, что приводит к увеличению плотности частиц. Эта область плазмы примыкает к тугоплавкой вставке с анодным отверстием 8, откуда ионы вытягиваются экстрактором 7. Вытягивающий электрод (экстрактор) отделен от основного корпуса дуоплазмотрона высоковольтным изолятором. Определенная конструкция вытягивающего электрода позволяет получать на выходе слабо расходящийся пучок, который фокусируется последующей ионно-оптической системой. Достижимая яркость такого источника $100 \text{ А/см}^2 \text{ ср}$. В дуоплазмотроне можно получить и

пучок отрицательных ионов. Для этого отверстие вытягивающего электрода смещают относительно канала в анодной вставке.

Газоразрядный источник типа Пеннинга

Газоразрядный источник типа Пеннинга может быть как с термокатодом так и с использованием высоковольтного тлеющего разряда без термокатода.

На рис. 4.5 представлена схема одного из типов пеннинговских источников с горячим катодом.

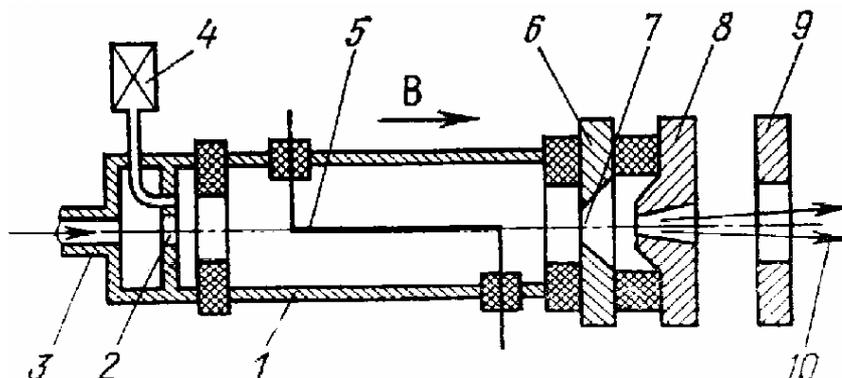


Рис 4.5. Источник ионов типа источника Пеннинга:

1- камера; 2- система напуска газа; 3- диафрагма; 4- манометрический преобразователь; 5- термокатод; 6- антикатод; 7- отверстие для формирования электронного пучка; 8- вытягивающий электрод; 9- ускоряющий электрод; 10- поток ионов

В цилиндрическую камеру - анод (диаметром 30-50 мм и длиной 80-100 мм) через систему напуска подается поток рабочего газа или паров вещества. Диафрагма с отверстиями равномерно распределяет поток по сечению камеры. Давление в источнике контролируется с помощью вакуумметра. Вдоль оси ионизационной камеры натянут прямонакальный вольфрамовый проволочный термокатод. Эмитируемые им электроны ускоряются к аноду - внутренней поверхности камеры. С обоих концов камера через изоляторы ограничена электродами - антикатадами, находящимися под потенциалом катода и ограничивающими движение электронов в осевом направлении. Разрядная камера помещена в постоянное магнитное поле, направленное по ее оси. Магнитная индукция поля такова, что максимальный циклотронный ларморовский радиус при движении электронов не превышает радиуса цилиндра. При этом уход электронов на анод замедляется, они вынуждены длительное время осциллировать внутри камеры, осуществляя ионизацию молекул газа. Граница области разряда распространяется до антикатодов. В одном из них выполнено отверстие для извлечения ионов из разряда с помощью специального внешнего электрода. Потенциал на этом вытягивающем электроде определяет энергию ионов в потоке. Поперечное сечение потока задается формой отверстия в экстракторе.

В рассматриваемом типе источника ионов обычно падение напряжения на разряде составляет сотни вольт, магнитная индукция порядка $5 \cdot 10^{-3}$ Тл, а диапазон рабочих давлений - от 0,1 до 1 Па. С целью получения пучков

различных диаметров и с большим общим током отбор ионов и их ускорение целесообразно проводить через несколько отверстий в антикатоде. Газоразрядные источники ионов могут иметь и холодный катод, в этом случае для поддержания разряда требуется более высокое напряжение в том же диапазоне давлений и значений индукции магнитного поля.

Высокочастотные источники ионов

Во многих промышленных и лабораторных ионно-лучевых установках применяют высокочастотные источники ионов. Электроны в них, двигаясь по сложным траекториям и совершая колебания с частотой электрического поля, эффективно ионизируют компоненты рабочего газа (пара). Ионный поток извлекается из плазмы разряда. В высокочастотном источнике ионов возбуждение и поддержание разряда осуществляется с помощью высокочастотного генератора, имеющего емкостную или индуктивную связь с разрядником. Отсутствие внутренних электродов позволяет получить более чистые условия по составу газовой фазы.

В ряде установок используется ионная пушка типа "Нильсен". Пушка "Нильсен" сконструирована так, что при применении многих видов примесей, можно получать ионы как из газовой среды, так и из твердых веществ. Магнитное поле, используемое в каждом источнике ионов, вызывает вращение движущихся в нём заряженных частиц. При этом эффективная длина орбиты в разрядной камере увеличивается, и создаются условия для эффективной ионизации. Во всех источниках необходимо также учитывать магнитное поле, создаваемое достаточно большим током катода.

Полевые ионные источники

В конце 70-х годов появились два типа точечных источников, разработанных для применения в ионно-лучевой литографии, принцип действия которых основан на ионизации атомов вещества при их испарении с поверхности твердого тела под воздействием сильного электрического поля с напряженностью более 10^8 В/см. Эти источники обладают яркостью, на несколько порядков превышающей яркость плазменных источников. Поле с напряженностью около 10^8 В/см создается в малой области возле острия эмиттера, где и происходит испарение вещества и ионизация его атомов. Упомянутые два типа источников различаются способом доставки вещества на острие эмиттера.

В источниках первого типа рабочим веществом является расплавленный металл, который смачивает металлическую вольфрамовую иглу эмиттера, не вступая в химическую реакцию с материалом иглы, и имеет малое давление собственных паров. Испытывались источники с металлами In, Ga, Cs, Au, Si, Ge и их сплавами. Применение, например, источника со сплавом Ge-Au (0,12:0,88) позволяет снизить рабочую температуру иглы до 356 °С.

Схема полевого источника с жидким металлом показана на рис. 4.6.

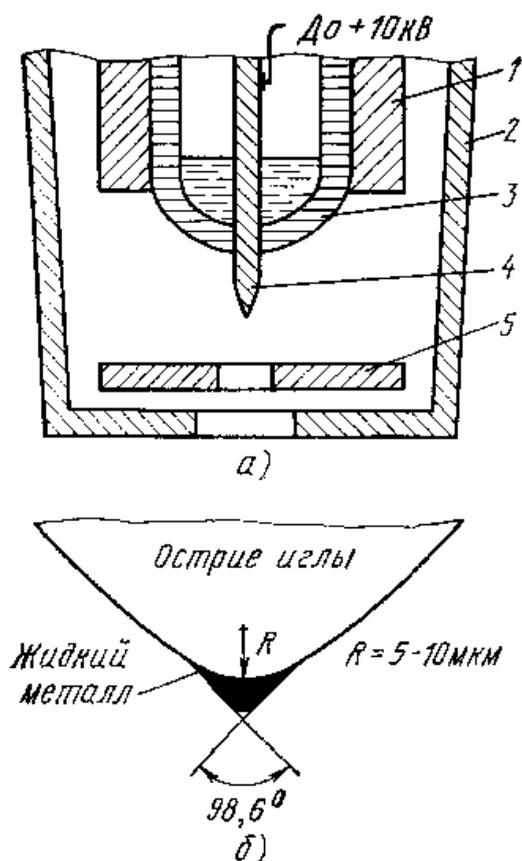


Рис.4.6. Полевой ионный источник с жидким металлом: а) общая схема; б) укрупненный вид иглы

Центральным узлом конструкции является вольфрамовая игла 4 (эмиттер) диаметром 0,3 мм с радиусом закругления острия 5-10 мкм. Игла проходит через содержащий расплав танталовый резервуар 3, нагреваемый до необходимой температуры нагревателем 1. К игле прикладывается высокий потенциал относительно экстрактора 5, представляющего собой молибденовую диафрагму с диаметром отверстия 1,5 мкм. Источник окружен дополнительным экраном 2. Прикладываемый к эмиттеру потенциал может меняться от 0 до +10 кВ.

Расплавленный в резервуаре 3 металл стекает тонким слоем по игле к ее острию, где силы, обусловленные электрическим полем, превышают силы поверхностного натяжения тонкого слоя жидкости. В результате этого жидкий металл на конце иглы принимает форму конусовидной капли с углом при вершине конуса $98,6^\circ$. Радиус закругления острия конуса 10-30 нм. При потенциале эмиттера в несколько киловольт напряженность электрического поля в области острия конуса достигает 10^8-10^9 В/см, что способствует испарению атомов и их ионизации. Средняя яркость источника 10^6 А/(см²·ср). Конструкция рассмотренного источника является аналогом эмиттера полевого ионного микроскопа и отличается от него рабочим острием.

В источниках второго типа рабочим веществом является газ, который адсорбируется на игле эмиттера и удерживается на ее поверхности под действием поляризационных сил. Десорбция молекул газа и их ионизация

происходят на острие иглы эмиттера, где напряженность электрического поля равна или превышает 10^8 В/см. В качестве эмиттера источника используется игла из монокристаллического иридия, ось которого совпадает с кристаллографическим направлением $\langle 110 \rangle$. Острые иглы, получаемое в процессе электрохимического травления, имеет радиус закругления менее 10 нм. В объём, где расположен эмиттер, подается рабочий газ (H_2) при давлении 1,3 Па. Температура эмиттера и рабочего газа 77 К. Охлаждение происходит жидким азотом. К эмиттеру прикладывается потенциал в несколько киловольт. Вакуум за диафрагмой экстрактора достигает $6 \cdot 10^{-3}$ Па. Молекулы рабочего газа в электрическом поле вблизи иглы поляризуются и адсорбируются на ее поверхности. Под действием сил, обусловленных электрическим полем, диполи смещаются к области большей напряженности (к острию иглы), где происходит десорбция атомов и молекул газа и их ионизация. Яркость источников этого типа 10^9 А/(см²·ср).

Выбор конкретного ионного источника определяется в первую очередь технологическими требованиями (плотность тока, форма и размеры пучка), а затем уже учитываются эксплуатационные факторы.

4.3.2. Система вытягивания и ускорения ионов

Из любого источника ионы необходимо эффективно извлечь и сформировать ускоренный ионный поток. В плазменных источниках извлечение ионного потока осуществляется через отверстие в стенке разрядной камеры. На небольшом расстоянии от отверстия помещают вытягивающий электрод (экстрактор) с отверстием такой же формы. В зазоре между экстрактором и плазмой имеется слой объемного положительного заряда. Ширина слоя объемного заряда и ионный ток через отверстие зависят от ускоряющего напряжения в соответствии с законом трех вторых. Для уменьшения ухода ионов на экстрактор добавляют еще ускоряющий электрод. Необходимо обращать внимание на возможность возникновения пробоя изоляции, который обычно возникает при напряжениях в несколько десятков киловольт. Поэтому используют многосекционную ускорительную трубку, причем энергия ионов в каждой секции увеличивается на 15 - 20 эВ. В этой трубке напряжение равномерно распределяется между всеми ступенями ускорения.

4.3.3. Система сепарации ионов

Во многих ионно-лучевых процессах необходимо использование ионов конкретного изотопа с определенным отношением массы к заряду. Обычно из ионного источника извлекаются ионы нескольких элементов, и для их разделения используют ионные сепараторы. Для разделения ионов по массовым числам используют постоянное магнитное поле, в котором ионы движутся по окружности радиусом

$$R = \frac{M_i \cdot v_i}{q \cdot B} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2M_i U}{q}}, \quad (4.12)$$

где M_i , v_i , q - масса, скорость и заряд иона; U - ускоряющее напряжение; B - индукция магнитного поля.

Траектории движения электронов различных масс в однородном магнитном поле показаны на рис.4.7. С увеличением отношения массы иона к его заряду радиус описываемой окружности возрастает. Выделение нужных ионов осуществляется с помощью диафрагмы на выходе из сепаратора. Магнитный сепаратор характеризуется разрешающей способностью, представляющей собой отношение массового числа иона к минимальной фиксируемой прибором разности масс. В промышленных ионно-лучевых установках разрешающая способность $M_i/\Delta M$ составляет 50 - 100, а в лабораторных до 1000.

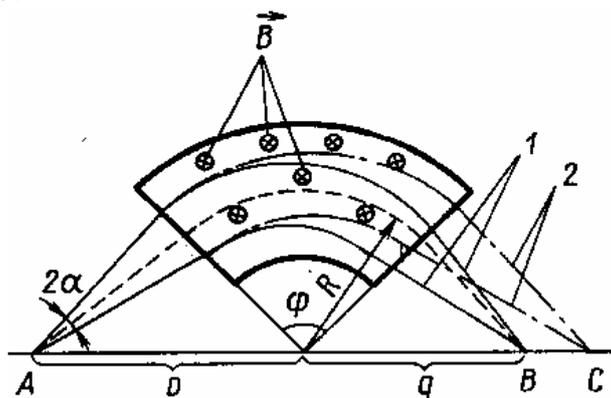


Рис.4.7. Траектории движения ионов в поперечном магнитном поле

При ионных токах до 10^{-4} А в качестве сепаратора можно использовать фильтр Вина, в котором ионы движутся во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях. Напряженности полей обычно подбирают таким образом, чтобы выделяемые ионы двигались по прямолинейной траектории и попадали в отверстие диафрагмы. Все остальные ионы имеют криволинейную траекторию и попадают на пластины конденсатора, создающего электрическое поле.

4.3.4. Системы фокусировки и сканирования

Скорости ионов при той же энергии в $(m_i/m_e)^{1/2}$ раз меньше, чем скорости электронов. Поэтому магнитные линзы, фокусное расстояние которых зависит от заряда и массы частицы, в ионной оптике практически не применяются, так как их фокусное расстояние в реальных системах слишком велико. Основным вариантом являются электростатические линзы, фокусное расстояние которых не зависит от заряда и массы частицы. В ионно-оптических системах применяются диафрагмы, иммерсионные и одиночные линзы. На рис.4.8 приведены схематические изображения этих линз и формулы для оценки их фокусного расстояния.

В ионно-оптических системах, так же как и в электронных проявляются различные виды искажений (аббераций). К ним относятся сферические, хроматические абберации, астигматизм, кома и другие. Особенностью формирования ионных потоков является влияние объемного заряда, гораздо более существенное, чем в электронных пучках. Для одной оптической

системы отношение первенсов ионного и электронного потоков равно корню квадратному из отношения масс иона и электрона. Для снижения влияния объемного заряда последний может быть частично нейтрализован вводимыми извне электронами.

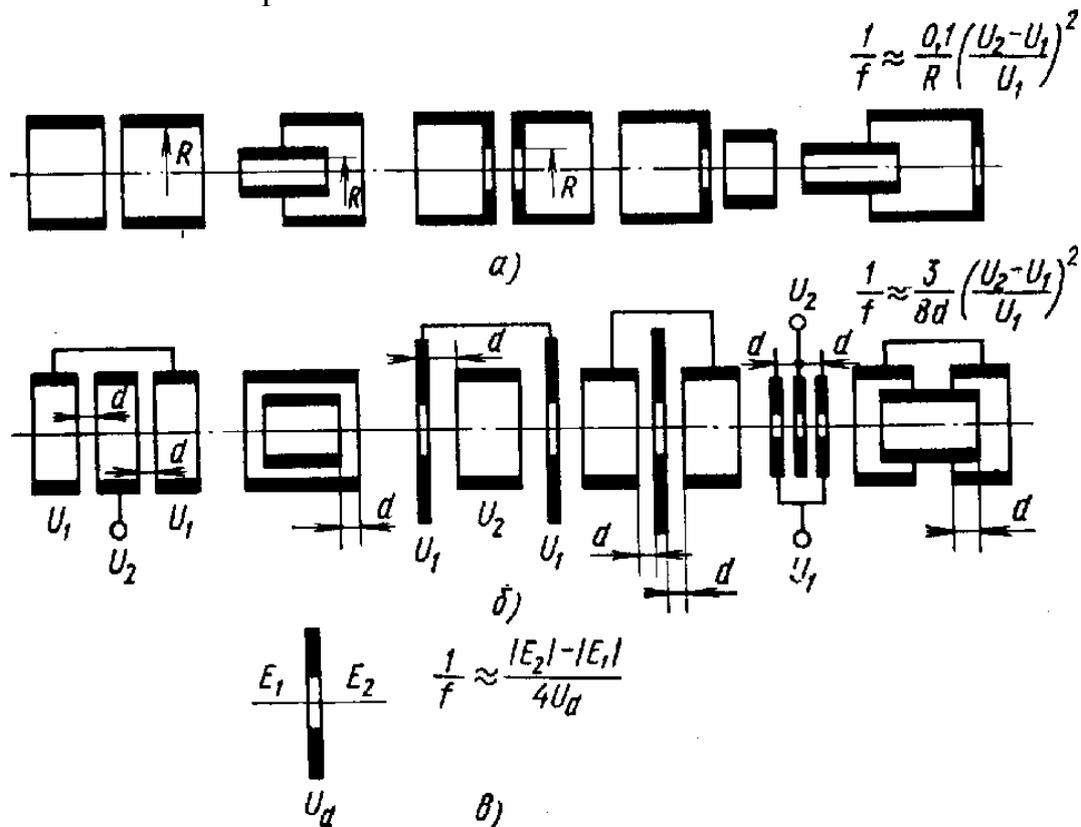


Рис.4.8. Конструктивные схемы иммерсионных (а), одиночных (б) линз и плоской диафрагмы (в): f - фокусное расстояние; U_1 и U_2 - напряжения на электродах; E - напряженность электрического поля

При увеличении энергии пучка до 1 МэВ и более эффективность электростатических линз ухудшается, и используются квадрупольные электростатические и магнитные линзы.

Малая скорость ионов по сравнению с электронами проявляется и в увеличении разброса энергии ионов в пучке. Среднеквадратичный разброс энергии ионов пучка после прохождения оптической системы может быть оценен по уравнению: $\Delta\varepsilon = r_0\beta^{1/2}/v$, где r_0 - радиус пучка в кроссовере, β - яркость источника, v - скорость движения ионов.

При обработке ионным пучком полупроводниковой пластины её необходимо облучать равномерно. Для этого применяют два различных метода.

1. Диаметр ионного пучка, облучающего поверхность образца, должен быть больше размеров образца, распределение плотности ионного тока по образцу должно быть равномерное. В этом случае вместо фокусирующей линзы используют дефокусирующую.

2. Диаметр ионного пучка делают малым, а затем сканируют его по поверхности образца. Система сканирования необходима не только для равномерной обработки пластины, но и для направления пучка в нужную его

часть. Полупроводниковую пластину устанавливают на месте коллектора анализатора ионов по массам. Так как при легировании возникает необходимость свободно изменять температуру и угол легирования, пластина устанавливается в камере для образцов, в которой можно проводить все эти регулировки.

Применимость магнитной отклоняющей системы для сканирования ионного пучка также сильно ограничена из-за малой чувствительности и возможна лишь при высоких энергиях ионов, более 10^5 эВ. При меньших энергиях применяются электростатические системы отклонения. Сканирование пучка осуществляют отклонением его электрическим полем в одном или двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом высокая однородность дозы облучения достигается при сравнительно небольших площадях сканирования. При достаточно больших площадях рисунка часто используется механическое сканирование. Перспективным для электронной техники является комбинированный способ сканирования, когда в пределах одной структуры оно проводится с помощью электрических полей, а переход от структуры к структуре осуществляется механически. Сравнительно малые скорости движения ионов ограничивают и быстродействие ионно-лучевой системы (скорость сканирования).

4.3.5. Вакуумные системы, приемные камеры, устройства контроля

Для проведения ионно-лучевых процессов необходим вакуум порядка 10^{-4} - 10^{-5} Па. Конкретная величина давления определяется требованием отсутствия столкновений ионов с молекулами остаточных газов, которые могут привести к дефокусировке пучка, перезарядке и нейтрализации ионов. Очень важен состав остаточных газов, особенно в области мишени. Наличие паров масел может привести к загрязнению поверхностных слоев продуктами их разложения, поэтому в ионно-лучевых установках применяют главным образом безмасляную откачку (цеолитовые, турбомолекулярные и ионно-сорбционные насосы). Особые требования предъявляются к элементам системы напуска рабочих газов или паров в ионный источник. В некоторых случаях используются системы с дифференциальной откачкой ионного источника.

Приемная камера установки содержит держатели обрабатываемых изделий и систему механического сканирования образцов. В качестве держателей могут использоваться вращающиеся барабаны или подвижные координатные столы. При необходимости в приемной камере монтируют нагреватель для подогрева образцов до нужной температуры и устройства для измерения температуры.

В процессе работы установки необходимо контролировать величину ионного тока в пучке и дозу облучения изделия. Регистрацию силы тока осуществляют с помощью коллекторов ионов - цилиндров Фарадея. Один или несколько коллекторов устанавливают в приемной камере между обрабатываемыми изделиями для непрерывного контроля тока и дозы. Измеряемый сигнал после усиления поступает в систему управления. Так,

например, усилители - интеграторы в цепи обратной связи имеют емкости, подбором которых задается необходимая доза. После того, как доза набрана, замыкаются контакты исполнительного механизма, и ионный поток прерывается механически или электрически.

Контрольные вопросы

Укажите диапазон энергий ионов, используемых в ионно-лучевых установках.

Сформулируйте основные требования к ионно-лучевой установке.

Как работают ионные источники с поверхностной ионизацией?

Каков принцип действия полевых ионных источников?

Перечислите основные типы плазменных ионных источников.

Как устроен дуоплазмотрон?

Какие достоинства имеют плазменные ионные источники?

Как осуществляется вытягивание ионов из источника?

Почему система ускорения ионов делается многосекционной?

В чем заключается принцип сепарации ионного потока?

Как осуществляется формирование ионного потока в ионно-лучевой установке?

Сформулируйте основные особенности формирования ионных пучков.

Почему для отклонения ионных пучков чаще используются электрические поля?

Как можно оценить максимально возможное давление остаточных газов в ионно-лучевой установке?

4.4. ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

4.4.1. Особенности технологии ионного легирования

Технология ионного легирования основана на закономерностях движения ионов в твердом теле, которые были рассмотрены выше. Наиболее широкое применение процессов ионного легирования связано с твердотельной электроникой и микроэлектроникой.

Интенсивная разработка метода ионного легирования (ионной имплантации) полупроводников началась в начале 60-х годов. Толчком к этому послужило бурное развитие микроэлектроники. Интерес к методу ионного легирования вызван тем, что он обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными существующими - диффузией, сплавлением и легированием из расплава. Сравнительно низкая температура обработки полупроводниковых подложек, точный контроль глубины и профиля распределения примеси, гибкость и универсальность, возможность полной автоматизации процесса - всё это позволяет применить метод ионного легирования при изготовлении полупроводниковых приборов с использованием наиболее перспективной планарной технологии и решить проблему интеграции и интенсификации технологических процессов микроэлектроники, поскольку появляется возможность на одной

полупроводниковой пластине получать различные области с широким диапазоном электрических свойств.

Основные задачи технологического применения ионного легирования заключаются в точности определения и предсказания профилей распределения имплантированных ионов и пробегов ионов в твёрдых телах с учётом и без учёта эффектов каналирования и блокировки; местоположений в кристаллической решётке имплантированных ионов, дефектов решётки, возникающих при ионной имплантации, их роли при структурных превращениях; характеристик отжига дефектов; электрических характеристик имплантированных слоев; применения метода ионной имплантации для изготовления полупроводниковых приборов.

Разработаны технологические приёмы и режимы получения ряда полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем на кремнии: планарные микродиоды, спектрометрические детекторы ядерных излучений, умножители электронных потоков, *p-i-n* диоды, варикапы со сверхчувствительностью, высокочастотные биполярные *p-n-p* и *n-p-n* транзисторы, полупроводниковые резисторы с широким диапазоном сопротивлений, высоковольтные вентили, фотодиоды, преобразователи солнечной энергии и т.п.

Следует обратить особое внимание на разработки, в которых сочетается ионное внедрение с широко используемым в промышленности планарным технологическим процессом. Например, применение имплантации с последующим диффузионным отжигом в качестве базового технологического процесса при изготовлении высокочастотных транзисторов, для схем диодно-транзисторной логики позволяет существенно повысить процент выхода годных приборов, уменьшить разброс основных параметров и упростить процесс изготовления за счёт сокращения некоторых технологических операций.

Ионное легирование обладает рядом преимуществ перед традиционными методами модификации свойств поверхностных слоёв твёрдых тел, например, по сравнению с термическим диффузионным методом введения примесей:

- возможность легирования любыми примесными элементами;
- изотропная чистота вводимых примесей;
- простота регулировки концентрации примесных атомов (иногда можно повысить их концентрацию до уровня, превосходящего предельную растворимость);
- влияние окружающей среды сведено к минимуму;
- процесс осуществляется при нормальной температуре (отжиг на несколько сот градусов ниже, чем в диффузионных процессах);
- возможность легирования легкоплавких материалов;
- высокая степень автоматизации и воспроизводимости процесса, простота и удобство регулирования его параметров;
- локальная обработка с использованием защитных масок или остророфокусированных ионных пучков;

- возможность получения скрытых в глубине слоёв, различающихся типом электропроводности;
- возможность получения резких *p-n*-переходов;
- возможность создания твердотельных устройств с повышенной радиационной стойкостью.

При разработке и реализации технологических процессов ионной имплантации необходимо учитывать ряд особенностей. К ним относятся:

- *Образование радиационных дефектов*

Ионная бомбардировка твердого тела сопровождается образованием радиационных дефектов, которые представляют собой как выбитые со своих мест атомы мишени, так и внедренные в междоузлия решетки первичные ионы. Для формирования полупроводниковых структур необходимо, чтобы эти атомы заместили атомы основного вещества в узлах кристаллической решетки. Последнее достигается отжигом, при котором ускоряется процесс диффузии и происходит восстановление решетки.

В технологии микроэлектроники применяются два метода отжига - термический и лазерный. При термическом отжиге весь образец нагревается равномерно. Температура и время отжига для каждого материала подбираются так, чтобы диффузионная длина атомов в решетке была примерно равна среднему размеру кластера. Необходимо отметить, что при термическом отжиге профиль легирования размывается из-за диффузии внедренных ионов. При лазерном отжиге нагревается локально только легированная область материала. Под действием импульсного лазерного нагрева возможно не только ускорение диффузии, но и локальное плавление материала, что значительно ускоряет процесс отжига. Размытие профиля легирующей примеси в этом случае оказывается значительно меньшим.

- *Ионное распыление поверхности мишени*

При легировании материалов большими дозами ионов наблюдается эффект распыления мишени. При увеличении дозы облучения и массы внедряемых ионов возможен эффект насыщения, при котором скорость имплантации ионов становится равной скорости распыления. Профиль легирования с учетом распыления материала мишени описывается выражением:

$$N_x = \frac{N_2}{2S} \left(\operatorname{erf} \frac{x - R_p + Q \frac{S}{N_2}}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right) - \operatorname{erf} \frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p}, \quad (4.13)$$

где S - коэффициент распыления; Q - доза облучения; N - плотность атомов мишени;

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt - \text{функция ошибок.}$$

При насыщении профиля легирования распределение внедряемых атомов по глубине описывается выражением:

$$N_x = \frac{N_2}{2S} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - R_p}{\sqrt{2\Delta R_p}} \right), \quad (4.14)$$

где $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ - дополнительная функция ошибок.

Максимальное значение концентрации внедренной примеси в этом случае находится на поверхности мишени и может быть найдено из уравнения (4.14) при $x = 0$. Эта максимальная концентрация не зависит от дозы имплантированных ионов Q и приближенно равна N/S .

- *Нагрев материала мишени*

При больших дозах облучения становится существенным нагрев материала мишени под действием ионной бомбардировки. Плотность мощности при ионной бомбардировке равна

$$q = \frac{E_0 \cdot j_i}{e}, \quad (4.15)$$

где E_0 - энергия ионов; j_i - плотность ионного тока.

Вся тепловая энергия выделяется в слое толщиной порядка проекции траекторного пробега. Глубина прогретого слоя определяется теплопроводностью материала мишени. Если мишень (например кремниевая пластина) расположена на идеально теплоотводящем контакте с металлической подложкой, то, используя модель поверхностного источника тепла и пренебрегая лучистым теплообменом, можно определить температуру поверхности по уравнению:

$$T = \frac{2q\sqrt{a\tau}}{\sqrt{\pi K}} + T_0, \quad (4.16)$$

где T_0 - начальная температура образца, a - коэффициент температуропроводности, K - коэффициент теплопроводности.

Оценки по уравнению (4.16) показывают, что температура поверхности в этом случае повышается всего на несколько десятков градусов, что мало влияет на скорость диффузии.

При отсутствии теплового контакта обрабатываемой пластины с подложкодержателем теплоотвод происходит с обеих сторон пластины за счет излучения. При этом температура образца в стационарном режиме равна:

$$T = \left(\frac{q}{2\varepsilon\sigma} + T_0 \right), \quad (4.17)$$

где ε - степень черноты материала; σ - постоянная Стефана-Больцмана.

В рассматриваемом режиме температура пластины составляет несколько сотен градусов, и процессы диффузии становятся существенными.

4.4.2. Установки для ионного легирования

Отечественная промышленность выпускает несколько типов установок для ионного легирования материалов: ИЛУ, "Везувий", "Иолла", "Лада" и другие. Технические характеристики некоторых из них приведены в таблице

4.3. Неоднородность легирования в промышленных установках составляет 2 - 4%.

Таблица 4.3.

Установки ионного легирования

Марка	Диапазон энергий, кэВ	Сила тока ионов, мА	Система сепарации	Потребляемая мощность, кВт
«Везувий - 1»	20-200	200 (P ⁺) 20 (B ⁺)	Электро-магнит	55
«Везувий - 2»	20-200	600 (P ⁺) 150 (B ⁺)	Постоянный магнит	15
«Везувий - 3М»	20-150	1000 (P ⁺) 300 (B ⁺)	Постоянный магнит	8
«Везувий - 4»	15-100	700 (P ⁺) 300 (B ⁺)	Постоянный магнит	15
«Везувий - 5»	20-150	3·10 ⁴ (P ⁺)	Электро-магнит	15
«Везувий - 8М»	10-125	10·10 ³ (P ⁺) 2·10 ³ (B ⁺)	Электро-магнит	25
«Везувий - 9»	25-600	10 ⁴ (P ⁺)	Электро-магнит	15
«ИЛУ - 3»	20-80	300 (P ⁺)	Электро-магнит	45
«ИЛУ - 4»	20-100	3·10 ⁴ (P ⁺)	Электро-магнит	45
«Иолла - 2»	50-80	100	Электро-магнит	6
«Иолла - 3»	10-150	10 ⁴ (P ⁺)	Электро-магнит	10

4.5. ТЕХНОЛОГИЯ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Технологические режимы ионного легирования различных материалов предварительно подбираются расчетным путем с использованием приведенных выше уравнений или при численном моделировании процесса, а затем проверяются экспериментально.

Рассмотрим влияние технологических факторов на параметры ионно-легированных слоев. *Энергия ионов* определяет глубину их проникновения в твердое тело и распределение в легированном слое. Энергия ионов также влияет и на распределение плотности дефектов, причем в ряде случаев с увеличением энергии ионов плотность дефектов уменьшается. Это можно объяснить разогревом твердого тела и отжигом дефектов непосредственно в процессе имплантации. *Доза имплантации* определяет концентрацию легирующей примеси и, после отжига дефектов, электрофизические параметры ионно-легированных слоев. *Плотность тока* в пучке определяет температуру обрабатываемой пластины. При больших плотностях тока возможно плавление и термические удары, приводящие к нежелательным последствиям. Поэтому при использовании плотных пучков необходимо охлаждать мишень, хотя это создает дополнительные технические трудности. *Ориентация пластины* относительно ионного пучка влияет на распределение ионов в монокристаллических материалах из-за эффекта каналирования. При формировании локальных легированных областей применяется

маскирование. Маскирующие пленки должны быть достаточно толстыми, чтобы полностью тормозить ионы, иметь низкие коэффициенты распыления, хорошо растворяться после облучения. В качестве материала масок используются оксиды и нитриды кремния, металлы, органические полимерные материалы.

Ионное легирование нашло наиболее широкое применение при формировании структур в кремнии. Для сложных полупроводниковых материалов процесс ионной имплантации имеет определенную специфику.

Рассмотрим особенности технологии ионного легирования сложных полупроводников на примере изготовления активных элементов СВЧ-приборов путём прямой ионной имплантации в полуизолирующую пластину GaAs.

Свойства исходного полуизолирующего кристалла оказывают существенное влияние на профиль распределения концентрации и подвижности носителей заряда, степень электрической активации примеси. Особое место в характеристике полуизолирующего GaAs занимают параметры, определяемые примесным составом кристалла: удельное сопротивление и его разброс по площади пластины, стабильность при термической и радиационной обработке, коэффициенты диффузии основных и фоновых примесей; степень перекомпенсации материала, зависимость этих параметров от методов изготовления полуизолирующего GaAs.

Если во время ионного легирования повысить температуру подложки, то будет происходить отжиг дефектов, который закончится одновременно с окончанием легирования, что удобно в технологии. Метод, основанный на таком принципе, называется горячей имплантацией и состоит в том, что во время легирования образец нагревается до высоких температур. Благодаря такому методу получаются довольно хорошие результаты по отжигу дефектов. Но для образцов, в которых при легировании происходит ускоренная диффузия, такой метод не всегда удобен, так как трудно регулировать профиль распределения примесей. Кроме того при высоких температурах возможна диссоциация GaAs и активное испарение мышьяка.

Если в процессе легирования образец находится при низкой температуре, то исключается перемещение легирующих атомов в подложке, что позволяет достаточно четко выдерживать профили распределения внедренных примесей.

Рассмотрим еще некоторые примеры технологий ионного легирования.

Ионно-лучевая технология межэлементной изоляции

Локальная протонная бомбардировка позволяет эффективно осуществлять изоляцию отдельных элементов на подложке, получать высокоомные области для пассивной части и создавать планарные СВЧ ИМС на эпитаксиальных и исходных ионно-легированных структурах. Первые работы в этом направлении были опубликованы в конце 70-х годов. К настоящему моменту данная технология постепенно вытесняет традиционную изоляцию элементов ИС мезатравлением. Создание изоляции возможно при бомбардировке ионами водорода, гелия, аргона, криптона с

последующей термообработкой. При этом проекционная длина пробега с ростом массы падает. Известно создание высокоомных областей при изготовлении полевого транзистора на GaAs и родственных соединениях с помощью имплантации дейтронов. Наиболее высококачественные изоляционные слои получаются при имплантации ионов бора и кислорода с последующей термообработкой.

Сопротивление облучённых слоёв большой толщины может быть повышено при равномерном по толщине слоя введении дефектов путём "ступенчатого" облучения протонами с различной энергией.

Оптимальным для изоляции слоёв с толщиной до 0,3 мкм является диапазон доз 1-10 мкКл/см² при энергии 75 кэВ. Для толщин от 0,85 до 1,5 мкм оптимальна ступенчатая протонная изоляция с энергиями 150 и 30 кэВ и дозами 10 и 3 мкКл/см². При толщине менее 0,1 мкм использовалась изоляция ионами аргона с энергией 100 кэВ и дозой 0,005 мкКл/см².

Ионно-лучевая технология изготовления полупроводниковых резисторов

Впервые планарные резистивные слои, полученные ионной имплантацией, были созданы для кремневой биполярной технологии. Резисторы формируются путём имплантации ионов аргона через слой окисла с последующим отжигом структуры при температуре 550-650 °С. Затем формируются алюминиевые или молибденовые контакты к сильнолегированным областям. Ионная бомбардировка канала резистора проводится ионами Ar, N, He, H, Si такой дозой, чтобы получить кристаллическую структуру, насыщенную радиационными дефектами, но не аморфизированную. Сопротивление резистивных слоёв при этом выше 1 кОм/ после обработки при температуре 500-800 °С. Применение ионной имплантации позволило расширить функциональные возможности резисторов.

Лучевая технология изготовления металлических резисторов

Резисторы в составе пассивной части ИС на GaAs изготавливаются либо по планарной тонкоплёночной технологии, либо с использованием в качестве резистивного слоя объёма полупроводника. В технологии ИС в качестве резистивных слоёв применяются нанесённые различными методами плёнки металла, силицидов и керметов. При выборе резистивного материала учитываются следующие факторы: удельное поверхностное сопротивление, термостабильность, температурный коэффициент сопротивления, диапазон рабочих частот. В настоящее время разработан технологический процесс изготовления тонкоплёночных резистивных элементов на основе модифицированной ионами азота тонкой алюминиевой металлизации. К достоинствам такой технологии относится возможность изготовления резистивных слоев малых номиналов, формирование контактов к резистам в процессе их изготовления. Недостатком такой технологии является высокая температура при обработке, необходимость дополнительного маскирования элементов схем при облучении большими дозами азота.

Контрольные вопросы

В чем состоит физическая сущность процесса ионного легирования?

Укажите основные преимущества ионного легирования.

Каков механизм образования дефектов при ионном легировании?

Назовите методы отжига дефектов, образующихся при ионной имплантации.

Как влияет ионное распыление на скорость процесса и профиль распределения примеси при ионном легировании?

Как снизить нагрев материала мишени при ионном легировании?

Как влияет на параметры ионно-легированных слоев а) энергия ионов; б) доза имплантации; в) плотность тока в пучке; г) ориентация пластины относительно ионного пучка?

Какова специфика ионного легирования арсенида галлия?

Рассмотрите применение ионной имплантации для создания изолирующих слоев.

Рассмотрите применение ионной имплантации для создания полупроводниковых резисторов.

Рассмотрите применение ионной имплантации для создания металлических резисторов.

4.6. ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Специфика ионной литографии связана с экспонированием ионорезиста остросфокусированным ионным пучком. При формировании рисунка субмикронных размеров минимальный диаметр ионного пучка должен быть меньше 0,1 мкм. Для оценки минимального диаметра ионного пучка в конкретной установке можно воспользоваться соотношением:

$$d_{\min} = \left(\frac{16}{3\pi^2} c^{2/3} \frac{I_0}{\beta} \right)^{3/8}, \quad (4.18)$$

где β - яркость ионного источника, $A/(m^2 \cdot sr)$; I_0 - сила тока луча, A ; c - коэффициент сферической аберрации фокусирующей системы.

Источники на основе легких ионов водорода или гелия имеют малую яркость - порядка $10^6 A/(m^2 \cdot sr)$, поэтому минимальный диаметр пучка составляет около 3 мкм. Пучки с диаметром менее 0,1 мкм могут быть получены из полевых источников тяжелых ионов олова, галлия и других, яркость которых достигает $10^{10} A/(m^2 \cdot sr)$ и более.

Тонкий пучок ионов имеет значительно более слабое угловое рассеяние в мишени, чем пучок электронов, и обеспечивает более высокое разрешение процесса литографии. Поэтому эффекты экспонирования полимерного слоя отраженным от подложки пучком незначительны. Суммарные ядерные и электронные потери энергии ионного пучка в полимерном слое значительно более интенсивны, чем потери энергии электронного пучка; поэтому полимерные резисты оказываются в 10-100 раз более чувствительными к ионному пучку, чем к электронному. Это позволяет надеяться на более быстрый процесс экспонирования тонким ионным пучком. В результате ничтожно малого выхода обратно рассеянных ионов под сравнительно

большими углами рассеяния увеличивается разрешающая способность литографии (снижается влияние "эффекта близости"). Вторичные электроны, появляющиеся в процессе литографии, не оказывают практически влияния на разрешающую способность из-за их низкой энергии (длина пробега менее 0,01 мкм). Поэтому можно ожидать, что методами ионной литографии возможно получить топологический рисунок с меньшей шириной линии, чем методами электронной литографии. В настоящее время разрешение ионной литографии достигает 10 - 20 нм. Наличие источников с широким набором ионов облегчает выбор необходимых технологических условий и дает возможность проведения нескольких процессов в одной ионно-лучевой установке.

В ионно-лучевой литографии так же, как и в электронно-лучевой, существует два способа получения топографического рисунка на пластине, покрытой чувствительным к излучению слоем резиста: последовательным экспонированием каждого элемента топологии остросфокусированным пучком ионов или передачей с помощью ионных лучей изображения маски-шаблона. В соответствии с этими методами разработаны устройства и установки для их практического осуществления. Эти установки можно разделить на три типа: зондовые, проекционные и проекционные с модульным переносом изображения.

В ионно-лучевых зондовых установках поток ионов должен быть сфокусирован в пятно диаметром в несколько десятков нанометров. Размеры поля сканирования не превышают 1 мм², так как при больших углах отклонения изменяются размеры сечения пучка. Для лучшей фокусировки поток обычно диафрагмируют, что приводит к резкому снижению силы тока. Поэтому важное место занимает проблема создания точечных ионных источников с большой яркостью. Основными для ионной литографии являются полевые источники и дуоплазмотроны.

В проекционных ионно-литографических установках применяют потоки ионов с площадью порядка 1 см², в качестве источника обычно используют дуоплазмотрон с накаливаемым катодом. Извлекаемый из него ионный пучок проходит через конденсорную и коллимирующую электростатические линзы и попадает на маску-шаблон. Прошедшие через шаблон ионы формируют его изображение на обрабатываемой мишени. Зазор между шаблоном и мишенью делается минимально возможным, или в нем устанавливаются линзы ускоряющей системы. В проекционных установках используют трафареты со сквозными отверстиями, маски из поглощающих ионы материалов на аморфной поддерживающей мембране и пленочные маски на тонкой монокристаллической основе.

К проекционным установкам модульного переноса изображения относятся устройства с формированием уменьшенного изображения перфорированного шаблона с помощью системы линз. Такие установки существенно более производительны, чем зондовые, достигаемое разрешение составляет 0,5 - 1 мкм.

4.6.1. Ионно-лучевая литография высокомолекулярных органических резистов

При реализации процесса ионно-лучевой литографии используются ионы с начальной энергией от нескольких десятков до нескольких сотен килоэлектронвольт. Все современные высокомолекулярные резисты для электроннолучевой литографии могут быть использованы и в ионно-лучевой. Как и при воздействии электронного луча, при ионном облучении позитивные резисты имеют повышенные скорости растворения из-за разрыва полимерных цепочек (уменьшается средняя молекулярная масса), а негативные резисты становятся нерастворимыми из-за их "сшивки". Процессы разрыва и сшивки полимерных цепочек при ионном облучении резистов обусловлены ядерными соударениями налетающих частиц с атомами полимера. Чем выше потери энергии налетающей частицы при соударениях на единицу длины пути в резисте, тем больше химических актов разрыва или "сшивки" полимерных молекул в облученном объеме.

На рис.4.9 приведен расчет энергетических потерь (dE/dx) быстрых заряженных частиц в позитивном резисте ПММА (полиметилметакрилат). Сплошные линии соответствуют потерям энергии на неупругие (электронные) соударения, а штриховые линии - потерям энергии на упругие (ядерные) соударения. Из рисунка видно, что энергетические потери для электронов с начальной энергией 20 кэВ в десятки раз меньше энергетических потерь тяжелых частиц (ионов). В связи с этим естественно ожидать заметного увеличения чувствительности электронных резистов к облучению ионными потоками. При этом предполагается, что существенно не изменяется радиационно-химический выход, т.е. число химических актов разрыва или сшивки полимерных цепочек на 100 эВ энергетических потерь.

В ионно-лучевой, фото- и электронно-лучевой литографиях основными характеристиками высокомолекулярных органических резистов являются чувствительность, контрастность и разрешающая способность. Эти характеристики описывают производительность процесса и предельные возможности создания микротопологического рисунка. Кроме того, резисты характеризуются плотностью микродефектов, адгезией к материалам, применяемым в микроэлектронике, а также химической, плазмохимической и термической устойчивостью в процессах травления. Чувствительность, контрастность и разрешающая способность существенно зависят от физических процессов взаимодействия излучения с резистом.

Чувствительность ионного резиста - это минимальная доза облучения, необходимая для радиационно-химического превращения полимера по всей толщине облученного участка. (Следует отметить, что измерение чувствительности резиста к разным видам облучения необходимо проводить при фиксированных толщине, времени проявления и составе проявителя.)

Контрастность ионного резиста определяется обратной величиной десятичного логарифма отношения чувствительности к пороговой дозе, необходимой для начала процесса экспонирования.

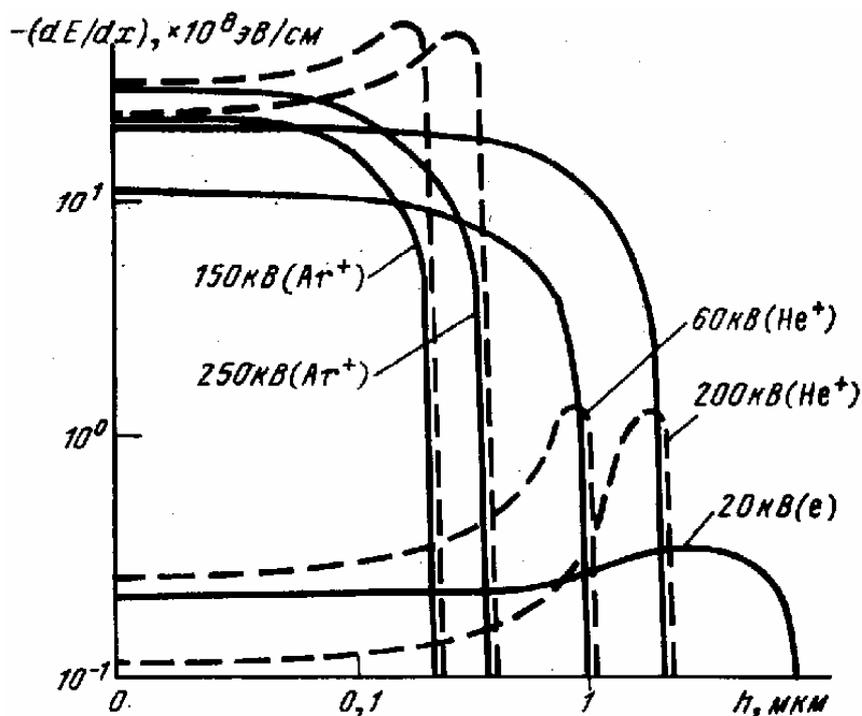


Рис.4.9. Распределение энергетических потерь одной частицы при ее пробеге в резисте ПММА.

Остановимся на *разрешающей способности* резистов, определяемой обычно через минимальную ширину линии, которая может быть проявлена в резистивном слое заданной толщины. Другими словами, разрешающую способность можно характеризовать величиной ухода экспонированной области в направлении, параллельном поверхности резиста. Уход области отсчитывается от перпендикулярной плоскости, которая проходит через границу облученной поверхности резиста. При облучении резистов ионами средних энергий на разрешающую способность резистов практически не влияют обратное рассеяние от подложки и вторичные электроны. Основное влияние на разрешающую способность оказывают упругие соударения налетающих частиц и ядер отдачи с атомами резиста, когда заметно меняется направление пробега. Кроме того, уменьшение разрешающей способности может быть обусловлено угловой расходимостью падающего на резист ионного пучка. Таким образом, задача оценки разрешающей способности резиста сводится практически к расчету эквиэнергетических поверхностей в облученном объеме.

Как показывают расчеты, уход экспонированной области резиста под маску начинает становиться заметным, когда энергетические потери на неупругие и упругие соударения становятся соизмеримыми. В этой области резиста развивается каскад упругих столкновений, приводящий к заметному изменению направления траектории частиц. По мере уменьшения энергетических потерь среднечисловая молекулярная масса полимера увеличивается, стремясь к массе необлученного вещества, а растворимость его в проявителе падает. Изменение условий облучения, толщины резиста и времени проявления позволяет достичь высокой разрешающей способности (в несколько десятков нанометров). Для обеспечения высокой разрешающей

способности в слоях резиста с толщиной 1 мкм расходимость падающего на резист ионного пучка не должна превышать 1,4 град (0,025 рад). В общем случае желательно выбирать такую энергию первичных ионов, чтобы толщина пленки резиста была близка к проекционному пробегу ионов в нем, хотя при субмикронной литографии это условие трудно выполнимо.

Экспонирование резистивного слоя ионным пучком может применяться не только для ускорения травления облученного материала, но и для его остановки. Для этого поверхность резиста облучается потоком ионов с начальной энергией в несколько единиц или десятков килоэлектронвольт. Тонкий приповерхностный слой с имплантированными ионами становится нерастворимой маской в последующем процессе травления. При таком способе литографии картина, проявляемая после ионной бомбардировки, аналогична топологии, проявляемой в негативном резисте. Экспериментально установлено, например, что маской для реактивного ионного травления ряда высокомолекулярных органических резистов может служить тонкий приповерхностный слой, в который имплантированы ионы In^+ с дозой $2 \cdot 10^{16}$ ион/см² и начальной энергией от 3 до 20 кэВ. Реальная разрешающая способность, достигнутая в таком процессе, характеризуется линией с шириной 50 нм.

4.6.2. Ионно-лучевая литография неорганических твердых слоев

Одной из отличительных особенностей ионно-лучевой литографии является селективность в растворении облученных ионами участков неорганических твердых слоев. Эта особенность обусловлена физическим процессом взаимодействия ионного пучка с веществом, в котором проникающие частицы создают дефекты. По мере увеличения плотности этих дефектов с ростом дозы облучения изменяется скорость растворения (травления) вещества. Свойство твердого тела изменять скорость растворения после облучения ионами позволяет в ряде случаев создавать диэлектрические, полупроводниковые и металлические маски без специального органического резиста.

В качестве примера рассмотрим влияние ионной бомбардировки на травление пленок двуокиси кремния, применяемых в изделиях микроэлектроники в качестве диэлектрических масок. Скорость травления двуокиси кремния в смесях с плавиковой кислотой после бомбардировки вещества ионами повышается. Для практики микролитографии важной характеристикой является *селективность* травления пленки - отношение скоростей травления облученного и не облученного материалов. Изменение селективности травления двуокиси кремния с ростом дозы облучения имеет пороговый характер: начало изменения наступает при определенной дозе для данного сорта иона, затем селективность растет с дальнейшим ростом дозы и, наконец, при определенной дозе прекращает расти с дальнейшим увеличением плотности облучения. Доза, при которой начинается увеличение селективности травления, зависит от массы падающего иона. Селективность травления облученных ионами пленок двуокиси кремния

уменьшается после их термического отжига. В заключение перечислим основные результаты, на базе которых можно предположить физическую модель дефектообразования в пленках двуокиси кремния при их ионной бомбардировке:

1. Ионное облучение вносит дефекты, обусловленные ядерными столкновениями и изменяющие свойства вещества в слое на глубине до среднего проецированного пробега иона. Это приводит к повышению скорости травления этого слоя в растворах с плавиковой кислотой.

2. Изменение селективности травления пленок зависит от дозы заданного сорта ионов. Можно выделить два пороговых значения: минимальную дозу, соответствующую началу роста селективности травления, и предельную дозу, соответствующую максимальной селективности травления. При дозах, превышающих предельную, наблюдались две разновидности изменения селективности: постоянство (насыщение) максимальной селективности и ее уменьшение.

3. Максимальная селективность травления пленок, облученных разными ионами при различных энергиях, колеблется от 4,5 до 5,5.

4. Внесенные во время ионной бомбардировки в приповерхностный слой дефекты отжигаются при достаточно высоких температурах (больших 973 К), что указывает на их высокую устойчивость при комнатной температуре.

Контрольные вопросы

От каких факторов зависит минимальный диаметр ионного пучка?

Какие источники пригодны для получения ионных пучков диаметром порядка 0,1 мкм?

Почему полимерные резисты более чувствительны к ионному воздействию, чем к электронному?

Почему разрешающая способность ионной литографии выше, чем электронной?

Укажите основные способы получения рисунка при ионно-лучевой литографии.

Какие процессы происходят при экспонировании полимерного резиста ионным лучом?

От каких факторов зависит разрешающая способность ионно-лучевой литографии?

Какую разрешающую способность может обеспечить ионно-лучевая литография?

Укажите особенности ионно-лучевой литографии неорганических слоев.

Почему меняется растворимость неорганического материала после ионной бомбардировки?

4.7. МОДИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ

4.7.1. Структурные превращения при ионной бомбардировке

Внедрение примеси, образование и накопление различных радиационных дефектов при ионном облучении могут приводить к различным структурным превращениям. Известны несколько типов структурных превращений, происходящих при ионной бомбардировке: кристалл - аморфное вещество (аморфизация); аморфное вещество - кристалл (кристаллизация); кристалл-кристалл (изменение размера и ориентации зерен в поликристалле, изменение типа кристаллической решетки).

В связи с тем, что поведение металлов под действием ионной бомбардировки очень сильно отличается от поведения полупроводников и диэлектриков, рассмотрим эти два класса отдельно.

Металлы характеризуются высокой скоростью отжига радиационных дефектов. Поэтому даже при комнатной температуре аморфизации металлов практически не происходит. Тем не менее структурные превращения третьего типа (кристалл-кристалл) в условиях ионной бомбардировки оказываются весьма вероятными.

При облучении металлических поликристаллических пленок может происходить изменение преимущественной ориентации зерен, причем обычно получаемые структуры ориентированы по наиболее плотно упакованным направлениям параллельно ионному пучку. Это можно объяснить тем, что в плотно упакованном направлении наилучшим образом осуществляется каналирование ионов, поэтому удельные энергетические потери минимальны. В областях с другой ориентацией потери выше, и при торможении ионов в них происходит расплавление материала (тепловой пик). В этих условиях области с благоприятной ориентацией (есть каналирование, нет расплавления) будут играть роль центров кристаллизации, то есть затравок, на которых происходит рост кристалла. Очевидно, что некоторый вклад в изменение ориентации зерен на поверхности поликристалла может вносить также процесс ионного распыления. Так как коэффициенты ионного распыления для разных граней различны, то кристаллики с неблагоприятной ориентацией будут быстрее распыляться, и поверхность будет обогащаться кристалликами с такой ориентацией, которой соответствует минимальная скорость распыления.

Кроме того, как показали структурные исследования, ионное облучение может приводить к перестройке решетки. Если облучению подвергается металл с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой, то возможен переход к более плотноупакованным решеткам - гранецентрированной кубической (ГЦК) или гексагональной плотноупакованной (ГПУ). Интересно, что ионным облучением можно получить гексагональное железо и никель, гранецентрированные кобальт, титан, ванадий, чего не удавалось добиться в области нормальных давлений и температур другими методами. Полученные таким способом (в неравновесных условиях) кристаллы

оказывались метастабильными, их нагрев приводил к восстановлению исходной структуры.

Для некоторых комбинаций ион-металл при имплантации больших количеств примеси (5 - 10 %) образуются некристаллические сплавы, для которых характерна аморфная, стеклообразная структура. Примерами таких систем являются W-Cu, Ta-Cu, V-Ni, P-Ni (первым указан сорт имплантированных ионов). Такие метастабильные сплавы могут быть достаточно устойчивыми.

Материалы с неметаллическим типом электропроводности ведут себя под действием облучения по разному. Наблюдается как аморфизация кристаллических, так и кристаллизация аморфных веществ. Очень грубо поведение того или иного материала под действием ионной бомбардировки можно предсказать, зная температуры плавления $T_{пл}$ и кристаллизации $T_{кр}$, где $T_{кр}$ - нижняя граница температурного интервала, в котором идет процесс кристаллизации. При $T_{кр}/T_{пл} < 0,3$ кристаллические вещества проявляют радиационную стойкость, а аморфные кристаллизуются. При $T_{кр}/T_{пл} > 0,3$ происходит аморфизация кристаллов. Конечно, такой критерий очень груб, так как не учитывает другие (помимо тепловых) радиационные дефекты, а поэтому пользоваться им надо с осторожностью. Так, например, для Ge и Si $T_{кр}/T_{пл} = 0,6$ и при ионной бомбардировке должна происходить их аморфизация. Однако из экспериментов известно, что ионы He при комнатной температуре не аморфизуют кремний. Увеличение температуры мишени во время бомбардировки приводит к тому, что ионы все больших масс теряют способность переводить Ge и Si в аморфное состояние. Критические температуры $T_{крит}$, выше которых, облучая даже тяжелыми ионами, не удастся аморфизовать эти кристаллы, равны 600 К для германия и 700 К для кремния. Очевидно, что отсутствие аморфизации при $T > T_{крит}$ является следствием того, что термический и радиационно-стимулированный отжиг дефектов позволяют поддерживать монокристаллическое состояние образца. Радиационно-стимулированные процессы оказывают значительное влияние и на закономерности восстановления кристаллической решетки. Так, например, при непрерывной бомбардировке ионами аргона удается снизить температуру кристаллизации аморфного Ge на 150-200 градусов по сравнению с температурой кристаллизации в отсутствие облучения.

Еще одно интересное явление, получившее название *эффекта больших доз*, было обнаружено для кремния. Оно состоит в том, что при бомбардировке ионами P, V, As приповерхностный слой Si сначала аморфизуется, а затем снова кристаллизуется. За повторную кристаллизацию ответственны три фактора: нагревание кристалла ионным пучком, радиационно-стимулированные процессы и снижение температуры кристаллизации при накоплении в приповерхностном слое примеси.

4.7.2. Ионный синтез, Ионная металлургия, Ионная эпитаксия

Пусть в мишень, состоящую из атомов В, имплантировано большое количество ионов А. Если в природе при нормальных условиях существует

соединение АВ, то естественно ожидать, что в результате имплантации такое вещество будет синтезировано, по крайней мере, в виде отдельных зерен (вкраплений). Создание соединения в результате ионной бомбардировки будем в дальнейшем называть *ионным синтезом*.

Интерес, проявляемый к ионному синтезу в настоящее время, обусловлен рядом его достоинств как технологического метода создания тонких слоев химических соединений. К числу этих достоинств относится возможность обеспечить высокую чистоту ионного пучка при использовании масс-сепараторов; контроль количества и глубины внедрения имплантируемого элемента; получение "захороненных" слоев синтезируемого вещества. Ионным синтезом можно создавать защитные пленочные покрытия, изолирующие слои при изготовлении интегральных схем, антикоррозионные покрытия, световоды и т.п.; синтезировать сверхпроводящие материалы.

Ионный синтез перспективен при изготовлении полупроводниковых структур на основе тройных соединений, например GaPAs, GaAlAs и др. Тонкие слои таких соединений могут быть получены внедрением ионов Р или Al в GaAs. Эти тройные соединения замечательны тем, что изменение состава (увеличение доли фосфора или алюминия) сопровождается изменением энергетической зонной структуры и, в частности, ширины запрещенной зоны.

Синтез нового соединения в общем случае происходит через образование молекулярных комплексов, накопление которых по мере увеличения дозы и приводит к желаемому результату. Очевидно, что для создания нового вещества внутри исходного требуется некоторая энергия активации, так же как для аналогичной химической реакции в газовой фазе. В твердой фазе синтез затруднен из-за наличия близко расположенных соседних атомов, которые препятствуют возникновению новой структуры. Таким образом, создание новой структуры должно идти через стадию, на которой все атомы находятся не в исходных и не в конечных состояниях, т.е. через стадию "беспорядочного" расположения. Поэтому синтез, по-видимому, должен идти преимущественно в тепловых пиках, так как именно в них за счет высокой температуры имеются условия для перестройки пространственного расположения атомов и образования новых молекулярных комплексов. Очевидно также, что наиболее вероятной областью синтеза является область перекрытия профилей распределения внедряемой примеси и радиационных дефектов.

Механизм ионного синтеза в изолированных тепловых пиках предполагает неупорядоченное расположение зародышей новой фазы. Кроме того, как и при обычной имплантации, в облучаемой матрице создается большое число радиационных нарушений. Поэтому для завершения процесса получения нового материала необходим высокотемпературный отжиг. При отжиге структура новой фазы упорядочивается, и происходит увеличение занимаемого ею объема.

Ионный синтез может идти и по другой схеме. Сначала имплантацией приготавливают близкую к стехеометрическому составу смесь. Затем при высокотемпературном прогреве за счет диффузии и химических реакций в твердой фазе проводят собственно синтез нового соединения.

Другой класс веществ, создаваемых ионной бомбардировкой, - твердые растворы и сплавы. Приготовление сплавов и твердых растворов ионным внедрением является особым научно-техническим направлением, которое может быть названо *ионной металлургией*. Как показывает практика, ионной имплантацией удается создавать не только равновесные сплавы, изготовление которых возможно обычными металлургическими способами, но и новые, метастабильные, сплавы. Примером является сплав AgCu, приготавливаемый имплантацией ионов Ag в медь. При температурах ниже 300 градусов Цельсия практически все атомы серебра (исследования проведены до концентрации 17 ат.%) находятся в узлах решетки. Иными словами, положения атомов Ag и Cu в пространстве эквивалентны, т.е. такой "пересыщенный твердый раствор" является раствором замещения. При температуре выше 310 градусов Цельсия этот раствор замещения распадается.

Известно, что элементы с одинаковым типом кристаллической решетки образуют непрерывный ряд твердых растворов только при малых отличиях между атомными радиусами (в пределах 15 %) и электроотрицательностями компонентов. Для ионной металлургии эти критерии оказываются менее жесткими. Метастабильные сплавы замещения образуются при ионной имплантации, если радиус атомов имплантируемой примеси лежит в пределах 85-140 % радиуса атома растворителя, а их электроотрицательности отличаются менее чем на 0,7. Ясно, что менее жесткие правила - следствие неравновесности процесса имплантации. Одной из причин этого является, в частности, возможность так называемых замещающих столкновений, т.е. столкновений, когда ион на излете еще выбивает атом из узла решетки, а сам уйти из этого узла из-за недостатка энергии уже не может и остается в нем. Очевидно, что замещающие столкновения особенно вероятны при небольших различиях между массами атомов мишени и ионов. Именно замещающими столкновениями объясняется то, что при имплантации небольших (до 1 %) концентраций вольфрама и тантала в медь образуются метастабильные растворы замещения W-Cu и Ta-Cu, хотя в обычных условиях эти атомы несмешиваемы (дальнейшее увеличение концентрации W или Ta в меди сопровождается переходом сплава в аморфное состояние).

Как уже отмечалось, когда коэффициент ионного распыления мал, при имплантации могут быть достигнуты концентрации примеси, сравнимые с концентрацией атомов в матрице и даже практически равные ей. Пересыщенные растворы имплантируемой примеси в облучаемой матрице могут быть получены при существенно менее жестких условиях, причем концентрация примеси может превышать предел растворимости на несколько порядков. Если температура мишени во время облучения или при последующем отжиге достаточно велика для того, чтобы была возможна

миграция внедрившихся частиц, то приготовленный ионной имплантацией метастабильный твердый раствор распадается с выделением одной или нескольких новых фаз.

Одним из применений ионов в технологии является *ионная эпитаксия*. С помощью ионных пучков низких энергий можно наращивать на твердых подложках монокристаллические пленки материалов аналогично тому, как это делается при использовании атомных пучков. Преимуществами такой ионной эпитаксии является возможность очистки ионного пучка с помощью масс - сепаратора, хорошая адгезия пленок, более высокие, чем при термическом напылении, плотность и совершенство структуры приготавливаемых пленок.

Механизм получения плотных бездефектных пленок состоит в следующем. Если энергии ионов $E = 20 - 50$ эВ, то такой энергии, с одной стороны, недостаточно для образования дефектов, а с другой - может вполне хватить для обеспечения миграции вакансий из объема к поверхности. За счет передачи импульсов от ионов в глубь наращиваемой пленки будет происходить ее своеобразное "утрамбовывание", что и обеспечит уменьшение в объеме пленки концентрации вакансий, дислокационных петель вакансионного типа, микропор. Отметим также, что ионной бомбардировкой при наращивании пленок можно видоизменить процесс их роста и получить пленки с особыми свойствами. Во-первых, при бомбардировке увеличивается адгезия пленок, во-вторых, на начальной стадии зародышеобразования вследствие радиационного воздействия на матрицу увеличивается число центров конденсации, что обеспечивает более равномерный (по поверхности) рост пленки. Наконец, ионная бомбардировка способствует слиянию отдельных "островков", в результате чего сплошная пленка образуется при существенно меньших толщинах, чем в случае обычного термического напыления. Применение ионной бомбардировки позволило, в частности, получить углеродные пленки с особыми свойствами, которые были названы алмазоподобными.

Контрольные вопросы

Какие типы структурных превращений возможны при бомбардировке твердого тела ионами?

Каковы особенности структурных превращений при ионной бомбардировке металлов?

Приведите примеры образования метастабильных (неравновесных) структур в металлах при ионной бомбардировке.

В чем особенности структурных превращений в материалах с неметаллическим типом проводимости?

В чем суть ионного синтеза?

Рассмотрите механизмы процесса ионного синтеза.

Приведите примеры применения процессов ионного синтеза.

В чем особенности получения сплавов и твердых растворов при ионной бомбардировке?

Рассмотрите механизм образования пересыщенных твердых растворов.
В чем преимущества процесса ионной эпитаксии?

Сформулируйте механизм получения плотных бездефектных пленок при осаждении из ионного пучка.

4.8. ИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

4.8.1. Физика процессов распыления материалов при ионной бомбардировке

Направленный на твёрдые тела ускоренный пучок ионов способен разрушать их, при этом возникает эмиссия атомов. Эмиссию частиц вещества под действием ионной бомбардировки принято называть ионным распылением или катодным распылением, что исторически связано с наблюдаемым разрушением катодов в газоразрядных приборах.

Первые модели, пытавшиеся объяснить распыление вещества, опирались на механизм термического испарения атомов с поверхности, нагретой до температуры испарения ионной бомбардировкой. В такой теории «локального разогрева» предполагалось, что катодное распыление есть результат испарения вещества из области, нагреваемой в месте удара бомбардирующего иона за счёт его кинетической энергии. Однако термические теории распыления материалов не согласуются с экспериментальными результатами по распылению различных материалов.

В настоящее время общепризнанным является импульсный (нетермический) механизм разрушения поверхности твёрдых тел под действием ионной бомбардировки. В этом случае происходит обмен импульсами при столкновениях бомбардирующего иона с атомами решётки и атомов решётки между собой.

Теория ионного распыления основана на предположении о парных упругих столкновениях. Для того чтобы атом оторвался от поверхности, ему должна быть сообщена энергия, превышающая энергию связи атома с поверхностью твёрдого тела. Следовательно, существует пороговая энергия $E_{пор}$, сообщаемая поверхностным атомам и равная энергии связи поверхностных атомов. Пороговая энергия распыления связана с энергией сублимации соотношением

$$E_{пор} = \frac{(1 + \mu)^2}{\mu} E_{суб}, \quad (4.19)$$

где $\mu = M_2/M_1$ приведенная масса.

В случае кинетических энергий, значительно превышающих пороговую, имеется весьма убедительное доказательство того, что распыление является результатом ряда независимых парных столкновений такого же типа, как если бы ион (или нейтрализованный ион) сталкивался с атомами облака газа. Здесь, конечно, решающую роль играют отдельные массы каждой из сталкивающихся частиц. Если бомбардировка поверхности осуществляется при нормальном падении ионов, то для испускания распыленных атомов необходимо более чем одно столкновение, так как

направление вектора импульса должно быть изменено более чем на 90 градусов. Распыление атомов или ионов, являющееся результатом единичного столкновения между ионом и поверхностным атомом, можно обнаружить только при наклонной бомбардировке. При кинетических энергиях примерно 100 эВ ионы начинают внедряться в кристаллическую решетку мишени. Так для ионов Ar^+ глубина проникновения в Cu равна приблизительно 1 нм/кэВ. Структура и ориентация кристалла являются важными факторами, определяющими глубину проникновения. По мере того, как происходит распыление, устанавливается равновесное состояние, при котором внедренные ионы распыляются так же, как атомы мишени. При высокой кинетической энергии доминирующими явлениями становятся всё более увеличивающиеся объемные нарушения решетки и глубокое проникновение ионов. В результате коэффициенты распыления перестают возрастать пропорционально энергии ионов и достигают слабо выраженного максимума, который для более легких ионов соответствует значительно меньшим энергиям (для H^+ при 2 кэВ), чем для тяжелых ионов (Hg^+ при 50-100 кэВ). Если мишенью является тонкая фольга, то при достаточно высоких энергиях (МэВ - протоны) можно фактически наблюдать большее распыление с тыльной поверхности фольги, чем с лицевой.

Распыление материалов количественно характеризуется коэффициентом распыления S , который определяется количеством выбитых одним ионом атомов. $S = n_a/n_0$, где n_a - число выбитых атомов; n_0 - число ионов, бомбардирующих материал.

Коэффициент распыления сильно зависит от заряда бомбардирующих ионов. Экспериментально установлено, что коэффициенты распыления материалов изменяются значительно сильнее в зависимости от природы ионов (в 100 раз и более), чем от природы атомов мишени (в 10 раз).

Коэффициенты распыления максимальны для ионов инертных газов и минимальны - для элементов, расположенных в центральных столбцах периодической системы элементов (Al, Ti, Zr, Hf и др.).

При увеличении дозы, выражаемой в единицах ион/см², происходит накопление ионов в поверхностном слое мишени, в результате чего образуется своеобразный твёрдый раствор атомов мишени и бомбардирующих ионов. Коэффициент распыления в этом случае может резко измениться. Коэффициент распыления мишеней ионами одного и того же элемента также не монотонно зависит от номера элемента мишени, что связано с периодичностью изменения энергии связи атомов.

С увеличением энергии выше пороговой (до 100 эВ) интенсивность процесса распыления возрастает в 10^3 - 10^4 раз, при этом коэффициент распыления составляет 0,1-0,4 атом/ион. Теория распыления достаточно хорошо разработана для условий бомбардировки металлов монокинетическими ионами. Согласно теории Зигмунда коэффициент распыления может быть найден из уравнения:

$$S = \frac{3\beta M_1 M_2 E_0}{\pi^2 (M_1 + M_2)^2 \cdot 2E_{\text{суб}}}, \quad (4.20)$$

где β - функция отношения M_2/M_1 , приведенная на рис.4.10.

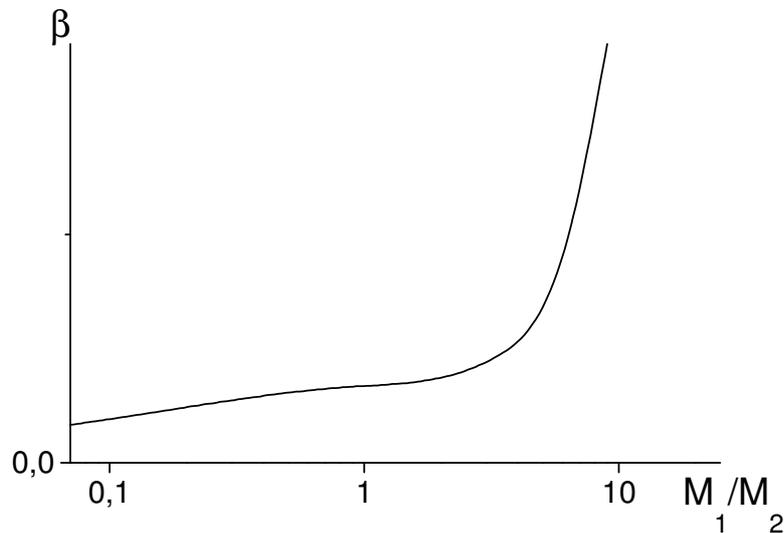


Рис.4.10. График функции $\beta=f(M_1/M_2)$

Это уравнение справедливо при сравнительно малых энергиях первичных ионов, когда их столкновения с атомами мишени можно рассматривать как упругие.

При энергиях ионов более 1 кэВ следует учитывать зависимость коэффициента распыления от ядерной тормозной способности:

$$S = \frac{\beta N_2^{3/2} S_n(\epsilon)}{4 E_{\text{суб}}}. \quad (4.21)$$

Ядерную тормозную способность можно вычислить по уравнению:

$$S_n(\epsilon) = \frac{Z_1 Z_2 e^2 M_1}{(M_1 + M_2) \epsilon_0} \sigma(\epsilon), \quad (4.22)$$

в котором $\sigma(\epsilon)$ - сечение ядерного торможения;

$$\epsilon = \frac{4\pi\epsilon_0 M_2 a E_0}{(M_1 + M_2) Z_1 Z_2 e^2} - \text{приведенная энергия ионов};$$

$a = 0,885 a_0 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{-1/2}$ - характерный радиус экранирования;

$a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м - боровский радиус атома водорода.

Для наиболее часто используемого в технологии диапазона энергий ионов сечение ядерного торможения может быть определено по эмпирическому уравнению:

$$\sigma(\chi) = \frac{0,45\sqrt{\epsilon}}{0,3 + \epsilon}.$$

Приведенные выше уравнения могут быть использованы для количественных оценок коэффициента распыления металлов при анализе и

выборе режимов технологического процесса. Более строгие расчеты могут быть сделаны в рамках численного моделирования процесса распыления. Рассмотренные подходы справедливы при бомбардировке металлов монокинетическими ионными пучками. Но процессы ионного распыления монокинетическими пучками редко применяются в технологии из-за их сравнительно малой производительности и сложности используемого оборудования. Гораздо чаще применяется ионно-плазменная обработка, теоретическое описание которой существенно усложняется немонокинетичностью и неоднородностью состава ионных потоков, эффектами переосаждения распыленных частиц и другими факторами. Подробнее вопросы технологии ионного распыления в различных вариантах будут рассмотрены ниже.

4.8.2. Ионное травление поверхности

Ионное травление используется для выполнения значительного количества технологических процессов: очистки поверхности, микрофрезерования поверхностных слоёв, полировки, выявления кристаллической структуры поверхности, микрообработки с целью придания элементам необходимых формы и размеров и т.д. Особенно эффективно использование ионного распыления для "сухого" процесса травления. В отличие от химического травления обработке подвергаются любые материалы, не требуются химические реактивы, отсутствуют после операции следы химических соединений. Если ионное травление выполняют через открытые окна в защитных масках, нанесённых заранее на поверхность, то отсутствует подтравливание под ними, края травления ровные и соответствуют направлению бомбардирующего потока ионов. Подбором материала маски с меньшим коэффициентом распыления, чем обрабатываемая мишень, можно обеспечить значительные глубины травления. При этом высокие требования к адгезии маски отсутствуют. Материалом масок выбирают органические полимеры (фото-, электроно- или ионорезисты), неорганические диэлектрики типа SiO_2 , Si_3N_4 или плёнки металлов. При соизмеримых коэффициентах распыления толщины масок примерно соответствуют толщинам стравливаемых слоёв мишени, хотя желательно выбирать материал маски с минимальной скоростью ионного травления по сравнению с мишенью.

Так как результат ионного травления зависит от угла падения ионов, то при больших углах бомбардировки значительная часть ионов может отражаться, разрушая боковые стенки масок, наблюдается быстрое стравливание первоначально острых углов масок. Часть распыляемого материала мишени переосаждается, что также меняет конфигурацию маски. Особенно влияет на наличие заданных размеров областей травления изменение конфигурации масок у их оснований. Поэтому в процессе ионного травления целесообразно изменять угол падения, не превышая его критического значения. Такие изменения осуществляют вращением и поворотом держателя мишени относительно направления ионного потока. С

целью ионной полировки поверхности угол бомбардировки поддерживают оптимальным.

Различают три разновидности процесса ионного травления: физическое (ионами инертных газов), плазмохимическое и ионно-химическое. В процессах травления ионами инертных газов (Ar^+ , Ne^+ , Kr^+ и др.) разрушение материала происходит только вследствие передачи кинетической энергии от ионов атомам поверхности твёрдых тел. Ионы можно извлекать из плазмы, которая окружает мишень, или направлять их на поверхность потоком из отдельного ионного источника. Скорости травления в этом методе недостаточно большие. Так, травление SiO_2 ионами аргона с энергией 1 кэВ и плотностью тока 1 mA/cm^2 протекает со скоростью порядка 15 нм/мин.

В плазмохимических процессах удаляемый поверхностный слой материала представляет собой летучие стабильные соединения. Соединения образуются в результате химических реакций атомов твёрдого тела мишени с ионами и радикалами химически активных газов и паров. Этому процессу свойственны высокая селективность травления различных материалов и меньшие радиационные повреждения, чем при травлении ионами инертных газов. Скорость процесса при этом существенно выше, например для SiO_2 она достигает 500 нм/мин. Однако в плазмохимических процессах наблюдается большее подтравливание слоёв под масками, разрешающая способность метода хуже, чем при ионном травлении.

При ионно-химическом травлении для разрушения поверхностных слоёв обрабатываемого материала используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химических реакций с атомами материала. В этом методе совмещаются преимущества первых двух: высокая селективность и большая скорость травления. Мишень можно поместить в плазму (реактивное ионно-плазменное травление) или бомбардировать её пучком химически активных ионов из автономного ионного источника (реактивное ионно-лучевое травление).

Рабочими газами для двух последних процессов обычно выбирают хлор- и фторсодержащие соединения или кислород, например, травление Si, SiO_2 , Si_3N_4 , W, Mo, Ti, Ta осуществляют чаще в плазме CF_4 ; Al - в CCl_4 и BCl_3 . Продуктами реакций являются летучие фтористые и хлористые соединения, например, SiF_4 . Хром эффективно травят в хлор-кислородной плазме.

Для реализации процессов ионного травления используют различные установки, отличающиеся способами возбуждения и поддержания разрядов, типами автономных ионных источников, способами перемещения обрабатываемых изделий и т.д. Наибольшее распространение получили системы на постоянном токе и высокочастотные. Они могут быть диодными, триодными, тетродными и многоэлектродными. Степень универсальности, контролируемости и управляемости процессов ионного травления во многом определяется выбором соответствующей системы. Для примера рассмотрим принцип действия трёх высокочастотных (ВЧ) систем плазменного травления (рис.4.11).

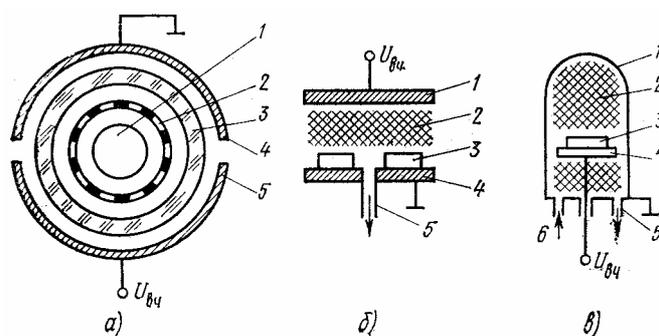


Рис.4.11. Схемы устройств для ионно-плазменного травления: *а* - трубчатый реактор с перфорированной алюминиевой трубой (1- обрабатываемое изделие; 2 - перфорированная труба; 3 - кварцевый баллон; 4 - заземлённый электрод; 5 - высокочастотный электрод); *б* - плоский реактор с изделиями на заземлённом электроде (1 - высокочастотная пластина; 2 - плазма; 3 - изделие; 4 - заземлённая пластина; 5 - патрубок для откачки); *в* - реактор для травления реактивными ионами (1 - заземлённый корпус реактора; 2 - плазма; 3 - изделие; 4 - высокочастотная пластина; 5 - откачка газа; 6 - напуск газа)

В трубчатом реакторе с перфорированной алюминиевой трубой плазма высокочастотного разряда поддерживается в цилиндрическом зазоре между кварцевыми баллоном и трубой. Травление изделия происходит долгоживущими радикалами, диффундирующими из плазмы через перфорации трубы к поверхности изделия. Ионы, разряжаясь на трубе, не достигают его. Если использовать рабочий газ CF_4 , то на поверхности трубы возникает защитная плёнка фторида алюминия, препятствующая её разрушению. При давлении рабочего газа 30-300 Па время жизни радикалов CF_3 и F составляет 0,3 с, что при коэффициенте диффузии $50 \text{ см}^2/\text{с}$ обеспечивает диффузионную длину их движения порядка 250 мм. Радикалы свободно достигают поверхности изделия, обеспечивая процесс его изотропного травления. Равномерное травление происходит до значительных глубин (порядка 2 мкм). Скорость процесса зависит от состава газа, его потока и температуры изделия.

В плоском реакторе изделия располагаются на нижней заземлённой пластине. В зазоре от 10 до 50 мм между заземлённой нижней пластиной и верхней с помощью высокочастотного генератора поддерживается разряд. Давление рабочего газа составляет 10-100 Па. Поверхности изделий, обращённые к плазме, подвергаются воздействию ионов из плазмы разряда и короткоживущих радикалов, при этом ионы вносят ограниченный вклад по скорости в результат процесса травления. В целом в таком устройстве реализуется анизотропное травление с преобладанием разрушения изделия вглубь от плоскости, обращённой к плазме.

В реакторе для травления реактивными ионами изделие расположено на пластине, погруженной в плазму высокочастотного разряда. Разряд поддерживается от внешнего генератора между заземлённым корпусом и внутренним электродом - пластиной, размеры которой меньше внутреннего

диаметра корпуса. При давлении рабочего газа 1-10 Па травление происходит практически только вследствие бомбардировки изделия реактивными ионами. Их вклад в процесс гораздо больше, чем в двух предыдущих устройствах. Значительнее проявляются радиационные повреждения вследствие ионной бомбардировки. В целом процесс в этом типе реактора характеризуется значительной анизотропией травления.

В плазменных реакторах рассмотренных типов можно эффективно травить металлы, полупроводниковые материалы и окислы. Например, используя высокочастотный разряд на частоте 13,56 МГц при выходной мощности генератора 100 Вт и давлении в плоском реакторе 26 Па достигнуты скорости травления для Si - 195, Si₃N₄ - 100, SiO₂ - 20 нм/мин.

4.8.3. Ионно-лучевые методы осаждения покрытий

Тонкие и толстые пленки и покрытия с воспроизводимыми и заранее заданными свойствами можно получать в условиях высокого вакуума двумя методами - осаждением из сепарированных ионных пучков и из дуги в парах материалов электродов.

Осаждение тонких пленок из сепарированных ионных пучков - самый "чистый" способ, хотя его производительность и невелика. Для микро- и оптоэлектроники, функциональной электроники возможность получения строго контролируемых по составу, практически беспримесных, однородных по структуре тонких пленок открывает новые перспективы создания устройств с уникальными эксплуатационными характеристиками.

Данный метод заключается в создании потока ионов определенного вида и энергии и осаждения их на выбранной подложке. Осаждение проводится в сверхвысоковакуумной камере, поэтому в пленках отсутствуют газовые включения, свойственные плазменным методам. Сепарация ионов по отношениям их массы к заряду исключает из состава ионов пучка посторонние примеси, в том числе ионы материалов электродов ионного источника. Если в широко распространенных для выращивания пленок плазменных методах ионы, падающие на подложку, имеют распределение по энергиям от нуля до нескольких кэВ, то в этом методе их энергетический диапазон очень узок. Чтобы исключить распыление наносимой пленки и обеспечить оптимальные условия ее роста, необходимо вести осаждение при относительно малых энергиях ионов. Например, рост пленок хрома осуществляется при энергиях менее 500 эВ. Известно, что межфазные образования и кинетика роста пленки определяются кинетической энергией ионов, попадающих на подложку. Поэтому, регулируя энергию ионного потока, можно эффективно управлять процессом роста и качеством пленки.

При термическом методе вакуумного напыления покрытий конденсирующиеся атомы имеют энергию, не превышающую 0,3 эВ. Для активации протекающих в ходе конденсации процессов обычно нагревают подложку. Ее температура является одним из основных параметров, определяющих структуру пленки и ее адгезию к подложке. Для получения

высококачественных пленок абсолютная температура подложки составляет 0,3 – 0,5 от температуры плавления осаждаемого материала.

В ионном пучке энергия частиц значительно выше, что позволяет получить пленки с хорошей адгезией на холодных подложках. Процессы конденсации в сравниваемых методах отличаются уже на первых стадиях образования зародышей. Размеры зародышей в случае ионного осаждения меньше, а их количество на единице поверхности больше. Сплошность пленки достигается при меньших толщинах.

На рост гомо- и гетероэпитаксиальных пленок влияют такие факторы, как энергия ионов, ориентация поверхности подложки, состав остаточных газов и температура поверхности подложки. Исследования процесса роста пленок методом просвечивающей электронной микроскопии, а также свойств пленок с помощью масс-спектрометра вторичных ионов и электронного оже-спектрометра позволили сделать следующие выводы. Слипание и образование островков серебра и цинка как стадии начала роста зависят от плотности дислокаций на подложке. Плотность дислокаций становится высокой, когда осаждение происходит при относительно большой энергии ионов или же когда оно проводится на плоскость с плотной упаковкой.

Ионы с большой кинетической энергией формируют глубокий диффузионный слой. Это же явление наблюдается и для плоскостей с плотной упаковкой. Образование глубоких диффузионных переходных слоев можно объяснить переносом осажденного материала через дислокационные ядра или точечные дефекты Френкеля.

4.8.4. Ионное распыление и получение тонких пленок

Распыление материалов под действием ионной бомбардировки широко используется для получения тонких плёнок. Эти плёнки являются основой для формирования различных тонкоплёночных элементов интегральных микросхем, могут повышать коррозионную стойкость материалов, изменять их оптические характеристики, функциональные свойства и так далее.

Область энергий ионов, представляющая наибольший интерес для получения тонких пленок методом ионного распыления, простирается от пороговой энергии (как, например, в схемах распыления со смещением) до примерно 5 кэВ. Коэффициенты распыления для разных материалов редко различаются более чем в 10 раз. Например, скорость распыления вольфрама в аргоне только в два раза меньше скорости распыления алюминия, в то время как скорости испарения этих двух металлов (при 2000 °С) различаются на девять порядков. Эти плёнки по свойствам значительно отличаются от нанесённых термическим испарением. Ионным распылением можно наносить плёнки из любых материалов, в том числе из многокомпонентных сплавов при сохранении стехиометрического состава.

В составе потока распыляемого материала преобладают нейтральные атомы мишени, при этом их энергия составляет в среднем единицы электрон-вольт, а некоторые частицы обладают энергией до нескольких сотен электрон-вольт, т.е. по сравнению с термически испарёнными атомами в

результате ионного распыления генерируются частицы с энергиями, в десятки раз большими. Вследствие значительной энергии конденсирующихся атомов их подвижность на подложке высокая, что способствует увеличению плотности центров зародышеобразования и уменьшению размеров кристаллов. Плёнка становится сплошной при меньшей толщине, чем в процессах термического нанесения плёнок. Увеличение плотности центров зародышеобразования происходит также вследствие возникновения радиационных дефектов в поверхностном слое подложки. Осаждённые плёнки обладают высокой адгезией к материалу подложки, так как энергия осаждаемых атомов достаточна для образования хемосорбционных связей.

Так как процесс распыления легко реализуется на мишени большой площади, то с такого распределённого источника получают плёнки с высокой равномерностью на большой площади подложки. Практически неограниченный запас распыляемого материала мишени позволяет использовать процесс в установках непрерывного действия. Контроль параметров процесса ионного распыления и автоматическое управление режимами позволяют получить плёнки с воспроизводимыми свойствами.

Модификацию свойств плёнок проводят дополнительным облучением растущей плёнки из автономного источника ионов. Такое облучение вызывает рост дефектов, распыление загрязнений и сорбированных газов, активацию поверхности и другие эффекты, поэтому можно управлять свойствами растущих плёнок, в частности структурой, адгезией, электропроводностью, механическими микронапряжениями и химическим составом. Если дополнительное облучение проводить ионами инертных газов, то происходит модификация структуры без изменения химического состава. Бомбардировка плёнки ионами химически активных газов позволяет получать новые химические соединения и выращивать плёнки сложного состава, в частности керметы, твёрдые растворы и др. Например, облучение растущей алюминиевой плёнки потоком ионов кислорода до концентрации их атомов в плёнке $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ стабилизирует структуру, при концентрациях $10^{19} - 10^{22} \text{ см}^{-3}$ образуются слои из диэлектрических включений, что сопровождается ростом сопротивления плёнки. Если концентрация атомов кислорода превысит $6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, то формируются диэлектрические покрытия с удельным сопротивлением $10^7 - 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Для выбора обоснованных параметров процесса ионного распыления следует иметь в виду, что коэффициент распыления растёт с увеличением энергии до 300-500 эВ, а затем его рост прекращается. Наиболее высокие значения коэффициента распыления наблюдаются при бомбардировке ионами с большими массами, а также при облучении поверхности под углом к нормали порядка $50-70^\circ$. Температура материала аморфной мишени не влияет на скорость распыления, однако у монокристаллов с ростом температуры мишени происходит отжиг дефектов структуры, и коэффициент распыления может возрастать до значений, соответствующих поликристаллическому образцу или характерных для определённой кристаллографической плоскости.

Распыляемые атомы мишени, испытывая столкновения с молекулами рабочего газа, могут возвращаться на мишень. Обратное рассеяние существенно, когда масса распыляемого атома меньше массы газовой частицы. Обратная диффузия возрастает с ростом давления рабочего газа. С учетом этих факторов связь коэффициентов распыления и конденсации можно в первом приближении оценить по уравнению:

$$S_k = S \frac{2,3\lambda_0}{2,3\lambda_0 + Pd}, \quad (4.24)$$

где S_k - коэффициент конденсации, то есть число атомов, попавших на подложку в расчете на один падающий ион; λ_0 - средняя длина пробега распыленных частиц при давлении 1 Па; Pd - произведение давления газа на расстояние от мишени до подложки.

Химическая активность остаточных газов в камере распыления и сорбированный на поверхности мишени слой загрязнений могут значительно влиять на процесс распыления.

4.8.5. Оборудование ионного распыления

Рассмотрим подробнее схемы установок для распыления ионными пучками. В *диодной системе* (рис. 4.12,а) внутри рабочего вакуумного колпака 1 располагаются два электрода: катод 6 и анод 2, каждый из которых выполняет двойную роль.

Катод, бомбардируемый ионами, эмитирует электроны, поддерживающие горение разряда, и является распыляемой мишенью 6. Анод, необходимый для горения разряда, одновременно служит держателем подложек, на которых конденсируются в виде пленки атомы материала мишени.

Обычно разряд поддерживают в инертном рабочем газе (аргоне) при давлении 100 - 1 Па и напряжении на разрядном промежутке 100-1000 В. В установках этого типа достигаются относительно малые скорости распыления (0,02-0,03 мкм/мин), поэтому получить чистые плёнки трудно.

С целью снижения давления рабочего газа и обеспечения устойчивого горения разряда при этих условиях в *триодной системе* (рис.4.12,б) применён дополнительный элемент - термокатод 3. Эмитируемые им электроны, ускоряясь при движении к аноду, ионизируют молекулы рабочего газа и обеспечивают горение разряда при давлениях 0,1-1 Па. Мишень 6 в этих установках находится вне зоны разряда, и на неё подают отрицательный потенциал U_m от индивидуального источника. Таким образом, распылённые атомы мишени перед конденсацией пересекают зону разряда.

В установках *тетродного типа* в области, примыкающей к катоду, устанавливают дополнительный сетчатый электрод, подавая потенциал на который, облегчают условия зажигания и поддержания разряда. Скорость распыления в установках двух последних типов можно регулировать в широких пределах в диапазоне 0,02-0,3 мкм/мин.

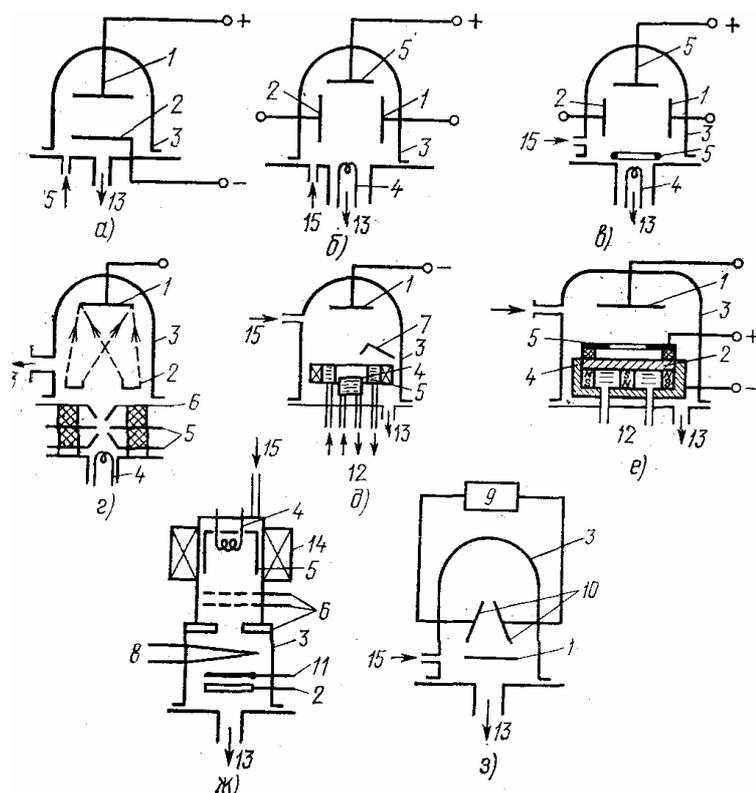


Рис.4.12. Схемы установок ионного распыления материалов: диодного типа (а); триодного типа (б); тетродного типа (б); с дополнительным ионным источником для модифицирования свойств пленок (г); плазменный торцовый вакуумно-дуговой ускоритель (д); магнетронная система (е); с автономным источником для травления материалов (ж); высокочастотного (з); 1-держатель подложки; 2-мишень из распыляемого материала; 3-корпус вакуумной камеры; 4-катод; 5-анод; 6-вытягивающий электрод; 7-устройство поджига дуги в вакууме; 8-нейтрализатор (эмиттер электронов); 9-высокочастотный генератор; 10-высокочастотные пластины (держатели мишеней); 11-заслонка; 12-водяная система охлаждения; 13-патрубок системы откачки; 14-катушка электромагнита; 15-подача рабочего газа

Так как в установках на постоянном токе распыление диэлектриков осуществлять не удаётся вследствие возникновения поверхностного заряда на непроводящих мишенях, то для их обработки применяются *высокочастотные распылительные системы* (рис.4.12,з). Симметричный выход высокочастотного генератора нагружается на ёмкость в виде располагаемых под углом двух держателей диэлектрических мишеней. Высокочастотный разряд при давлении 0,1-10 Па поддерживается между держателями. При смене полярности напряжения мишени будут распыляться поочерёдно, а поверхностный заряд нейтрализуется электронами плазмы. Поток распылённых атомов конденсируется на вращающейся подложке.

В *системах с автономным ионным источником* (рис.4.12,ж) последний обычно выполняют съёмным с целью его лёгкой замены и ремонта. Основной вакуумный объём соединяется с источником через диафрагму, имеющую отверстие с ограниченной газовой проводимостью. В ионизационной камере располагается термокатод и вспомогательный электрод для зажигания разряда. Через отверстие в диафрагме ионы

вытягиваются из разряда по направлению к кольцевому держателю, располагаемому в рабочей камере. Их движение происходит в магнитном поле внешнего электромагнита. Оно концентрирует ионы на зоне распыления мишени. Атомы распыляемой мишени движутся в высоком вакууме и затем конденсируются на подложках, располагаемых по поверхности сферы внутри рабочего колпака в верхней его части.

Другим примером установки с автономным источником ионов является установка ионного травления материалов, в том числе и диэлектриков (рис.4.12,д). Разряд в рабочей газе поддерживается между термокатодом и анодными пластинами при наложении внешнего магнитного поля. Ионы извлекаются из разряда вытягивающим напряжением на сетчатом электроде и формируются в параллельный поток электростатической линзой. При открытой заслонке поток с регулируемой энергией бомбардирует ориентируемую в пространстве мишень. Для компенсации положительного поверхностного потенциала в установке внутри рабочей камеры смонтирована пушка медленных электронов. Контроль с помощью микроскопа за процессом травления оператор осуществляет через стеклянное окно. Системы с автономными источниками характеризуются высокой газовой экономичностью и лучшей степенью вакуума внутри рабочей камеры.

При нанесении плёнок в любой из рассмотренных систем важным фактором является уменьшение загрязнения плёнок газовыми включениями, которые влияют на их свойства. Для снижения загрязнения рекомендуется использовать распыление с подачей напряжения смещения на подложкодержатель. Отрицательное смещение вызывает бомбардировку подложки положительными ионами инертного газа. В результате слабо связанные с поверхностью адсорбированные газы покидают её, а оксиды и другие соединения могут диссоциировать и разрушаться. Если подложка располагается на аноде, то её дополнительной очистки можно добиться при асимметричном распылении с использованием переменного напряжения промышленной частоты. В период положительной полуволны напряжения катод имеет отрицательное смещение по отношению к аноду и распыляется в результате ионной бомбардировки. При смене знака напряжения отрицательное смещение возникает на аноде, а закреплённая на нём подложка очищается от загрязнений. В промышленности эксплуатируются устройства различных типов, например, установки ионного распыления типа: "Ион-1 В", УВН-62, УВН-75Р-1, УВН-72Р-1, «Плазмавак».

4.8.6. Получение пленок сложного состава

Важным преимуществом метода ионного распыления является то, что плёнки многокомпонентных материалов, полученные этим методом, во многих случаях имеют тот же химический состав, что и материал распыляемого катода. Это справедливо и в тех случаях, когда скорости распыления отдельных компонентов существенно различны. В самом начале распыления многокомпонентного катода с его поверхности быстрее всего

уходит компонент с наибольшей скоростью распыления. Вскоре на поверхности катода образуется так называемая "изменённая область". По сравнению с исходным материалом эта область оказывается сильно обеднённой компонентом с максимальным коэффициентом распыления. При дальнейшем распылении катода осаждается плёнка такого же состава, что и исходный материал. Соответствие составов плёнок и распыляемых катодов было подтверждено экспериментально для нержавеющей стали, латуни и ряда алюминиевых сплавов.

Если же состав плёнки, нанесённой ионным распылением, отличается от состава распылявшегося катода, это может быть следствием одной из следующих трёх причин:

1. Температура катода слишком высока. Это может вызвать не только диффузию в "изменённый" слой, но и привести к испарению из катода одного или нескольких компонентов системы, имеющих в этих условиях достаточно высокое давление паров .

2. Преобладают эффекты окисления. В большинстве реальных систем на поверхности катода присутствует некоторое количество оксида, особенно в начале распыления. Точное количество оксида определяется соотношением между парциальным давлением окислителей в системе и скоростью распыления материала. Если оксиды покрывают значительную часть всей площади катода, относительные скорости распыления компонентов будут определяться не чистыми материалами, а их оксидами.

3. Происходит повторное распыление плёнки, как например, при ионном распылении со смещением. В этом случае с поверхности плёнки будет в основном распыляться материал с максимальным коэффициентом распыления. В отличие от распыляемой поверхности катода поверхность растущей плёнки постоянно пополняется материалом катода с исходным соотношением компонентов, так что "изменённый" слой здесь образовываться не сможет.

Методом ионного распыления можно также получать многокомпонентные плёнки при использовании для каждого материала своего катода. Для получения любого заданного состава сплава на катоды подаются соответственно подобранные величины напряжения.

4.6.7. Технология и оборудование магнетронного распыления.

Реализуемый в магнетронных распылительных системах (МРС) аномальный тлеющий разряд происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях. Электроны, эмитируемые мишенью под действием ионной бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям вблизи поверхности мишени. В результате многократных столкновений электронов с атомами рабочего газа резко увеличивается степень ионизации плазмы и возрастает плотность ионного тока (примерно в 100 раз по сравнению с диодными РС без магнитного поля), что приводит к существенному (в 50 - 100 раз) увеличению скорости распыления материала мишени.

В зависимости от магнитной индукции реализуемый в МРС режим может иметь три различных вида (рис.4.13). Если магнитное поле слабое ($B < 0,01$ Тл), то наблюдается режим с преимущественным положительным объемным зарядом у катода, когда основная часть приложенного напряжения падает в темном катодном пространстве (кривая 1). При средних значениях магнитной индукции ($0,01 < B < 0,09$ Тл) возникает режим с отрицательным объемным зарядом у анода, когда основная часть приложенного напряжения падает вблизи анода (кривая 2). В сильных магнитных полях ($B > 0,1$ Тл) режим с анодным падением потенциала модифицируется, и вновь становится заметным падение потенциала в темном катодном пространстве (кривая 3).

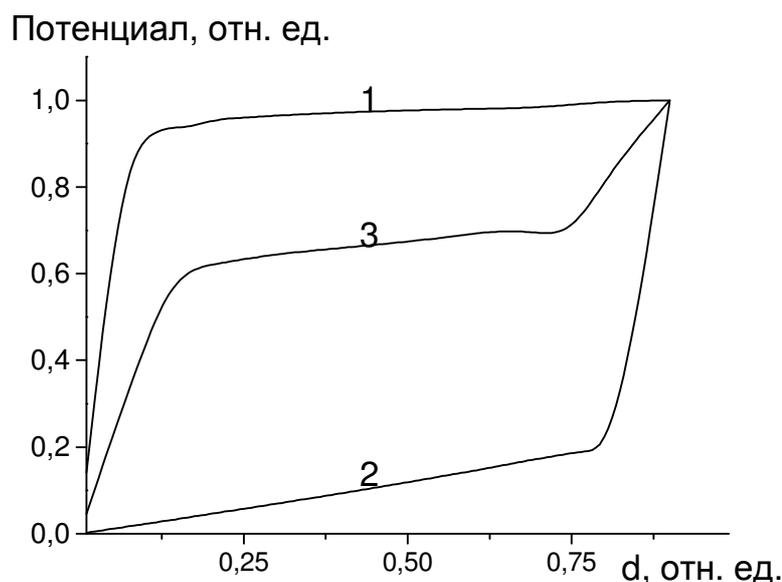


Рис.4.13. Распределение потенциала в разрядном промежутке МРС с цилиндрическими электродами

Переход режима разряда из одного вида в другой зависит не только от магнитной индукции, но также от конструкции МРС, давления рабочего газа и ряда других факторов. Поскольку магнитное поле увеличивает траекторию движения электронов, то при этом одновременно возрастает число их столкновений с атомами рабочего газа и можно считать, что наложение магнитного поля эквивалентно увеличению давления газа.

В первом приближении эквивалентное давление

$$P = P_0 \cdot \omega_e \cdot t_e, \quad (4.25)$$

где P_0 - рабочее давление в отсутствие магнитного поля; t_e - время между столкновениями электрона с атомами рабочего газа; ω_e - циклотронная частота электрона.

Произведение $\omega_e \cdot t_e$ определяется выражением:

$$\omega_e t_e = \frac{\lambda_e B \sqrt{e/m}}{P \sqrt{2U}}, \quad (4.26)$$

где B - индукция магнитного поля; λ_e - средняя длина свободного пробега электрона при $P = 1$ Па; U - приложенное напряжение.

При типичных для магнетронного распыления условиях это произведение составляет около 300.

О механизме разряда в МРС наиболее полное представление дает вольт-амперная характеристика (ВАХ). Типичные ВАХ для МРС с планарной и цилиндрической мишенью при распылении Al в Ar приведены на рис.4.14.

Существенное влияние на ВАХ оказывают рабочее давление, магнитная индукция, материал мишени и степень его эрозии. С уменьшением давления ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений. Аналогичное влияние оказывает увеличение магнитной индукции. Близкие к линейным зависимости наблюдаются при больших значениях B .

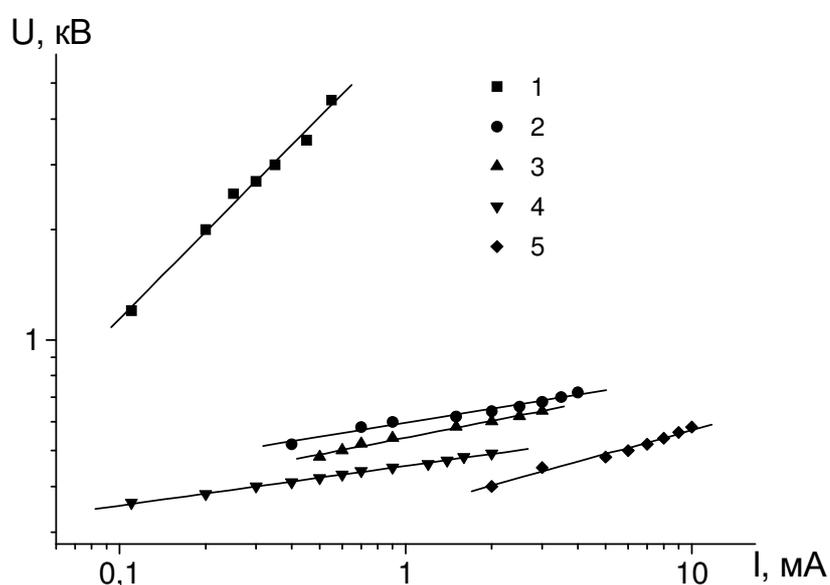


Рис. 4.14. Типичные ВАХ: 5- МРС планарного типа с прямоугольной мишенью; 4- МРС с цилиндрической полый мишенью; 3- МРС планарного типа с кольцевой мишенью; 2- МРС с цилиндрической мишенью; 1- обычная диодная РС без магнитного поля (во всех случаях распыления Al для МРС $p=0,13$ Па, для диодной РС $p=6,5$ Па)

Поскольку при низком давлении разряд в МРС поддерживается в основном за счет вторичных электронов, эмитируемых с мишени в результате ионной бомбардировки, то форма ВАХ постепенно видоизменяется по мере эрозии мишени. В результате эрозии мишени в зоне распыления образуется своеобразный полый катод и улучшаются условия локализации плазмы, что приводит к сдвигу ВАХ в область меньших рабочих напряжений, причем этот сдвиг растет с увеличением давления.

Вольт-амперная характеристика магнетронного разряда описывается выражением

$$I = b \cdot (U - U_0)^2, \quad (4.27)$$

где b - коэффициент, зависящий от конструкции МРС и операционных параметров процесса; U_0 - минимальное напряжение, необходимое для существования разряда (напряжение гашения).

Квадратичная зависимость тока от напряжения обусловлена пространственным зарядом, который ограничивает электронный ток, текущий от мишени вдоль линий магнитного поля.

Наличие неоднородных скрещенных электрического и магнитного полей не позволяет полностью описать все параметры разряда с помощью существующих теорий. Аналитические решения получены лишь для отдельных частных случаев. Для расчетов технологических режимов, скоростей роста пленок и пространственного распределения распыленных атомов целесообразно численное моделирование с использованием методов корреляционного и регрессионного анализов.

Эффективность процесса плазмообразования в МРС в 5-6 раз выше, чем в диодных распылительных системах без магнитного поля. Энергетическая эффективность процесса распыления имеет максимальное значение в диапазоне энергий ионов 300-500 эВ, который характерен для магнетронных распылительных систем.

Параметры МРС с возбуждением на постоянном токе имеют следующие типичные значения: концентрация электронов $10^{10} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$, энергия электронов 2 - 20 эВ, давление рабочего газа 0,3 - 1,5 Па, ток разряда 0,25 - 100 А, напряжение 400 - 800 В, плотность ионного тока 0,1 - 0,2 А/см², магнитная индукция 0,01 - 0,05 Тл, скорость распыления 0,1 - 10 мкм/мин.

Схема типичной магнетронной распылительной системы приведена на рис.4.15.

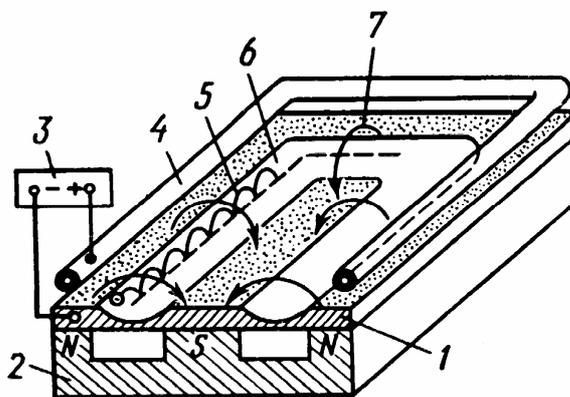


Рис.4.15. Схема магнетронной системы распыления с плоской мишенью: 1- мишень - катод; 2 - система постоянных магнитов; 3 - источник питания; 4- анод; 5- траектория движения электронов; 6- зона интенсивного распыления; 7- силовые линии магнитного поля

Достоинства и недостатки магнетронного распыления

Основными достоинствами МРС являются:

- универсальность процесса, позволяющая получать пленки металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков;

- высокая скорость осаждения (до нескольких мкм/мин) и возможность ее регулирования в широких пределах;
- сохранение соотношения основных компонентов при распылении веществ сложного состава;
- высокая чистота пленок;
- высокая адгезия пленок к подложке;
- возможность изменения структуры и свойств пленок за счет потенциала смещения на подложке, давления и состава газовой среды;
- низкая пористость пленок даже при малых толщинах;
- более низкое по сравнению с обычной диодной РС радиационное и тепловое воздействие на обрабатываемую структуру;
- возможность проведения процесса в химически активной среде, что позволяет получать пленки нитридов, карбидов, оксидов и других соединений;
- более высокая энергетическая эффективность процесса по сравнению с обычными распылительными системами диодного и триодного типов;
- способность процесса к формализации, т. е. возможность составления (на основе аналитических зависимостей технологических параметров получаемых структур от операционных параметров процесса) математического описания (алгоритма) процесса и последующего управления им с помощью ЭВМ или микропроцессора;
- инверсность процесса, позволяющая использовать его для осаждения и травления широкого класса материалов;
- возможность создания линий непрерывного действия, поскольку мишени обладают достаточно большим запасом распыляемого материала, а использование количественных соотношений между различными параметрами процесса позволяет автоматически управлять режимами осаждения тонких пленок.

К недостаткам МРС относятся:

- сравнительно невысокий коэффициент использования материала мишени (около 25 % для плоской мишени) и необходимость для его увеличения усложнения формы мишени или конструкции магнитной системы;
- сравнительно высокая неравномерность осаждаемой пленки по толщине за счет распыления материала из узкой зоны эрозии, имеющей форму кольца или эллипса в виде V-образной канавки. Углубление этой канавки по мере распыления мишени уменьшает пространственный угол распыления, вследствие чего уменьшается равномерность пленки по толщине. Повышение равномерности пленки требует планетарного или возвратно-поступательного перемещения подложек, что существенно усложняет конструкцию внутрикамерного устройства;
- появление сильноточных дуг на поверхности мишени или между мишенью (катодом) и анодом вследствие структурных неоднородностей, а также наличие оксидных пленок и загрязнений на поверхности мишени, что вызывает нестабильность процесса осаждения и ухудшает качество

формируемых пленок. Для устранения дуг необходимо высокое качество материала мишени, ее предварительная тренировка. Кроме того, система электропитания должна быть устойчива к сильным перегрузкам, которые могут возникать при появлении дуги;

- наличие потока высокоэнергетических электронов, создающих основную температурную нагрузку на подложку, требует изоляции держателя подложек от корпуса установки, а также использования дополнительной диафрагмы (анода), позволяющих ограничить попадание на подложку высокоэнергетических электронов;

- наличие потока отраженных нейтрализованных ионов Ar энергией до 160 эВ, требующее их термализации, когда осаждение пленок производится на тонкие изоляционные слои;

- сравнительно высокое давление рабочего газа (0,3-1,5 Па), требующее его эффективной очистки для устранения загрязнения пленок посторонними газовыми включениями.

4.8.8. ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

Получение тонких плёнок диэлектриков

Тонкие плёнки диэлектриков до недавнего времени наносились лишь методом реактивного распыления. Простая замена металлической мишени диэлектриком в обычной системе ионного распыления на постоянном токе обречена на неудачу из-за быстрого образования поверхностного заряда из положительных ионов на поверхности диэлектрика, препятствующего дальнейшей ионной бомбардировке последнего. Хотя и существуют способы устранения этой помехи, и они могут быть приемлемы в той или иной степени для травления поверхности диэлектрика ионной бомбардировкой, однако для нанесения тонких диэлектрических плёнок они не подходят из-за проблем, связанных с неоднородностью толщины или высоким уровнем загрязнения получаемых плёнок.

4.9.9. Принципы ВЧ-распыления

Система с одинаковыми электродами

Рассмотрим стеклянную разрядную трубку с двумя плоскопараллельными металлическими электродами равной площади на расстоянии в несколько сантиметров друг от друга. В результате приложения к такой системе достаточно высокого постоянного напряжения у катода возникает темное пространство, являющееся фактически управляемой областью разряда. Если вместо постоянного напряжения к электродам приложить переменное напряжение низкой частоты, то тёмное пространство будет расположено вблизи каждого из двух электродов. Для поддержания такого разряда необходимо наличие вторичных электронов, эмитируемых обоими электродами. При увеличении частоты напряжения минимальное давление газа, при котором разряд ещё горит, постепенно снижается с ростом частоты. Этот эффект становится заметен на частотах выше 50 кГц и ослабевает на частотах, превышающих несколько мегагерц. Очевидно, что

разряд в этом случае пополняется электронами помимо вторичной электронной эмиссии из электродов. Генерация дополнительных электронов в ВЧ-разряде происходит потому, что все электроны, колеблющиеся в ВЧ-поле, могут приобрести энергию, достаточную для ионизации газа. Таким образом, высокое напряжение на катоде, необходимое для получения вторичных электронов, для поддержания ВЧ-разряда необязательно. Так как энергия, поглощаемая электроном, пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля и, следовательно, не зависит от его знака, то электрон приобретает энергию, двигаясь как по направлению поля, так и против его. Для того, чтобы удерживать электроны в межэлектродном пространстве и уменьшить вероятность их потери за счет выхода из него, параллельно ВЧ-полю прикладывается магнитное поле. Для повышения эффективности ВЧ-разряда оно является более важным, чем в случае разряда постоянного тока.

В ВЧ-разряде плазма имеет значительный положительный потенциал относительно обоих электродов. Это является следствием того, что подвижность электронов намного больше подвижности ионов. В результате этого ВЧ-ток, измеряемый во внешней цепи, почти полностью обусловлен электронами плазмы, достигающими электродов в течение чередующихся полупериодов. В течение каждого полупериода из области разряда экстрагируются те электроны, которые к его началу находятся в пределах расстояния A от электрода. A -амплитуда колебания электрона в ВЧ-поле. Если напряжённость приложенного поля $E = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$, то:

$$A = \mu \cdot \frac{E_m}{\omega}, \quad (4.28)$$

где μ - подвижность электронов при данном давлении газа.

Из выражения (4.17) следует, что для эффективного использования разряда в рассматриваемой конфигурации электродов, расстояние между ними должно быть порядка A или больше. Таким образом плазма ВЧ-разряда сосредоточена в области, расположенной симметрично относительно электродов и имеющей протяжённость $d - 2A$ (где d -расстояние между электродами). Область плазмы колеблется между электродами с угловой частотой приложенного к электродам напряжения ω и амплитудой A и касается каждого электрода попеременно в моменты времени, когда $\omega \cdot t = \pi/2$ и $3\pi/2$.

Система с электродами разной площади

Рассмотрим систему, в которой один электрод значительно больше другого. Так как полный ток через каждый электрод одинаков, плотность тока на большем электроде будет меньше, и число электронов, теряемых на единице его площади, будет меньше. Если во внешней ВЧ-цепи не будет выделяться постоянной составляющей напряжения, потенциал на обоих электродах будет одинаковым, и значит, такая система, в первом приближении, будет работать так, как если бы электроды были одинаковой

площади. Однако, если во внешнюю цепь включить конденсатор, то постоянные составляющие потенциала на электродах уже не будут одинаковыми. Вследствие более высокой плотности тока на меньшем электроде потенциал на нем будет значительно выше, чем на большем. Соотношение постоянных напряжений на двух электродах с изменением отношения их площадей изменяется более быстро, чем простая обратно пропорциональная зависимость. Это объясняется тем, что уменьшение напряжения на данном электроде ведёт к соответствующему уменьшению толщины ионной оболочки вблизи этого электрода. В результате емкостное сопротивление большего электрода уменьшается быстрее, чем оно уменьшалось бы вследствие только увеличения площади этого электрода. Если мы заменим конденсатор во внешней цепи слоем диэлектрика на одном из электродов, эффект будет тот же, и между плазмой и меньшим электродом появится достаточно высокое напряжение. Если слоем диэлектрика будет покрыт именно этот электрод, то может иметь место ионная бомбардировка и, следовательно, распыление поверхности диэлектрика.

Наряду с рассмотренными асимметричными системами ВЧ-распыления было разработано несколько симметричных систем, в которых два ВЧ-электрода имеют одинаковые площади. В таких устройствах для проведения ВЧ-распыления разделительный конденсатор во внешней цепи не обязателен. Основная цель создания таких конструкций заключается в том, чтобы исключить любую возможность распыления заземлённого электрода. Так как в этом случае используются два электрода-мишени, их можно взаимно располагать таким образом, чтобы улучшить однородность осаждаемых плёнок по толщине. Две конструкции, в которых реализуются эти идеи, представлены на рис.4.16. На рис.4.16 а изображён дисковый электрод, расположенный концентрически внутри кольцевого электрода такой же площади, причём оба электрода закрыты одним диском распыляемого диэлектрика. В конструкции, показанной на рис.4.16 б, возможно как прямое распыление самих электродов, так и распыление диэлектрических мишеней, помещаемых на поверхность этих электродов.

В другом варианте конструкции ВЧ-распылительной системы один или два витка ВЧ-катушки располагают вокруг межэлектродного пространства либо снаружи разрядной камеры, либо внутри её. Эта катушка имеет автономный источник ВЧ-питания, а на электрод мишени от отдельного источника питания подаётся напряжение, которое может быть как ВЧ, так и постоянным. С помощью такой катушки разряд в системе можно поддерживать вплоть до очень низких давлений газа, порядка $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.

Это объясняется тем, что ВЧ-магнитное поле, создаваемое катушкой, закручивает траектории электронов, которые в результате этого за каждый полупериод ВЧ напряжения проходят значительные расстояния и ионизируют газ даже при очень низких давлениях.

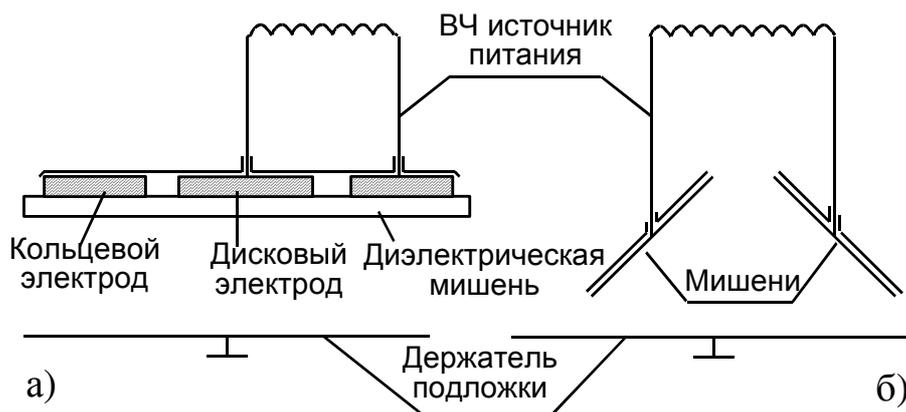


Рис.4.16. Симметричные системы ВЧ распыления

Распыление может осуществляться также в устройствах, использующих одновременно постоянный ток и ВЧ-возбуждение. Этот тип устройств с функциональной точки зрения подобен рассмотренной выше системе с ВЧ катушкой. Использование высокой частоты способствует созданию плазмы при низких давлениях, а основная мощность, идущая на распыление, подводится от источника постоянного тока. Этим достигается экономия на источниках питания и уменьшается рабочая мощность компонентов согласующей схемы. Такая система имеет определённые преимущества перед устройством, работающим только на постоянном токе, в случае реактивного распыления ряда металлов в среде кислорода.

4.8.10. Вакуумно-дуговое осаждение покрытий из плазмы материала электродов

Дуга в парах материалов электродов позволяет, используя простые по конструкции ускорители плазмы, с очень высокой производительностью выращивать различные покрытия больших толщин, как металлические, так и диэлектрические. В плазменных ускорителях генерируются потоки частиц с большими скоростями (до 10^5 м/с) и энергиями (до 10 - 100 кэВ) с возможностью регулирования указанных величин в широких пределах. Коэффициент использования материала может быть близок к 100 %. Доля ионов в общем потоке, характеризуемая степенью ионизации α потока, также высока ($\alpha = 60-95$ %). Ионы различных веществ могут вступать в интенсивные химические взаимодействия с рабочими газами, что позволяет формировать покрытие из оксидов, нитридов, карбидов и других соединений. Так как процесс осуществляется в глубоком вакууме, то можно наносить чистые покрытия из всех токопроводящих веществ, включая углерод. Вакуум является активной защитной средой, не только предотвращающей окисление металлов и сплавов, но и снижающей количество вредных примесей в покрытиях за счет удаления летучих примесей, термического разложения и дегазации.

Подавая ускоряющий ионы потенциал на держатель покрываемой подложки, можно регулировать энергию осаждающихся частиц. При достаточно большой энергии они могут проникать в приповерхностные слои материала и обеспечивать высокие адгезионные свойства покрытия. Очистка

поверхности перед началом выращивания пленки также достаточно просто реализуется в этих устройствах.

Стабильное горение дугового разряда поддерживается испарением материала электродов, в частности, катода. Последний может быть либо холодным (охлаждаемым), либо горячим. В первом случае дуга горит в виде отдельных катодных пятен, перемещающихся по поверхности катода со скоростью 10^2 м/с. Диаметры пятен не превышают обычно нескольких микрометров, а плотность тока в них составляет 10^6 - 10^7 А/см². Во втором случае дуга горит на всей поверхности катода, а его температура может приближаться к температуре плавления материала.

Ионы металла генерируются в виде высокоскоростных катодных струй с торцевой поверхности в результате эрозии металла. Компоненты плазменных струй распространяются изотропно в полусфере над поверхностью катода. Каждое катодное пятно включает в себя эмитирующий электроны и атомы участок, область катодного падения потенциала, в которой сосредоточен положительный пространственный заряд, и наиболее ярко светящуюся часть - область ионизации. Продукты эрозии катода содержат макрокапельную (с размерами до нескольких микрометров), паровую и ионизированную фазы. Каждая из фаз характеризуется различными скоростями разлета. Обычно доля микрокапельной фазы не превышает 1%, однако ее наличие может ухудшить качество тонких пленок.

Если центральный электрод торцевого ускорителя включить анодом и пропускать через дугу импульсный ток силой до нескольких сотен ампер и длительностью импульсов 10^{-4} - 10^{-3} с, то можно осуществить анодную форму дуги. Импульсный разряд тогда стабилизируется собственным азимутальным магнитным полем на торцевой поверхности центрального анода в основном в продуктах его испарения. При достижении удельных мощностей разряда 10^6 - $5 \cdot 10^6$ Вт/см² появляется возможность перехода к квазистационарному процессу эрозии анода. При этом роль теплопроводности материала электрода становится несущественной, и вся энергия, выделяемая на аноде, затрачивается на испарение. Скорость испарения достигает значения $5 \cdot 10^2$ - $2 \cdot 10^3$ г/(см²с). Процесс по своим параметрам становится идентичным процессу, протекающему при воздействии сфокусированного излучения мощного лазера.

Пятно на аноде относительно малоподвижно, удается осуществить равномерный подвод энергии с высокой плотностью, отсутствует охлаждающий эффект вследствие эмиссии электронов, а эрозия катода оказывается в этих условиях незначительной.

Время установления стационарного режима испарения по порядку величины должно совпадать с временем образования прогретого слоя толщиной $d = q_a/v_c$, где q_a - плотность мощности на аноде, а v_c - равновесная скорость фронта тепловой волны на фазовой границе.

Для зажигания в вакууме сильноточного низковольтного разряда в парах материала электрода необходимо инициировать дугу. Для этого в промежутке катод - анод при включенном на нем напряжении следует на

короткое время создать проводящую среду. Плазменное облако можно получить различными способами. Часто в устройствах механически создают контакт двух электродов, например катода и электрода вспомогательного разряда. В точке контакта проходит ток большой силы, при этом происходят быстрый разогрев зоны контакта, плавление и испарение металла. Выделяющейся теплоты достаточно для термической ионизации паров. При разрыве контактов, длящемся около 0,01 с, возникает плазменное облако, ионы которого инициируют выход электронов из катода. Последние ускоряются к аноду и инициируют зажигание основной дуги в промежутке катод - анод.

Другой способ зажигания дуги - пропускание тока между электродами по поверхности изолятора, на которую заранее нанесена тонкая проводящая пленка. Эта пленка испаряется и ионизируется в зоне пробоя. Аналогично зажигается дуга при взрыве тонкого проводника, перемыкающего электродный промежуток.

Если в узле поджига дуги использовать гидрид титана, выделяющий при нагреве водород, то для зажигания дуги достаточно кратковременного импульсного разогрева детали из гидрида титана. Выделившееся малое количество водорода в межэлектродном пространстве достаточно для возникновения разряда и перехода его в дугу. Водород затем легко поглощается титановым геттером, и вакуум полностью восстанавливается после зажигания дуги.

После поджига дуга горит, образуя на электродах хаотические перемещающиеся микропятна. С целью стабилизации горения дуги на торцевой поверхности катода и предотвращения ее ухода на боковую поверхность в технологических генераторах плазмы используют цилиндрические экраны. Они обычно изготавливаются из материала с высокой магнитной проницаемостью и устанавливаются с зазором в 1 - 2 мм от катода на уровне его торца. Пятна в такой конструкции существуют только на торце катода. Катодные пятна можно стабилизировать и с помощью внешнего магнитного поля. В однородном магнитном поле ток, протекающий через пятна, взаимодействует с компонентами магнитного поля, одна из которых направлена под острым углом к поверхности катода. В результате взаимодействия наблюдается перемещение катодного пятна в направлении острого угла, образованного силовыми линиями магнитного поля с поверхностью. Внешнее магнитное поле воздействует и на весь объем плазменных струй, выходящих из генератора в виде факела. Поле вызывает вращение плазмы, фокусировку факела по оси ускорителя, позволяет изменить направление факела и доускорять плазму за счет взаимодействия азимутального холловского тока в ней с радиальной компонентой магнитного поля.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение коэффициента ионного распыления.
2. От каких факторов зависит коэффициент ионного распыления?

3. Как влияет энергия ионов на коэффициент распыления?
4. Назовите разновидности процесса ионного травления материалов.
5. Укажите основные преимущества ионно-химического травления по сравнению с плазменным травлением и физическим распылением.
6. Назовите достоинства и недостатки метода ионно-лучевого осаждения покрытий.
7. В чем особенности процесса получения тонких пленок при ионно-плазменном распылении?
8. Как влияет давление газа в распылительной системе на скорость роста и свойства осаждаемых пленок?
9. Перечислите основные типы распылительных систем и дайте их сравнительную характеристику.
10. Почему при ионном распылении сложных сплавов состав пленки может соответствовать составу распыляемого материала?
11. Какие причины могут вызвать изменение состава осаждаемой пленки?
12. Какова сущность процесса магнетронного распыления?
13. Как влияет магнитное поле на параметры распылительной системы?
14. Укажите достоинства и недостатки магнетронного распыления.
15. В чем особенности высокочастотного распыления по сравнению с распылением на постоянном токе?
16. Сформулируйте принципы вакуумно-дугового осаждения покрытий из плазмы материала электродов.
17. За счет чего при плазменно-дуговом осаждении достигается высокая адгезия покрытия?
18. Приведите примеры применения покрытий, получаемых вакуумно-дуговым осаждением.

4.9. ИОННЫЕ И ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

В ряде методов диагностики поверхности используется ионное возбуждение. Одним из наиболее распространенных методов этого класса является ионная масс-спектрометрия, основанная на явлении вторичной ионной эмиссии, суть которого состоит в следующем. При бомбардировке поверхности кристалла ускоренными ионами их кинетическая энергия передается частицам твердого тела. Если частица (атом или ион) вблизи поверхности получает энергию, большую теплоты сублимации, а скорость частицы направлена в сторону вакуума, то возможен ее выход из кристалла. При этом существует некоторая вероятность ионизации выходящих частиц. Ионная составляющая такого потока и образует вторичную ионную эмиссию.

Экспериментально установлено, что при ионной бомбардировке поверхность твердого тела эмитирует атомные ионы основного вещества (однозарядные и многозарядные), ионы многоатомных кластеров основного вещества, его соединений с различными атомами, а также ионы поверхностных примесей.

Толщина слоя, из которого происходит вторичная ионная эмиссия, не превышает нескольких ангстрем. Таким образом, метод дает информацию о химическом составе поверхности.

Полный анализ явления вторичной эмиссии состоит из трех основных этапов: изучения взаимодействия первичных ионов с частицами твердого тела, изучения электронного обмена между выходящими частицами твердого тела, а также установления электронного равновесия внутри частицы после выхода ее в вакуум.

Теоретическое описание первого этапа фактически сводится к хорошо разработанным теориям катодного распыления. Для количественной характеристики этого процесса используется коэффициент катодного распыления, определяемый экспериментально. Два последних этапа, связанные с ионизацией вылетающих частиц, изучены значительно меньше, хотя существует ряд моделей ионизации. Поэтому оценка зарядового состояния вторичных ионов является сложной задачей.

Основными экспериментальными характеристиками вторичной ионной эмиссии являются: распределение ионов по энергиям и углам вылета; масс-спектр вторичных ионов, то есть зависимость тока вторичных ионов с данным значением массового числа от массового числа; коэффициент катодного распыления для данного типа ионов. Рассмотрим информативность этих характеристик.

Качественный анализ поверхности. Масс-спектры вторичных ионов представляют собой зависимость ионного тока от массового числа и имеют вид ряда пиков различной интенсивности. Набор пиков и их интенсивности существенно зависят от состояния поверхности и дают информацию о ее элементном составе.

Чем более загрязнена поверхность, тем сложнее масс-спектр. Если последовательно измерять ряд масс-спектров при очистке поверхности высокотемпературным вакуумным прогревом или ионным травлением, то можно судить об эффективности данного способа очистки.

Количественный анализ. Полный ионный ток в определенном пике пропорционален количеству атомов данного сорта, находящихся на поверхности. Следовательно, значение полного ионного тока может использоваться для количественного анализа состава поверхности. Однако при этом необходимо знать коэффициент катодного распыления и степень ионизации вторичных ионов, а при абсолютных измерениях - и коэффициент собирания ионов коллектором (отношение числа зарегистрированных коллектором ионов к полному их числу, испускаемому заданным участком поверхности). Эти величины обычно определяют, производя градуировку масс-спектрометра, т.е. измеряя масс-спектры известных эталонов.

Чувствительность методики к различным элементам на поверхности может существенно отличаться. Наиболее легко обнаружить атомы, обладающие низким потенциалом ионизации и слабо связанные с поверхностью, например, атомы щелочных металлов. Минимальные относительные концентрации (под относительной концентрацией понимают

отношение концентрации атомов данного сорта к поверхностной концентрации атомов основного вещества) таких атомов, которые могут быть обнаружены, составляют 10^{-9} . Для большинства элементов эта величина составляет 10^{-6} .

Распределение атомов на поверхности. При сканировании поверхности достаточно узким ионным пучком можно получить информацию о распределении данного элемента по поверхности, а с помощью ионного микроскопа можно получить увеличенное изображение исследуемого участка в ионах данного типа. Такая методика позволяет судить об однородности поверхности, о местах скопления определенных элементов, о локальных изменениях состава поверхности при различных воздействиях, например адсорбции, поверхностном легировании.

Распределение атомов по глубине в приповерхностной области. Ионная бомбардировка может быть использована для контролируемого удаления поверхностных слоев (ионное травление). Измеряя масс-спектры при таком послойном стравливании, можно определить профили легирования приповерхностной области различными элементами, полученные при диффузии примесей с поверхности в объем, а также при ионном легировании.

Проще всего получить относительное изменение концентрации по глубине. Для этого следует измерить зависимость ионного тока от времени ионной бомбардировки, которая и определяет толщину удаляемого слоя. Для абсолютных измерений требуется градуировка масс-спектрометра.

Отметим, что при точном количественном анализе следует учитывать осложнения, связанные с внедрением первичных ионов и другими видами травмирования исследуемой поверхности.

Химические связи атомов на поверхности существенно влияют на вид масс-спектров. Например, при окислении поверхности кремния появляется ряд новых пиков, соответствующих различным формам соединения кремния и кислорода. Таким образом, масс-спектрометрические методы могут быть использованы также при изучении химических реакций на поверхности твердых тел, что важно для решения различных химических проблем, в частности, проблем катализа.

Аппаратура и методика эксперимента. Экспериментальная установка для измерения масс-спектров состоит из источника первичных ионов определенного сорта, часто ионов инертных газов, обеспечивающего изменение плотности тока и энергии ионов в нужном диапазоне; вакуумной камеры с держателем образца, позволяющим изменять его ориентацию по отношению к возбуждающему пучку; анализатора масс и энергий вторичных ионов; коллектора, измеряющего ионный ток (цилиндра Фарадея или специального преобразователя ионного потока в электронный). Используются установки трех типов.

Масс-спектрометр вторичных ионов. Возбуждается вся поверхность образца ионным пучком большого диаметра ($0,1-0,01 \text{ см}^2$), вторичные ионы

анализируются магнитным или квадрупольным масс-спектрометром. Регистрируется весь спектр масс либо отдельная линия.

Ионный микронзонд. Возбуждение производится узким сканирующим ионным пучком (диаметр до 1 мкм). Вторичные ионы анализируются масс-спектрометром, так что на коллектор попадают частицы с определенным отношением массы к элементарному заряду. Сигнал с коллектора попадает на экран осциллографа. Если синхронизировать развертку с положением ионного пучка в данной точке поверхности, то на экране можно получить увеличенное изображение поверхности «в ионах» данного сорта.

Вторично-ионный микроскоп. Диаметр сканирующего ионного пучка варьируется от нескольких микрометров до 25 мкм. Узкий вторичный пучок анализируется по импульсу и энергии. Увеличенное изображение поверхности «в ионах» данного типа регистрируется на экране или фотопластине.

Достоинства метода:

- высокая разрешающая способность по массе, определяемая качеством анализатора и позволяющая разрешать практически все возможные изотопы;
- высокая чувствительность, определяемая, в основном, устройствами регистрации и позволяющая определить массу ионов при их количестве до 10^3 - 10^4 ;
- возможность регистрации всех элементов, включая водород и гелий;
- возможность анализа как проводящих, так и изолирующих материалов с применением специальных мер для разрядки поверхности;
- возможность визуального наблюдения поверхности «в ионах» данного типа с разрешением деталей до 1 мкм;
- возможность проведения контроля элементарного состава поверхности в трех измерениях.

Недостатки метода:

- разрушающий характер зондирования, поскольку в ходе эксперимента измеряется состав поверхности и геометрический рельеф;
- необходимость градуировки по эталонам для получения количественного анализа химического состава поверхности;
- трудности расшифровки химических связей.

Контрольные вопросы

В чем суть метода вторичной ионной масс-спектрометрии?

Какая информация о твердом теле может быть получена этим методом?

Назовите разновидности метода ВИМС.

Укажите достоинства и недостатки ВИМС.

Задачи и задания для практических занятий и самостоятельной работы к главе 4

1. Рассчитать и проанализировать влияние массы бомбардирующего иона на энергию, соответствующую максимуму ядерной тормозной способности.
2. Рассчитать зависимость ядерной тормозной способности от энергии ионов для одной из комбинаций ион-твердое тело.
3. Оценить энергию, при которой ядерная и электронная тормозные способности равны, если кристалл германия бомбардируется ионами фосфора.
4. Рассчитать среднюю проекцию пробега и среднее нормальное отклонение проекции пробега в зависимости от энергии ионов при бомбардировке кремния ионами бора.
5. Рассчитать и проанализировать зависимость средней проекции пробега ионов в кремнии от массы бомбардирующего иона при энергии 50 кэВ.
6. Вычислить максимальную концентрацию внедренной примеси при бомбардировке кремния ионами фосфора с энергией 50 кэВ при плотности тока в пучке 1 мА/см^2 и времени обработки 1 час.
7. Вычислить дозу облучения, необходимую для создания максимальной концентрации примеси фосфора 10^{15} см^{-3} в германии.
8. Вычислить энергию ионов, необходимую для создания максимальной концентрации примеси фосфора 10^{15} см^{-3} в германии на глубине 0,2 мкм.
9. Оценить размеры системы сепарации ионов, если в ионном потоке имеются одно и двухзарядные ионы бора, ионы атомов и молекул азота при энергии пучка 50 кэВ и индукции магнитного для 10^{-2} Тл.
10. Определить температуру образца кремния толщиной 0,4 мкм при бомбардировке ионами фосфора с энергией 50 кэВ и плотностью тока в пучке 1 мА/см^2 , если пластина расположена на идеально теплоотводящем контакте.
11. Решить предыдущую задачу для ситуации, когда тепловой контакт между пластиной и подложкодержателем отсутствует.
12. Оценить минимальный диаметр пучка ионов аргона в установке ионно-лучевой литографии, если яркость пучка составляет $100 \text{ А/м}^2\text{ср}$ и ток 1 мА.
13. Решить предыдущую задачу для ионов галлия при яркости источника $10^6 \text{ А/см}^2\text{ср}$.
14. Провести анализ влияния массы бомбардирующего иона на пороговую энергию распыления титана при ионной бомбардировке.
15. Рассчитать и проанализировать зависимость коэффициента распыления меди от энергии ионов аргона в диапазоне от пороговой до 1000 эВ.
16. Вычислить и проанализировать зависимость отношения коэффициентов конденсации и распыления меди в зависимости от давления газа при распылении в среде аргона. Расстояние от мишени до подложки составляет 10 см.
17. Определить для условий предыдущей задачи максимальное давление, при котором эффектом рассеяния распыленных атомов можно пренебречь.

18. Вычислить эквивалентное давление, соответствующее магнетронному распылению титана в аргоне при давлении 0,01 Па и индукции магнитного поля 0,02 Тл.
19. Оценить амплитуду колебаний электронов в поле высокой частоты (13,56 МГц) напряженностью 100 В/см при разряде в аргоне при давлении 1 Па.
20. Оценить максимальное давление остаточных газов в ионно-лучевой установке, если расстояние от ионного источника до мишени составляет 100 см.
21. Провести анализ процесса и предложить технологические режимы для:
 - а) легирования кремния ионами бора;
 - б) легирования арсенида галлия ионами цинка;
 - в) создания изоляционного слоя толщиной 0,5 мкм при протонной бомбардировке;
 - г) ионно-лучевой литографии (резист ПММА, разрешение 0,8 мкм);
 - д) ионного синтеза слоя нитрида титана на титане толщиной 0,2 мкм и площадью 1 см²;
 - е) ионно-химического травления кремния на глубину 1 мкм;
 - ж) процесса напыления пленки ниобия на стекло методом магнетронного распыления;
 - з) вакуумно-дугового нанесения слоя нитрида титана толщиной 5 мкм на поверхность стальной детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звелто О. Физика лазеров/ Пер. с англ. под ред. Т.А. Шмаонова.- М.: Мир, 1979.-375 с.
2. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов: Пер. с англ.- М.: Мир, 1986.-504 с.
3. Степанов Б.И. Лазеры сегодня и завтра.- Минск: Наука и техника, 1987.-127 с.
4. Мэйтлэнд А., Данн М. Введение в физику лазеров/Под ред. С. И. Анисимова.- М.: Наука, 1978.-408 с.
5. Крылов К.И. и др. Основы лазерной техники. Л.: Машиностроение, 1990.-316 с.
6. Уинстон Е. Лазеры и голография. М.: Мир, 1971.-120 с.
7. Справочник по лазерной технике. Пер. с нем./Под редакцией Напортовича А.П.-М.: Энергоатомиздат, 1991.-544 с.
8. Справочник по лазерам: В 2-х т./ Под ред.Прохорова А.М.-М.: Сов. радио, 1978.- Т.1, 1978.-504 с.
9. Курносое А.И. Способы получения эпитаксиальных плёнок. М.: Высш. шк., 1974.-368 с.
10. Лазерная техника и технология: В 7 кн. Учебное пособие для втузов/ Под ред. А.Г. Григорьянца.-М.: Высш. шк., 1988. Кн. 5: Лазерная сварка металлов/ А.Г. Григорьянц., И.Н. Шиганов.- 1988.-207 с. Кн. 7: Лазерная резка металлов/ А.Г. Григорьянц., А.А. Соколов.- 1988.-127 с.
11. Рабкин И.В.,Сурменко Л.А. Лазерная сварка в технологии электронных приборов : Обзоры по электронной технике. 1985-Вып.2.
12. Лазерная технология в приборостроении и точном машиностроении. Труды ВНИТИ прибора МНПО "Темы" Вып.3.-М.: Машиностроение, 1980.- 159 с.
13. Самаркин Ю.Д., Сурменко Л.А.. Лазерная пайка в производстве изделий электронной техники: Обзоры по электронной технике. 1986-Вып.3.
14. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. К.И.Крылов и др. 1978.
15. Лазерная техника и технология: В 7 кн. Учебное пособие для втузов/ Под ред. А.Г. Григорьянца.-М.: Высш. шк., 1988. Кн. 4: Лазерная обработка неметаллических материалов./ А.Г. Григорьянц., А.А. Соколов.- 1988.-191 с.
16. Вейко В.П. Лазерная обработка плёночных элементов.-Л.: Машиностроение, 1986.-248 с.
17. Лазеры в технологии/ Под ред.М.Ф.Стельмаха.-М.: Энергия, 1975.-216 с.
18. Попов В.Ф., Горин Ю.Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. М.,Высшая школа, 1988 г.
19. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.,Энергоатомиздат, 1989 г.
20. Валиев К.А., Раков А.В. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. М., Радио и связь, 1984 г.

21. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник/ Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н.- М.: Машиностроение, 1985.-496 с.
22. Соколова Т.Н., Сурменко Л.А. Лазерная размерная обработка материалов, применяемых в электронной технике. Обзоры по электронной технике, серия 7, вып.1 (1161), 1986 г.,72 с.
23. Сурменко Л.А., Соколова Т.Н. и др. Лазерная функциональная подгонка элементов и узлов изделий электронной техники. Обзоры по электронной технике, серия 7, вып.13 (1299), 1987г., 64 с.
24. Готра З.Ю., Осередько С.А. Управление свойствами поверхностных слоев в технологии микроэлектроники с помощью лазерного излучения. Зарубежная электронная техника, № 12, 1985 г., с.3 - 52.
25. Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологии: Учеб. Пособие для спец. Электронной техники вузов.-М.: Высш. шк., 1984.-320 с.
26. Вендик О.Г., Горин Ю.Н., Попов В.Ф. Корпускулярно-фотонная технология: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Промышленная электроника».-М.: Высш. шк., 1984.-240 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ.....	5
1.1. Введение	5
1.2. Физические основы генерации лазерного излучения.....	5
1.3. Устройство и принципы работы лазеров	9
1.3.1. Рабочее вещество	9
1.3.2. Создание инверсии.....	10
1.3.3. Условия самовозбуждения и насыщения усиления.....	10
1.3.4. Оптические резонаторы.....	11
1.3.5. Импульсная генерация, модуляция добротности и синхронизация мод.....	13
1.4. Свойства лазерного излучения.....	16
1.4.1. Монохроматичность.....	16
1.4.2. Когерентность.....	16
1.4.3. Направленность и возможность фокусирования излучения	17
1.4.4. Яркость и мощность излучения.....	18
1.5. Типы лазеров	18
1.5.1. Твердотельные лазеры.....	19
1.5.2. Газовые лазеры	20
1.5.3. Полупроводниковые лазеры	26
1.5.4. Лазеры на красителях	27
1.6. Заключение	27
ГЛАВА 2. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	30
2.1. Теоретические основы лазерной технологии	30
2.1.1. Поглощение и отражение лазерного излучения твердым телом.....	30
2.1.2. Нагревание материала без плавления	34
2.1.3. Нагрев с изменением фазового состояния.....	36
2.2. Термические лазерные технологии.....	38
2.2.1. Лазерные технологические установки	38
2.2.2. Термическая обработка и закалка.....	41

2.2.3 Лазерная пайка.....	44
2.2.4 Лазерная сварка	46
2.2.5 Лазерная резка	49
2.2.6. Прошивка отверстий.....	52
2.2.7. Размерная обработка материалов и получение пленок.....	54
2.3. Лазерные микротехнологии.....	58
2.4. Лазерное осаждение тонких плёнок	62
2.5. Применение лазеров в химической технологии.....	65
2.6. Применение лазеров в измерительной технике и химическом анализе.....	67
Глава 3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ.....	74
3.1. Общая характеристика и особенности электронно-лучевых технологий.....	74
3.2. Физические основы взаимодействия электронов с веществом	75
3.2.1. Процессы, происходящие при бомбардировке вещества электронами, и возможности их использования в технологии.....	75
3.2.2. Движение ускоренных электронов в твердом теле	79
3.2.3. Тепловые эффекты при взаимодействии ускоренных электронов с твердым телом.....	81
3.3. Электронно-лучевые установки	87
3.3.1. Общие принципы построения электронно-лучевых установок	87
3.3.2. Источники электронов.....	87
3.3.3. Электронные пушки.....	88
3.3.4. Система обеспечения вакуума	90
3.3.5. Система сканирования.....	90
3.4. Термические электронные процессы и технологии.....	91
3.4.1. Электронно-лучевое испарение материалов (ЭЛИ)	92
3.4.2. Нанесение покрытий из сплавов и химических соединений.....	94
3.4.3. Обработка несфокусированным пучком.....	98
3.4.4. Электронно-лучевая обработка	99
3.4.5. Термическая размерная электронно-лучевая обработка.....	102
3.4.6. Размерная обработка массивных образцов.....	103
3.4.7. Размерная обработка тонких слоев	103
3.5. Нетермические электронные процессы и технологии.....	105

3.5.1. Реакции, индуцированные радикалами	105
3.5.2. Электронно-стимулированное травление.....	107
3.5.3. Электронно-лучевая литография - возможности, оборудование, технология, перспективы	108
3.6. Электронно-зондовые методы анализа веществ	115
3.6.1. Вторично-эмиссионная и просвечивающая электронная микроскопия	115
3.6.2. Рентгеновский спектральный микроанализ (РСМА)	116
3.6.3. Электронная оже-спектроскопия.....	117
3.6.4. Дифракция медленных и быстрых электронов	118
ГЛАВА 4. ИОННЫЕ И ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ	121
4.1. Введение	121
4.2. Физические основы взаимодействия ионов с веществом	121
4.2.1. Движение ускоренных ионов в веществе	121
4.2.2. Пробеги ионов в твердом теле и их распределение	123
4.2.3. Взаимодействие ионов с монокристаллами, каналирование.....	125
4.2.4. Образование радиационных дефектов при ионной бомбардировке, отжиг радиационных дефектов	126
4.2.5. Изменение электрических свойств твердых тел при ионной бомбардировке	127
4.3. Ионно-лучевые установки	128
4.3.1. Источники ионов.....	129
4.3.2. Система вытягивания и ускорения ионов.....	136
4.3.3. Система сепарации ионов.....	136
4.3.4. Системы фокусировки и сканирования	137
4.3.5. Вакуумные системы, приемные камеры, устройства контроля ...	139
4.4. Ионное легирование материалов	140
4.4.1. Особенности технологии ионного легирования	140
4.4.2. Установки для ионного легирования	143
4.5. Технология ионного легирования.....	144
4.6. Ионно-лучевая литография.....	147

4.6.1. Ионно-лучевая литография высокомолекулярных органических резистов.....	149
4.6.2. Ионно-лучевая литография неорганических твердых слоев	151
4.7. Модификация твердого тела при ионной бомбардировке	153
4.7.1. Структурные превращения при ионной бомбардировке	153
4.7.2. Ионный синтез, ионная металлургия, ионная эпитаксия.....	154
4.8. Ионное распыление материалов	158
4.8.1. Физика процессов распыления материалов при ионной бомбардировке	158
4.8.2. Ионное травление поверхности	161
4.8.3. Ионно-лучевые методы осаждения покрытий	164
4.8.4. Ионное распыление и получение тонких пленок	165
4.8.5. Оборудование ионного распыления.....	167
4.8.6. Получение пленок сложного состава.....	169
4.6.7. Технология и оборудование магнетронного распыления.....	170
4.8.8. Высокочастотное распыление.....	175
4.9.9. Принципы вч-распыления	175
4.8.10. Вакуумно-дуговое осаждение покрытий из плазмы материала электродов.....	178
4.9. Ионные и ионно-лучевые методы исследования и контроля поверхности твердого тела	181
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	187
ОГЛАВЛЕНИЕ	190

Редактор О.А. Соловьева

Лицензия ЛР №020459 от 10.04.97. Подписано в печать 25.09.00. Формат 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 12,38. Тираж 150 экз. Заказ

Ивановский государственный химико-технологический университет

153460, г. Иваново, пр. Ф.Энгельса, 7.

Типография ИЭК

153025, г.Иваново, ул. Ермака, 41