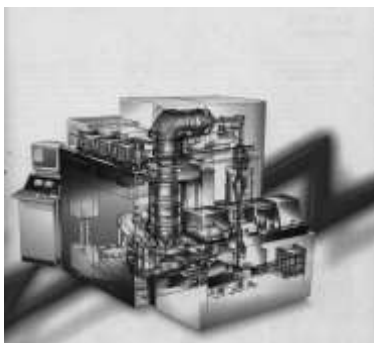


Т.В. Свистова

ЛУЧЕВЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие



Воронеж 2016

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Т.В. Свистова

ЛУЧЕВЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2016

УДК 621.38

Свистова Т.В. Лучевые и плазменные технологии: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (2,26 Мб) / Т.В. Свистова. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

В учебном пособии рассматриваются физико-химические основы процессов плазменных и лучевых технологий, типовые установки, конкретные технологические процессы и примеры их реализации.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» (направленность «Микроэлектроника и твердотельная электроника»), дисциплине «Основы лучевых и плазменных технологий».

Табл. 8. Ил. 56. Библиогр.: 10 назв.

Научный редактор д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Рецензенты: кафедра физики полупроводников
и микроэлектроники Воронежского
государственного университета (зав. кафедрой
д-р физ.-мат. наук, проф. Е.Н. Бормонтов);
д-р техн. наук, проф. М.И. Горлов

© Свистова Т.В., 2016

© Оформление. ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2016

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектроника - наиболее бурно развивающаяся область электронной техники, катализатор научно - технического прогресса всех отраслей народного хозяйства. Современная техника предъявляет очень высокие требования к интегральным микросхемам (ИС) по надежности, быстродействию, информационной емкости и другим параметрам. Поэтому основной тенденцией развития микроэлектроники является непрерывное повышение степени интеграции и информационной емкости интегральных микросхем с одновременным уменьшением стоимости бита информации. Это достигается за счет перехода от больших интегральных схем к сверхбольшим и ультрабольшим, уменьшения размеров элементов микросхем. Если характерный размер элемента больших интегральных схем (БИС) составляет несколько микрон, то в ультрабольшим интегральных схемах (УБИС) размер элементов доведен до долей микрона.

В 1970-х годах минимальный контролируемый размер серийно производимых микросхем составлял 2 - 8 мкм, в 1980-х он был уменьшен до 0,5 - 2 мкм.

В 1990-х годах, из-за нового витка «войны платформ», стали внедряться в производство и быстро совершенствоваться экспериментальные методы: в начале 1990-х процессоры (например, ранние Pentium и Pentium Pro) изготавливали по технологии 0,5 - 0,6 мкм (500 - 600 нм), потом технология дошла до 250 - 350 нм. Следующие процессоры (Pentium II, K6-2+, Athlon) уже делали по технологии 180 нм. В 2002 - 2004 годах были освоены техпроцессы 90 нм (Winchester AMD 64, Prescott Pentium 4).

Следующие процессоры изготавливали с использованием УФ-излучения (эксимерный лазер ArF , длина волны 193 нм). В среднем внедрение лидерами индустрии новых техпроцессов по плану ITRS происходило каждые 2 года, при этом обеспечивалось удвоение количества транзисторов на единицу площади: 45 нм (2007), 32 нм (2009), 22 нм (2011), производство

14 нм начато в 2014 году, освоение 10 нм процессов ожидается около 2018 года.

В этом плане наиболее перспективными являются плазменные и лучевые технологии.

Вакуумно - плазменные технологии относятся к наукоемким технологиям, позволяющим осуществлять обработку материалов и формировать структуры на наноразмерном уровне и по этому признаку могут быть отнесены к нанотехнологиям.

Жидкостные процессы технологической обработки материалов в процессе создания микроструктур в принципе не могут обеспечить изготовления ИС с субмикронными размерами, поэтому, начиная с семидесятых годов XX века во всем мире ведутся поиски альтернативных технологических вариантов на базе так называемых «сухих» процессов. Первым плазменным процессом, используемым в промышленном производстве с 1968 г., было удаление фоторезиста в кислородной плазме. В этот период недостаточное понимание сущности плазмохимических процессов привело к ряду неудач и отказу от их использования вплоть до 1972 - 1973 годов. Примерно в эти же годы начал проявляться интерес к плазменным методам получения пленок, в первую очередь диоксида кремния, и травлению неорганических металлов - кремния, нитрида кремния, диоксида кремния, алюминия и других.

Плазменная обработка - это обработка материалов низкотемпературной плазмой, генерируемой дугowymi или высокочастотными плазматронами.

К настоящему времени разработаны и внедрены в производство изделий электронной техники целый ряд технологических процессов с использованием низкотемпературной плазмы - это обработка и удаление органических резистов, плазменное травление, плазменное получение различных пленок и слоев. Сравнение плазменных технологических процессов с жидкостными позволяет выделить следующие их преимущества:

- увеличение разрешающей способности с уменьшением размеров элементов ИС;

- обеспечение высокой селективности и анизотропии процессов;
- более высокий уровень безопасности работы и экологической чистоты производства;
- возможность непрерывного контроля хода и окончания процесса;
- возможность создания автоматизированных технологических циклов, не требующих участия оператора.

Необходимо отметить, что в настоящее время вакуумно-плазменные технологии вышли далеко за пределы электронной техники и используются в самых различных отраслях науки и промышленности. Широко известны применения плазменных технологий в машиностроении и приборостроении, текстильной и легкой промышленности, производстве строительных материалов и даже в медицине.

Лучевые технологии, основанные на использовании концентрированных потоков энергии (лазерные, электронные и электронно-лучевые, ионные и ионно-лучевые) являются современными интенсивными технологиями. 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 веще-

ством 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.

Электронно-лучевая обработка осуществляется потоком электронов высоких энергий (до 100 кэВ). Таким путём можно обрабатывать все известные материалы (современная электронная оптика позволяет концентрировать электронный пучок на весьма малой площади, создавать в зоне обработки огромные плотности мощности).

Обработка материалов электронным пучком основана на использовании кинетической энергии свободных электронов, разгоняемых высоким напряжением до скоростей в десятки и сотни километров в секунду. При соударении электронов с обрабатываемой поверхностью происходит их резкое торможение, и кинетическая энергия движения преобразуется в тепловую, что вызывает интенсивный локальный нагрев поверхности. Степень нагрева определяется скоростью движения электронов, их концентрацией, временем взаимодействия электронов с обрабатываемой поверхностью и физико-химическими свойствами нагреваемых материалов.

Электронному пучку присущи следующие характерные особенности:

- малый диаметр. Для осуществления термических процессов изготовления ИС электронные пучки можно фокусировать от долей микрометров до десятков миллиметров, при не-

термических процессах – до 0,5 нм. Теоретически электронный пучок может иметь диаметр 0,01 нм;

- высокая плотность концентрированной энергии. Высокая концентрация электронов в пучке малого диаметра даёт возможность получать удельные мощности порядка $10^8 - 10^9$ Вт/см²;

- большая скорость модуляции мощности. Подачей отрицательного напряжения на управляющий электрод можно изменять время воздействия пучка на обрабатываемое изделие в очень широком диапазоне: от долей микросекунд до непрерывного режима;

- высокая маневренность перемещения с помощью электрических и магнитных полей. Используя программное управление, пучок можно перемещать по подложке со скоростью выше 100 м/с, практически, по любому запрограммированному закону;

- чистота в процессе обработки благодаря использованию вакуума.

С помощью электронного пучка можно осуществлять следующие термические и нетермические процессы при изготовлении ИС: выращивание монокристаллов; электронно-лучевая полировка поверхности; очистка поверхности подложек; испарение однокомпонентных и многокомпонентных материалов; микрофрезерование; перекристаллизация; ускорение процессов диффузии; присоединение выводов; герметизация корпусов; бесконтактные методы контроля; электронно-лучевая литография.

Перечисленные процессы выполняют в специальных установках, изготовленных по сходным схемам, основным блоком которых является электронно-лучевая пушка.

Ионно-лучевая технология - это комплекс способов обработки материалов энергетическими потоками ионов, в результате воздействия которых изменяется форма, физико-химические, механические, электрические и магнитные свойства обрабатываемых изделий.

Ионные пучки в электронике используются для самых различных целей. Области их применения можно разделить условно на три категории: размерную микрообработку с удалением материала; направленное изменение свойств материала легированием; анализ структуры и свойств материалов.

Диапазон энергий составляет от единиц кэВ до 1 МэВ, доза от 10^9 до 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 SiO_2-Si и др.

Ионное легирование материалов, или другими словами, **ионное внедрение** и **ионная имплантация**, в настоящее время становится основным технологическим процессом из применяемых для модификации электрофизических, химических, оптических, механических и других свойств поверхностных слоев материалов. Метод ионного легирования основан на контролируемом внедрении в материал (твердое тело) ускоренных ионизированных атомов и молекул. Особенно перспективным метод ионного легирования оказался для полупроводниковой электроники. Этот метод обладает преимуществами: универсальность, т.е. возможность введения любой примеси в любой материал; локальность воздействия; отсутствие нагрева подложки; возможность строгого дозирования примесей; простота управления; высокая чистота вводимых примесей и т.д.

Тонкие и толстые пленки и покрытия с воспроизводимыми и заранее заданными свойствами можно получать в условиях высокого вакуума осаждением из сепарированных ионных пучков. 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. Однако этому методу присущи и недостатки. Так, продолжительность осаждения пленок заметно превышает время всех других известных процессов нанесения покрытий. Сложность и высокая стоимость оборудования, необходимость в обеспечении сверхвысокого вакуума в рабочей камере - все это ограничивает применение метода.

Развитие микроэлектроники требует разработки методов формирования элементов интегральных схем с размерами меньше одного миллиметра. Такие методы являются основой нового направления «субмикронной технологии», т. е. технологии создания устройств с высокой плотностью элементов, имеющих размеры до 0,1 мкм. Процесс формирования рисунка в слое резиста с помощью ионных пучков получил название - *ионная литография*.

Лазерная технология – это процессы обработки и сварки материалов излучением лазеров. В лазерной технологии применяют твердотельные и газовые лазеры импульсного и непрерывного действия. В большинстве процессов лазерной технологии используется термическое действие света, вызываемое его поглощением в обрабатываемом материале. Для увеличения плотности потока излучения и локализации зоны обработки применяют оптические системы. Особенности лазерных технологий: высокая плотность потока излучения в зоне обработки, дающая необходимый термический эффект за короткое время (длительность импульса 1 мс и менее); локальность воздействия излучения, обусловленная возможностью его фокусировки в световые пучки предельно малого диаметра (порядка длины волны излучения); малая зона термического влияния, обеспечиваемая кратковременным воздействием излучения; бесконтактный ввод энергии в зону обработки и возможность ведения технологических процессов в любой прозрачной среде (вакуум, газ, жидкость, твёрдое тело), через про-

зрачные окна технологических камер, оболочки электровакуумных приборов и т.д. Наиболее изучены и освоены процессы сварки, сверления и резки.

В учебном пособии рассматриваются физико-химические основы процессов лучевых и плазменных технологий, типовые установки, конкретные технологические процессы и примеры их реализации.

Данное учебное пособие написано на основе курса лекций по дисциплине «Основы лучевых и плазменных технологий», читаемого студентам Воронежского государственного технического университета, и полностью соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника», направленности «Микроэлектроника и твердотельная электроника» дисциплине «Основы лучевых и плазменных технологий».

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

1.1. Плазма. Основные понятия и характеристики

Плазма представляет собой частично или полностью ионизированный газ, состоящий из смеси стабильных и возбужденных атомов и молекул и продуктов распада молекул: радикалов, положительно и отрицательно заряженных ионов, электронов.

Плазма – электрически квазинейтральная система, в которой отрицательно заряженными частицами являются, в основном, электроны, положительно заряженными – ионы газа. Электроны обладают тепловой энергией $E_{Э} = 1 - 12$ кэВ, что соответствует температуре $T_e = 10^4 - 10^8$ К, при этом их концентрация n_e достигает значений $n_e = 10^9 - 10^{16}$ см⁻³. Атомные и молекулярные частицы имеют тепловые энергии, соответствующие температуре $T_{a,m} = 600$ К.

Название плазмы было введено Ленгмюром.

Плазма - наиболее распространенное состояние вещества. Верхние слои атмосферы, звезды, радиационные пояса Земли, газовые разряды любого типа представляют собой плазму и их поведение связано с явлениями, протекающими в плазме.

Плазма образуется при внешнем воздействии на вещество:

- с помощью различного рода газовых разрядов. Газовый разряд - это способ получения плазмы в земных условиях с помощью электрического поля.

- в сильных переменных и постоянных электрических и магнитных полях;

- нагрев газа в процессе горения; воздействие ионизирующих излучений (лазерное, электронное, ИК и др.); ионизация с помощью ударных волн (в лабораторных условиях).

В дальнейшем, говоря о плазме, мы будем иметь в виду только газообразную плазму, не касаясь рассмотрения свойств плазмы твердых тел.

Под технологической плазмой понимают состояние вещества в виде газового разряда, характеризующееся определенной **степенью ионизации** и **квазинейтральностью**.

Плазма в общем случае состоит из заряженных частиц обоих знаков и нейтральных атомов, молекул и радикалов.

Если обозначить концентрацию электронов и ионов в единице объема n_e или n_i , а концентрацию частиц газа при соответствующих условиях n_r , то воспользовавшись соотношением

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_r} = \frac{n_e}{n_e + n_r} \quad (1.1)$$

можно определить важнейшую характеристику плазмы, называемую «степень ионизации плазмы».

Степень ионизации – это отношение количества ионизированных атомов или молекул к общему количеству тяжелых частиц (нейтральных и заряженных) в объеме

$$\langle \alpha \rangle = \frac{N_i}{N + N_i} \quad (1.2)$$

или

$$\langle \alpha \rangle = \frac{n_e}{n_0} \quad (1.3)$$

где N_i – число ионизированных атомов; N – число нейтральных частиц; n_e – число электронов; n_0 – общее число частиц.

Степень ионизации колеблется в широких пределах от 10^{-7} до 10^{-1} и в значительной степени определяется температурой газа и давлением.

Обычно в технологической плазме $n_r > n_e > n_i$ и поэтому в первом приближении можно записать

$$\alpha \approx \frac{n_i}{n_r} = \frac{n_e}{n_r} \quad (1.4)$$

В зависимости от величины α плазму разделяют на слабо, сильно и полностью ионизированную.

В слабо ионизированной (или низкотемпературной) плазме средняя энергия частиц значительно меньше энергии ионизации атомов, и степень ионизации

$$\alpha = \frac{n_i}{n_r} \ll 10^{-2}.$$

Обычно степень ионизации низкотемпературной плазмы составляет величину долей процента при концентрации электронов $n_e = 10^9 - 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Сильно ионизованная плазма характеризуется

$$\alpha = \frac{n_i}{n_r} > 10^{-2}$$

Для полностью ионизованной плазмы $\alpha \approx 1$. Такая плазма в земных условиях существует только в процессе протекания термоядерной реакции и поэтому имеет весьма ограниченное практическое использование.

Важнейшей физико-технической характеристикой плазмы является ее температура. Плазма может быть низкотемпературной и высокотемпературной.

К низкотемпературной относят плазму, имеющую среднemasсовую температуру газа от комнатной, до примерно равной $5 \cdot 10^4 \text{ К}$.

Низкотемпературная плазма может быть термической, т.е. оказывать тепловое воздействие на вещество, и холодной, т.е. не оказывать такого воздействия. Более строго определить

эти понятия можно, введя такую характеристику плазмы, как температура.

Температура T представляет собой эквивалент энергии W . За единицу энергии в плазме принят один электрон-вольт, равный 11600 К. В плазме как в системе разнородных частиц, имеющих различный заряд и массу, чаще всего помещенной во внешние электрические и магнитные поля, энергия этих частиц будет существенно отличаться. Поэтому в физике говорят о температуре (энергии) отдельных ее компонент, т. е. температуре нейтральных частиц T_n , ионов T_i , электронов T_e .

Масса электрона существенно меньше массы иона. Энергия частиц в плазме приобретает за счет увеличения энергии электрона при его движении во внешних полях, а передается другим частицам в результате столкновительных процессов.

В связи с этим обычно $T_e > T_i > T_n$.

Такая плазма называется неравновесной. Холодная низкотемпературная плазма чаще всего существенно неравновесна и образуется в условиях пониженного давления, когда длина свободного пробега частицы достаточно велика, чтобы на этом пути электрон приобрел значительную энергию ($T_e \cong 10^4$ К).

Термическая низкотемпературная плазма существует чаще всего в условиях нормального атмосферного или повышенного давления, когда длина свободного пробега достаточно мала, количество столкновительных актов в плазме резко возрастает и энергии частиц за счет этого почти выравниваются. Однако в этом случае должны существовать внешние условия, которые быстро компенсируют потери энергии при столкновениях, т.е. эффективность передачи энергии от внешнего источника должна быть очень велика.

Обычно и величина передаваемой энергии значительна - порядка нескольких киловатт и выше. Тогда устанавливается соотношение $T_e \approx T_i \approx T_n$ и плазма может называться квазиравновесной или равновесной.

О температуре плазмы в целом говорить нельзя. Необходимо всегда указывать температуру отдельных ее компонентов.

Например, в неравновесной холодной плазме при $T_e = 10^5$ К температура ионов может составлять порядка $5 \cdot 10^2$ К, а температура нейтральных частиц может быть и того меньше. В это же время энергия отдельных частиц (в том числе ионов и нейтральных) в плазме будет достаточной, чтобы существенно увеличить скорость химических реакций и обеспечить эффективный процесс физико-химических превращений вещества, который при нормальных условиях идет либо слишком медленно, либо вообще не идет.

Низкотемпературной считают плазму с $T_e \leq 10^5$ К, а высокотемпературной с $T_i \approx 10^6 - 10^8$ К.

Высокотемпературная (горячая) плазма состоит практически только из электронов и ионов, а степень ее ионизации близка к единице.

Квазинейтральность означает приблизительное равенство концентраций зарядов противоположного знака.

Плазма не может быть создана малым числом заряженных частиц. О плазме можно говорить только в том случае, если суммарное увеличение концентрации зарядов одного знака создает электрическое поле, приводящее к перераспределению заряженных частиц в пространстве и выравниванию концентраций зарядов противоположного знака.

Критерием квазинейтральности плазмы является такая концентрация заряженных частиц, при которой размер области, занимаемой газом (L) значительно больше дебаевского радиуса (r_D). **Дебаевский радиус** – это расстояние, на котором кулоновское поле любого заряда плазмы экранируется окружающими его зарядами противоположного знака. Дебаевский радиус определяется выражением

$$r_D = \left(\sum_j \frac{q_j^2 n_j}{\varepsilon_0 k T_j} \right)^{-1/2}, \quad (1.5)$$

где n_j и T_j – концентрация и температура частиц сорта j с зарядом q_j ; k – постоянная Больцмана.

В общем случае плазма – это смесь электронного, ионного, фотонного газов и газа нейтральных атомов и молекул. Для характеристики энергетического состояния каждого газа вводят понятие электронной T_e , ионной T_i , фотонной T_ϕ температур и температуры газа T_g .

В частном случае для плазмы, состоящей из электронов и однозарядных ионов при $T_e = T_i = T$ и $n_e = n_i = n$ дебаевский радиус определяется как

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T}{2e^2 n}}. \quad (1.6)$$

Если линейный размер объема, занимаемого газом, равен L , то минимальная концентрация зарядов одного знака, при которой выполняется условие квазинейтральности плазмы (при $L = r_D$), $n_{\min} = 2,4 \cdot 10^3 (T/L^2)$.

На расстоянии порядка r_D электрическое поле отдельной частицы в плазме практически исчезает, вследствие «экранирования» частицами противоположного знака. Внешнее электрическое поле способно проникать в плазму тоже на глубину, не превышающую r_D . Экранировка этого поля обусловлена появлением в плазме компенсирующих полей пространственных зарядов. Квазинейтральность может нарушаться вблизи границы плазмы за счет теплового движения на длину r_D .

1.2. Элементарные процессы в плазме

Основными процессами, приводящими к образованию активных частиц плазмы, являются неупругие столкновения электронов с атомами и молекулами.

Соударения электронов с молекулами газа делятся на упругие и неупругие. При упругих соударениях происходит

перераспределение кинетической энергии взаимодействующих частиц без изменения их внутренней энергии (процесс 1, табл. 1.1).

При неупругих столкновениях столкновение электронов с атомами или молекулами сопровождается изменением внутренней энергии или химического состояния последних (процессы 2 - 7, табл. 1.1). Неупругие соударения могут быть первого рода и второго рода.

При неупругих соударениях первого рода происходит передача энергии от электронов к атомам или молекулам газа. Неупругие соударения второго рода сопровождаются передачей энергии от возбуждённых атомов или молекул к электронам.

При использовании плазмы в технологическом оборудовании полупроводниковой техники, как правило, имеют дело с низкотемпературной плазмой, степень ионизации которой не очень высока.

В силу этого большое значение имеют столкновения между нейтральными частицами и электронами, а также ионов с нейтральными частицами.

Электрон - электронные и ион - ионные столкновения играют в низкотемпературной плазме меньшую роль.

Таблица 1.1
Типы элементарных процессов

Реакция	Схема
1 Передача импульса	$AB + e(p_1) \rightarrow AB + e(p_2)$
2 Возбуждение	$AB + e \rightarrow AB^* + e$
3 Диссоциативное прилипание	$AB + e \rightarrow A^- + B$
Образование ионной пары	$AB + e \rightarrow A^- + B^+ + e$
4 Отлипание	$A^- + e \rightarrow A + 2e$
5 Диссоциация	$AB + e \rightarrow A + B + e$
6 Ионизация	$AB + e \rightarrow AB^+ + 2e$
7 Диссоциативная ионизация	$AB + e \rightarrow A^+ + B + 2e$

К элементарным процессам в плазме газового разряда относят:

- 1) ионизацию;
- 2) диссоциацию молекул на атомы без ионизации;
- 3) рекомбинацию;
- 4) упругие соударения с обменом энергии;
- 5) процессы перезарядки.

Ионизацией называют отрыв части электронов от атомов или молекул, который может осуществляться несколькими путями:

- а) термическим (термическая ионизация);
- б) воздействием излучения различных видов (рентгеновское, УФ, лазерное и т. д.);
- в) электрическим разрядом.

В технологических плазменных устройствах чаще всего обеспечивается ионизация в электрических газовых разрядах различного вида.

Механизм ионизации в разряде заключается в образовании электронной лавины.

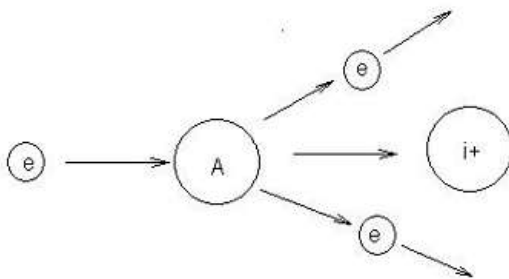


Рис. 1.1. Образование электронной лавины

Обязательным условием развития лавины должно быть электрическое или электромагнитное поле такой величины, чтобы оно сообщало электрону на длине свободного пробега больше энергии, чем нужно для выбивания из атома еще одно-

го электрона. Такой механизм носит название ионизации электронным ударом.

Так как в большинстве плазменных технологических устройств используются многоатомные газы, одним из результатов столкновительных процессов с молекулами является их диссоциация.

Под *диссоциацией* понимается расщепление молекулы на более простые частицы в результате нарушения связи между атомами, происходящее за счет поглощения молекулой избыточной энергии.

Схематично это может быть представлено: $AB \leftrightarrow A + B$

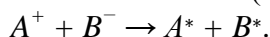
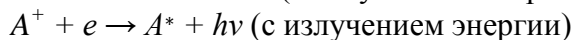
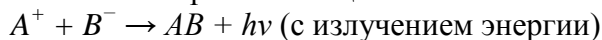
В конечном счете, именно этот процесс ответственен за многие физико-химические превращения, используемые в различных технологических задачах.

Кроме процесса ионизации в плазме происходит и процесс нейтрализации заряженных частиц - так называемая *рекомбинация*.

Вследствие соединения двух частиц с противоположными знаками рекомбинация является важным каналом убыли электронов и ионов в плазме.

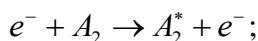
Рекомбинировать могут положительные и отрицательные ионы, а также электроны с положительными ионами.

Возможные механизмы рекомбинации

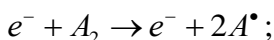


Рассмотрим основные процессы, приводящие к образованию активных частиц плазмы двухатомного газа (A_2) при электронном ударе (e^-):

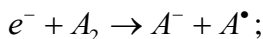
а) возбуждение с образованием метастабильных электронно- и колебательно-возбужденных молекул (A_2^*)



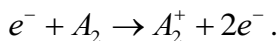
б) диссоциация с образованием валентно ненасыщенных частиц – радикалов (A^\bullet)



в) диссоциация с захватом электрона и образованием отрицательного иона и радикала



г) ионизация, ведущая к появлению положительно заряженных ионов и дополнительных электронов



Из неупругих взаимодействий наибольшее значение имеет ионизация, так как именно этот процесс является ответственным за поддержание газового разряда. Характерной особенностью зависимости эффективного сечения ионизации от энергии электронов является наличие пороговой энергии этого процесса, находящейся в интервале от нескольких эВ до двух десятков эВ для всех частиц.

Любая из частиц (возбужденная молекула, ион, свободный атом или радикал) может выполнять роль активной частицы, которая при взаимодействии с обрабатываемыми материалами образует летучее или легко распыляемое соединение, т.е. осуществлять «плазменное» травление.

Электронные соударения в плазме газового разряда являются главным механизмом создания ионов, атомов и радикалов при разрядах в инертных и молекулярных газах. В молекулярных газах ионизация осуществляется параллельно с расщеплением молекул. При этом происходит диссоциация и ионизация. Механизм процессов, протекающих в плазме, очень сложен и включает большое количество элементарных реакций и взаимодействий.

Рассмотрим наиболее характерные.

Простая ионизация:



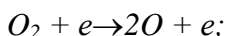
Диссоциативная ионизация:

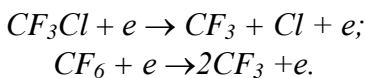


Диссоциативная ионизация - ионизация с прилипанием:



Молекулярная диссоциация без ионизации:





Большинство атомов и радикалов возникает по этому механизму, притом возникновение атомов и радикалов в молекулярных газах необходимо для осуществления травления, так как молекулярные рабочие газы почти всегда обладают низкой реакционной способностью. Например, CF_4 не взаимодействует с Si вплоть до температуры плавления (1412 °C). Однако в плазме разряда CF_4 образует атомарный фтор, вступающий в реакцию с Si при комнатной температуре.

Термическое равновесие между электронами и более тяжелыми частицами отсутствует, в результате последние имеют температуру, близкую к температуре окружающей среды, а энергии электронов достаточно для возбуждения и ионизации молекул.

Если основной плазмы является инертный газ, то она содержит ионы, электроны и атомы, в том числе и возбужденные. Если же используются молекулярные газы, то присутствуют также свободные атомы и радикалы, имеющие на внешней электронной оболочке неспаренный электрон и вследствие этого обладающие высокой химической активностью.

Таким образом, основные процессы создания активных частиц:

- а) плазмы газового разряда – образование радикалов;
- б) плазмы инертных газов – ионизация;
- в) плазмы многоатомного газа – возбуждение и ионизация.

1.3. Газовые среды и химические реакции в плазме

В низкотемпературной плазме, используемой для технологических задач микроэлектроники, большую роль играет образование химически активных частиц.

Специфической особенностью процессов в плазме является наличие целого ряда одновременно, и большей частью

независимо друг от друга протекающих гомогенных и гетерогенных реакций, особенно при использовании многокомпонентных смесей.

Наиболее распространенными реагентами, применяемыми в производстве ИС для травления пленочных материалов, являются газы, приведенные в табл. 1.2, а также их смеси с O_2 , N_2 , H_2 , Ar и др.

Таблица 1.2

Газы, используемые в производстве ИС

Реагент	Агрегатное состояние
CCl_4 - тетрахлорметан	жидкость
CCl_2F_2 - дифтордихлорметан	жидкий газ
CF_4 - тетрафторметан	газ
$SiCl_4$ – четыреххлористый кремний	жидкость
SF_6 – гексафторид серы	жидкий газ
BCl_3 – трихлорид бора	жидкость
SiH_2Cl_2 - дихлорсилан	жидкий газ
SiH_4 - моносилан	жидкий газ

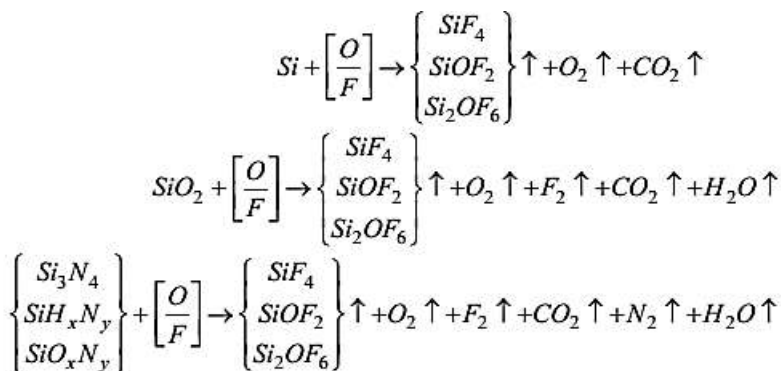
Главную роль в образовании активных частиц в плазме играют процессы диссоциации молекул электронным ударом.

Физико-химические процессы в плазме очень сложны, что можно проиллюстрировать на примере плазмохимического травления кремния и его соединений в плазме, содержащей фтор (например, в плазме) CF_4 .

Продуктами первичной диссоциации CF_4 являются: F^* , CF_3^* , CF_3 , F^- , CF_3^- , CF_3^+ , и т. д., которые принимают в процессе травления активное участие.

Кроме этого в плазмохимических реакциях принимают участие и те газы, которые присутствуют в реакционной камере после ее предварительной откачки или добавляются в реакционные смеси. Причем активироваться и приобретать способность к химическим реакциям могут и инертные газы (в том числе Ar и Xe).

В присутствии углерода и водорода общие уравнения реакций взаимодействия с кремнийсодержащими соединениями в плазме, где наряду с фтором, присутствует и кислород, могут быть записаны в виде:



Приведенные уравнения реакций, однако, не отражают в полном объеме всего многообразия и сложности химических процессов в плазме.

В частности, взаимодействие кислорода с радикалами CF_3^* может приводить к образованию не только CO_2 , но и CO , COF_2 , F .

Поэтому в настоящее время продолжается интенсивный поиск эмпирических закономерностей для выявления оптимальных технологических режимов. Одновременно ведется поиск составов реакционных смесей, обеспечивающих лучшие характеристики: скорость обработки, селективность, анизотропность.

Для этих целей применяются более сложные по составу реагенты, добавляются газы, содержащие в связанном состоянии кислород и т. д.

Существенную роль при химических реакциях в плазменном технологическом оборудовании играют материалы электродов и стенок реакционной разрядной камеры. В результате реакций с конструктивными элементами могут суще-

ственно снижаться скорости процессов обработки за счет отвода химически активных частиц на стенки.

Изучение механизма и характера химических процессов в плазме постоянно выдвигает новые требования к конструкции плазменного технологического оборудования, в частности:

- 1) необходимость проведения процесса в несколько стадий и создание для этого многореакторного оборудования;
- 2) обеспечение откачки несколькими вакуумными системами (предварительная глубокая откачка и рабочая откачка);
- 3) необходимость шлюзовой загрузки и выгрузки изделий и т. д.

1.4. Особенности газового разряда при низком давлении

Развитие и существование постоянного разряда низкого давления в значительной мере определяется эмиссией электронов с катода. В таких разрядных устройствах применяются горячие, холодные и реже так называемые плазменные катоды.

При использовании горячих катодов электроны эмиттуются вследствие термоэлектронной эмиссии, и разряд поддерживается при напряжении до 100 В и больших плотностях тока (до нескольких ампер).

В холодных катодах эмиссия электронов осуществляется за счет их бомбардировки ионами и нейтральными частицами. В этом случае разряд горит при напряжениях от нескольких сотен вольт до нескольких киловольт. Плотность разрядного тока меньше, чем в устройствах с горячим катодом.

Плазменные катоды характеризуются использованием вспомогательных разрядов, являющихся источниками электронов.

Для плазмы низкого давления характерна рекомбинация электронов и ионов на стенках разрядной камеры. Длина свободного пробега электронов и ионов при низких давлениях значительно больше размеров камеры. В период формирования плазмы электроны, попадающие на стенки, сообщают им

отрицательный потенциал, поэтому в установившемся режиме электроны движутся к стенкам в тормозящем поле. Путь до стенки они проходят практически без столкновений с атомами газа. Движение же положительных ионов происходит в ускоряющем поле. Рекомбинация электронов и ионов на стенках приводит к спаду концентрации электронов и ионов по направлению от оси разряда к его границе. Этот градиент концентраций в свою очередь вызывает диффузионное движение заряженных частиц к стенке. Поскольку концентрации электронов и ионов равны и достаточно велики, а температура T_e больше T_i на 2 - 3 порядка, то движение в плазме низкого давления происходит по законам амбиполярной диффузии.

Первичные электроны, из-за большей подвижности чем ионы, главным образом переносят энергию внешнего электрического поля в плазму разряда.

Можно записать уравнение баланса мощностей в плазме

$$P_e = P_n + P_v + P_p + P_i + P_{рек}, \quad (1.7)$$

где P_e - мощность, получаемая электронами от электрического поля;

P_n - мощность, расходуемая электронами на нагрев газа;

P_v - мощность, расходуемая на возбуждение атомов;

P_p - мощность, уносимая из разряда радиацией (тепловой и световой);

P_i - мощность, расходуемая на ионизацию;

$P_{рек}$ - мощность, выделяющаяся на стенках при рекомбинации.

При низких давлениях основная доля энергии электронов расходуется на ионизацию. На нагрев и возбуждение атомов расходуется около 5 % энергии.

Для достижения высокой плотности носителей заряда при низкой затрате энергии на получение одного иона необходимо уменьшить потери носителей заряда и энергии. Один из способов ограничения утечки электронов состоит в том, что подают достаточно высокий отрицательный потенциал или

сами стенки включают катодом. Этот принцип устойчивого поддержания плазмы используется, например, в ионных источниках с полым катодом.

Часто стенки разрядной камеры выполняют из диэлектрического материала (кварца, пирекса, оксида алюминия Al_2O_3).

1.5. Средства и способы устойчивого поддержания плазмы

Для создания и поддержания низкотемпературной плазмы в технологических плазменных устройствах чаще всего используется газовый электрический разряд.

Электрические разряды в газе подразделяются на самостоятельные и несамостоятельные.

Если основную ионизацию газа создают постоянные источники (например, источники ультрафиолетового или рентгеновского излучения) и без них разряд не может существовать, то его называют несамостоятельным.

Несамостоятельным называется разряд, требующий для своего поддержания, кроме энергии внешнего электрического поля, независимого источника заряженных частиц (нагревание катода, облучение газа светом, рентгеновским или радиоактивным излучением).

Как правило, в технологических устройствах электронной техники используется самостоятельный разряд. В этом случае процесс поддерживается внутренними источниками ионизации (например, столкновениями электронов с молекулами и атомами газа, процессами на катоде и т.д.).

Самостоятельным называется разряд, в котором генерация зарядов и их движение в разрядном промежутке осуществляется только за счёт энергии внешнего электрического поля.

Для перехода несамостоятельного разряда в самостоятельный, и обеспечения лавинного пробоя требуется начальная концентрация электронов n_{e0} , которая может быть получена либо за счет впрыска электронов (так называемый поджиг раз-

ряда), либо за счет остаточной ионизации. Поджиг разряда обычно обеспечивается каким-либо вспомогательным устройством, действующим в течение короткого начального отрезка времени. Остаточная ионизация обычно является следствием естественных процессов в газовой среде (например, за счет естественного фона радиоактивности). При наличии предварительной ионизации и соответствующей напряженности поля электронной лавины возможно развитие и поддержание самостоятельного электрического газового разряда.

Основными формами газовых разрядов являются: тлеющий, дуговой, искровой, высокочастотный и некоторые их разновидности.

Существование разряда может поддерживаться не только при непосредственном контакте плазмы с электродами (электродный разряд), но и в отсутствие такового контакта (безэлектродный).

Самостоятельный разряд подразделяется на несколько основных типов:

1. Тлеющий разряд постоянного тока. Тлеющий разряд постоянного тока характеризуется большим катодным падением потенциала и своеобразным чередованием темных и светлых полос. Тлеющий разряд постоянного тока возникает при средних давлениях ($0,1 - 10^4$ Па) и среднем внутреннем сопротивлении источника питания.

2. Периодические разряды, возбуждаемые и поддерживаемые переменным электрическим полем, электроды внешние или вообще отсутствуют. Диапазон рабочих давлений периодических разрядов близок к диапазону давлений тлеющего разряда постоянного тока.

3. Дуговой разряд, возникающий при высоких давлениях и наличии мощного источника питания.

4. Искровой разряд, возникающий при высоком давлении и наличии высоковольтного, но маломощного источника питания.

Наибольшее распространение в технологии микроэлектроники получила неизотермическая плазма самостоятельного

газового разряда пониженного давления, где генерация заряженных частиц в разрядном промежутке осуществляется только за счёт энергии внешнего электрического поля. Основными типами самостоятельного разряда, используемого в процессах плазменной обработки материалов, являются тлеющий разряд постоянного тока и периодические разряды (ВЧ, СВЧ, ЭЦР – плазма (плазма электрон-циклотронного резонанса)), возбуждаемые и поддерживаемые переменным электрическим полем. Для ВЧ разрядов существуют два основных способа возбуждения - индукционный (разряд Н-типа) и емкостной (разряд Е-типа), различающиеся тем, замыкаются силовые линии электрического поля в плазме (разряд Н-типа) или нет. В разряде Е-типа электроды, аналогичные обкладкам конденсатора, располагаются в плазме или вне ее, силовые линии электрического поля в плазме не замыкаются. Для возбуждения разрядов в СВЧ диапазоне ($\omega > 10^9$ Гц) используются различные виды колебательных контуров, которые называют резонаторами. ЭЦР - плазма возбуждается в системе скрещенного магнитного и переменного электрического полей.

В настоящее время наибольшее распространение получили источники «плотной» плазмы (high density plasma sources) с индукционной безэлектродной системой возбуждения разряда, позволяющие работать в более низком диапазоне давлений (0,1 – 10 Па) и обеспечивающие концентрации заряженных частиц на уровне $10^{11} - 10^{12} \text{см}^{-3}$. Достоинством таких систем является возможность независимой регулировки плотности потока ионов (при варьировании мощности питающего генератора) и их энергии при взаимодействии с поверхностью (при варьировании величины отрицательного смещения на подложкодержателе).

Определенный технологический интерес представляют дуговые разряды, характерной особенностью которых является высокая температура газа, электродов и интенсивное излучение зоны разряда. Дуговой разряд используется для сварки и резки металлов, в качестве источника излучения и т.д.

1.6. Типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал

В основу работы технологического плазменного оборудования, используемого в настоящее время, могут быть положены различные типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал:

- 1) термическое воздействие плазмы на введенные в реакционный объем материалы и среды;
- 2) воздействие заряженными частицами высоких энергий (ионами и электронами);
- 3) воздействие нейтральными возбужденными в плазме химически активными атомами, молекулами и радикалами;
- 4) воздействие фотонами ультрафиолетового диапазона излучения;
- 5) комплексное воздействие.

Структурно типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал представлены на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал

Каждый из приведенных типов воздействия определяет назначение соответствующего технологического оборудования и процессов:

- для получения монокристаллов или порошков тугоплавких материалов;
- для осаждения толстых или тонких слоев;
- для очистки поверхности от органических или неорганических загрязнений или пленок;
- для травления слоев физическим распылением;
- для травления слоев плазмохимическим способом;
- для полимеризации поверхностных слоев и т. д.

В конкретном технологическом оборудовании может использоваться плазма с различными сильно отличающимися характеристиками и параметрами. Это может быть либо термическая низкотемпературная квазиравновесная плазма с высокой среднемассовой температурой газа, либо холодная неравновесная плазма при пониженном давлении с высокой электронной температурой.

Виды воздействия на обрабатываемый материал могут резко отличаться, однако в любом случае инструментом воздействия служит плазма газового электрического разряда либо ее составляющая. Обычно это плазма с контролируемым составом обновляемой газовой среды в замкнутом объеме.

Чаще всего для передачи энергии в плазму используются такие виды разрядов, которые не вносят загрязнения конструктивных элементов разрядного устройства.

2. ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

2.1. Место плазменных процессов в технологии микроэлектроники

Технологический процесс изготовления ИМС можно свести к последовательности повторяющихся типовых операций (рис. 2.1), таких как нанесение покрытий и функциональных слоев (проводящих, изолирующих, полупроводниковых), литографию (формирование топологического рисунка на поверхности), травление и очистку поверхности, диффузию и ионное легирование.

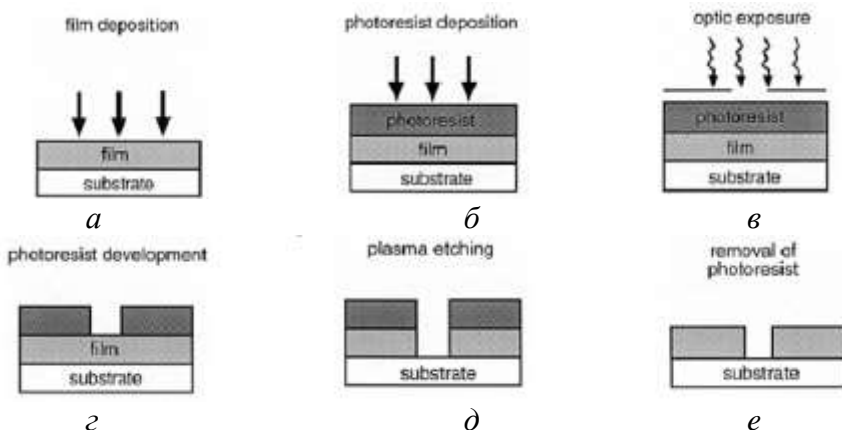


Рис. 2.1. Типовые операции в производстве в производстве ИМС

При постоянно существующей тенденции к повышению степени интеграции ИМС в первую очередь повышаются требования к качеству проведения «размерных» операций, то есть тех, которые непосредственно определяют геометрические параметры получаемых элементов (рис. 2.1 г, д). Важнейшими из таких операций являются операции размерного травления, ко-

торые по функциональному назначению подразделяются на следующие группы:

Травление органических материалов. Типичным примером здесь является вскрытие окон в экспонированной фоторезистивной маске (**фоторезист** - органический светочувствительный полимер) для последующего размерного травления нижележащего слоя.

Травление неорганических материалов. Набор возможных процессов здесь очень широк и обусловлен широким набором неорганических материалов, применяемых в производстве интегральной кремниевой электроники. Среди таких процессов в первую очередь необходимо отметить размерное травление моно- и поликристаллического *Si*, диэлектрических пленок *SiO₂* и *Si₃N₄*, а также пленок некоторых металлов (*Al*, *Cu*, *Au*, *W*, *Mo* и др.), используемых для создания межэлементных соединений, контактов, промежуточных и согласующих слоев.

При невысокой степени интеграции ИМС и при характерных размерах элементов не ниже 10 мкм все перечисленные процессы могут реализоваться методами жидкостного травления, при этом результат травления является удовлетворительным по всей совокупности выходных характеристик, таких как воспроизводимость, селективность и анизотропия. Тем не менее, при переходе к субмикронной технологии ИМС жидкостные методы травления становятся неприемлемыми в силу двух основных причин: 1) жидкостное травление носит изотропный характер, то есть скорость его одинакова по всем направлениям. Это создает проблему бокового подтравливания под маску, при этом фактический размер протравленной области в слое под маской существенно превышает заданный размером окна в маске; 2) применение жидкостных методов сопровождается загрязнением поверхности продуктами реакций и сторонними примесями, содержащимися в исходных реагентах и в воде, использованной для их приготовления. Замена жидкостных методов на «сухие» - плазмохимические и ионно-плазменные - позволяет существенно улучшить анизотропию процесса трав-

ления, увеличить его разрешение и дает в руки технолога мощный и гибкий инструмент, с помощью которого можно получать структуры заданной конфигурации и нужных размеров. Меняя состав плазмообразующего газа, параметры разряда можно в широких пределах варьировать скорости целевых процессов, их анизотропию и селективность в соответствии с требованиями, предъявляемыми к размерам и характеристикам изделий.

Анализ литературных данных последних лет, в основном зарубежных, показывает, что развитие технологии плазменной обработки материалов происходит по пути интенсификации и повышения эффективности уже хорошо отработанных и изученных процессов. В этом плане необходимо отметить, что «чистое» плазмохимическое травление, обеспечиваемое только химическим взаимодействием активных частиц плазмы с обрабатываемым материалом, начиная со второй половины 90-х годов, используется очень ограниченно. Подавляющее большинство технологических процессов травления в плазме в настоящее время реализуется в виде ионно-стимулированных и ионно-лучевых процессов, которые сочетают химические и физические эффекты воздействия на обрабатываемый материал. Наибольшее распространение получили такие перспективные методы, как реактивное ионное травление (RIE, Reactive Ion Etching), лазерно- (LIE, Laser Induced Etching) и фото-стимулированные процессы (PIE, Photo Induced Etching).

2.2. Классификация плазменных технологических процессов по механизму воздействия на обрабатываемую поверхность

В основе классификации плазменных технологических процессов по механизму воздействия на обрабатываемую поверхность (рис. 2.2) лежит выделение трех основных видов обработки с использованием плазмы:

- ионной;
- плазмохимической;

- ионно-химической (иногда называемой реактивно-ионной).



Рис. 2.2. Классификация плазменных технологических процессов по механизму воздействия на обрабатываемую поверхность

Ионная обработка (ИО) представляет собой процесс, при котором поверхностные слои твердого вещества подвергаются бомбардировке ускоренными положительными ионами, как правило, инертных газов, химически не реагирующими с обрабатываемым материалом. Если обрабатываемый материал помещен на электродах или держателях, соприкасающихся с плазмой разряда, то обработку в таких условиях называют **ионно-плазменной**. Если материал помещен в вакуумную зону обработки, отделенную от области плазмы, то обработка в этом случае называется **ионно-лучевой**.

При **плазмохимической обработке** (ПХО) основными ответственными за процесс частицами выступают химически активные нейтральные атомы, молекулы, радикалы, часто объединяемые под общим названием химически активные части-

цы (ХАЧ), вступающие в химические реакции с поверхностными слоями материалов. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы разряда, то обработку называют **плазменной**. В этом случае химические реакции на поверхности материала будут активироваться низкоэнергетическими электронной и ионной бомбардировками, а также фотонной бомбардировкой. Если материал находится в вакуумной зоне обработки, обычно называемой в этом случае реакционной зоной и отделенной от области плазмы, то обработку производят ХАЧ без активации электронной и ионной бомбардировками, а в ряде случаев и при отсутствии воздействия фотонов. Такую обработку называют **радикальной**.

Ионно-химическая обработка (ИХО) представляет совместное воздействие физического распыления и химических реакций с участием ионов различных веществ и поверхностных атомов материала. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы, то процесс в этих условиях называют **реактивным ионно-плазменным**. Тогда ХАЧ могут доставляться к поверхности материала из плазмы разряда или образовываться на поверхности при ударной диссоциации молекул или нейтрализации атомарных ионов. На поверхность материала воздействуют также электронная и фотонная бомбардировки.

Если же из объема плазмы с помощью системы вытягивающих, ускоряющих или фокусирующих устройств выделяется поток молекулярных или атомарных ионов, такая обработка носит название **реактивной ионно-лучевой**.

В процессах ионно-химической обработки трудно выделить вклад физического и химического механизмов, так как физическое распыление активирует поверхность материалов, повышая скорость химических реакций, которые, в свою очередь, ослабляют химические связи поверхностных атомов, увеличивая скорость их поверхностного распыления. Так как заметных скоростей физическое распыление достигает при энергиях ионов больше $1,6 \cdot 10^{-17}$ Дж (100 эВ), то данная энергия ионов, бомбардирующих материал, служит условной гра-

ницей между процессами ИХО и ПХО. При $E_{и} < 100$ эВ обработка будет относиться к ПХО, а при $E_{и} > 100$ эВ - к ИХО.

2.3. Технологические требования и параметры, характеризующие процесс травления

Процесс плазменного травления характеризуется скоростью, анизотропией, разрешающей способностью, селективностью, равномерностью и текстурой, загрузочным эффектом.

Скорость плазменного травления характеризует скорость удаления материала и измеряется в нм/мин или других аналогичных единицах. При выборе скорости процесса необходимо учитывать следующие соображения: во-первых, нежелателен длительный цикл технологической обработки по соображениям снижения производительности аппаратуры. Во-вторых, нежелательны и слишком быстрые технологические процессы по причине ухудшения воспроизводимости результатов, равномерности обработки и т.д. Наиболее целесообразны времена обработки от нескольких минут до часа, хотя в реальной технологии могут быть отклонения в ту или иную сторону. Поэтому если глубина травления задана, то скорость процесса может предварительно оценена, и эти оценки могут быть использованы при подборе технологических режимов.

Анизотропия – это фактор, характеризующий искажение изображения при переносе его с маски на объект за счет бокового подтравливания (рис. 2.3). Анизотропия может быть определена как отношение скоростей травления материала по нормали и по касательной к поверхности или как отношение глубины травления h к боковому подтравливанию δ : $A = R_{\perp} / R_{\parallel} = h / \delta$.

Очевидно, что чем выше анизотропия, тем выше качество получаемых изделий, хотя в ряде случаев изотропное травление позволяет получить положительные результаты.

Разрешающая способность характеризует степень интеграции микросхем и представляет собой максимально возможное число линий рисунка на 1 мм поверхности $RS = 1000 / 2l$,

где l , мм, - ширина раздельно передаваемой линии. Кроме этого, разрешающую способность часто определяют наименьшей шириной линии или наименьшим расстоянием между линиями (в микрометрах), которых удастся достичь в технологическом процессе. Разрешающая способность в целом определяется всем комплексом технологических процессов, в том числе и процессом травления материала.

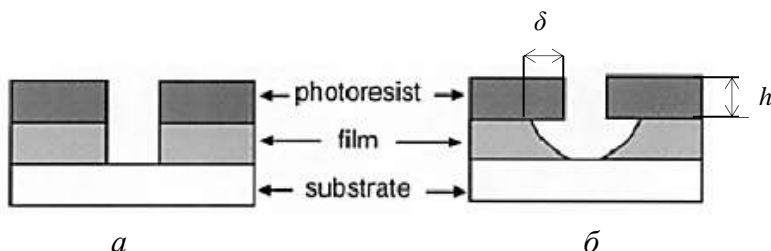


Рис. 2.3. Примеры анизотропного (а) и изотропного травления (б)

Селективность травления – это отношение скоростей травления двух разных материалов (обычно основного материала и фоторезистивной маски – см. рис. 2.3) в одних и тех же условиях и в одном направлении. Селективность должна быть такой, чтобы можно было обеспечить травление основного материала на заданную глубину до полного стравливания маски.

Равномерность травления и текстура. Равномерность процесса травления обычно выражается в процентах и может быть найдена как

$$UN = 2 \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max} + R_{min}} \cdot 100, \quad (2.1)$$

где R_{max} и R_{min} - максимальная и минимальная скорости травления, соответственно.

Текстурированность поверхности характеризует изменение ее шероховатости после травления. В зависимости от условий процесса и рабочего газа текстурированность может как уменьшаться, так и возрастать.

Загрузочный эффект - это уменьшение скорости травления с увеличением площади обрабатываемых изделий, связанное с обеднением газовой фазы активными частицами из-за их расхода в процессе травления. Наличие загрузочного эффекта свидетельствует о том, что травление материала протекает с лимитирующей стадией доставки ХАЧ к поверхности. Этот эффект необходимо учитывать при групповой обработке пластин.

2.4. Рабочие газы для плазменного травления

Плазмообразующая среда в реакторе в первую очередь должна обеспечить необходимую скорость травления, селективность и анизотропию. В то же время к рабочим газам предъявляется и ряд побочных требований - безопасность в работе и отсутствие в продуктах реакции токсичных соединений, химическая инертность по отношению к конструкционным элементам установок и откачных средств, отсутствие взаимодействия с маслами вакуумных насосов, вызывающих их деградацию, и др.

Необходимость травления широкого ассортимента материалов и обеспечение указанных выше требований привело к использованию большого количества различных газов и их смесей в технологии плазменного травления.

Инертные газы применяются в качестве основного компонента при ионном травлении и входят в состав различных смесей в качестве инертных разбавителей.

Фторсодержащие газы нашли наиболее широкое применение при травлении кремния и его соединений, а также ряда металлов 4 - 6 группы Периодической системы Д.И. Менделеева. Чаще всего используются углеродные галогенсодержащие соединения, имеющие общее название хладоны (фреоны). Общая формула соединений этого типа имеет вид $C_kH_lF_m(Cl)Br_n$, где k, l, m, n - число атомов углерода, водорода, фтора и хлора (брома) в молекуле хладона. Хладоны обычно распознаются по номерам, которые записываются как

$(k - 1)(l + 1)m$. Наибольшее применение из хладонов получил тетрафторметан CF_4 (хладон 14). Общие недостатки этой группы газов - возможность образования токсичных продуктов в процессе травления, склонность к полимеризации (особенно для сложных соединений), возможность образования элементарного углерода на обрабатываемой поверхности (для простых хладонов). Для подавления двух последних эффектов в рабочий газ часто добавляют кислород. В то же время широкая номенклатура хладонов и использование их смесей с другими газами (кислородом, водородом, азотом и т.д.) позволяет создавать рабочие смеси, обеспечивающие необходимую скорость, селективность и анизотропию процесса практически для любых объектов, образующих газообразные соединения с фтором. Из других фторсодержащих газов следует отметить шестифтористую серу SF_6 , применение которой позволяет достичь высоких скоростей травления без осаждения на поверхности твердых продуктов разложения исходного газа. Весьма перспективными являются также фториды азота (в первую очередь NF_3) и благородных газов (например, XeF_2), позволяющие обеспечить максимальную чистоту процесса плазмохимического травления. Чистый фтор практически не применяется из-за своей высокой химической активности по отношению к конструкционным материалам технологического оборудования и токсичности.

Хлорсодержащие газы используются для травления металлов и соединений, не образующих газообразных продуктов с фтором – полупроводниковые соединения типа A^3B^3 , алюминий, медь и некоторые другие. Источником хлора в плазмохимических процессах могут служить хлорсодержащие хладоны, ибо в условиях разряда отщепление хлора происходит в первую очередь. Общие недостатки хлоруглеродных соединений - высокая степень полимеризации в условиях разряда, что вызывает загрязнение аппаратуры и обрабатываемого изделия, замедление травления, быструю деградацию масел вакуумных насосов. Введение кислорода не устраняет полностью полимеризационные явления, но приводит к образованию ряда ток-

сичных продуктов, наиболее опасным из которых является фосген $COCl_2$. В настоящее время хлоруглеродные газы вытесняются Cl_2 и BCl_3 , однако применение чистого хлора сдерживается его высокой токсичностью и химической активностью. Полезные возможности в плане использования чистого хлора имеет его получение непосредственно на плазмохимической установке путем термического разложения хлорной меди по реакции $CuCl_2 \rightarrow 1/2Cl_2 + CuCl$. Устойчивый поток хлора получают при температуре 350 – 400 °С. Достоинства этого метода – низкие давления хлора и обратимость химической реакции, что практически исключает превышение ПДК при аварийной ситуации. Аналогичным образом можно получать и малые количества газообразного брома.

Прочие газы. При травлении органических соединений широкое применение находит кислород, используемый также в качестве компонента сложных смесей при травлении металлов и полупроводников. Для очистки поверхности и мягкого травления ряда полупроводников, в первую очередь соединений A^3B^5 , может быть использован водород и смеси на его основе. На плазменное травление с помощью галогенсодержащих газов благоприятное влияние оказывают различные газовые добавки, что обуславливает широкое использование в качестве плазмообразующих сред бинарных газовых смесей. Наряду с традиционными задаваемыми параметрами процесса (давление газа, скорость потока газа, вкладываемая мощность) регулирование состава газовой смеси является гибким инструментом регулирования целевого результата обработки материала. По своему функциональному назначению газы-добавки могут быть разделены на три большие группы:

Газы - стабилизаторы. Здесь наиболее часто используются благородные газы (Ar , He) и азот. Добавка этих газов стабилизирует и гомогенизирует разряд, устраняет эффекты стратификации и осцилляции плазмы в реакторе. В литературе отмечается, что механизм стабилизирующего действия может быть обусловлен тепловыми свойствами газа-добавки или из-

менением электрофизических параметров разряда при изменении средней энергии и концентрации электронов.

Газы - травители собственных (естественных) оксидов. Добавка этих газов способствует травлению материалов, на поверхности которых изначально присутствует слой собственного окисла. В качестве примера можно привести добавку C_2F_6 к хлору или тетрахлорметану при травлении кремния, а также добавку BCl_3 к хлору при травлении Al и $GaAs$.

Газы – очистители. Этот случай может быть проиллюстрирован добавкой O_2 в плазму CF_4 . Во-первых, кислород насыщает радикалы CF_x (путем перевода в оксифториды CF_xO_y), предотвращая их рекомбинацию с атомами фтора и тем самым увеличивая концентрацию химически активных частиц в плазме. Этот же механизм приводит и к подавлению полимеризации ненасыщенных продуктов распада исходных молекул на стенках реактора и поверхности обрабатываемого материала. Во-вторых, кислород способствует газификации углерода, предотвращая высаживание твердых нелетучих соединений. Оба из перечисленных механизмов работают и при добавке кислорода к CCl_4 .

Газы и газовые смеси, используемые для травления различных материалов, приведены в таблице.

Газы и газовые смеси, используемые для травления различных материалов

Материал	Газовая среда
Si	CF_4/O_2 , CF_2Cl_2 , CF_3Cl , $SF_6/O_2/Cl_2$, NF_3 , CCl_4 , SiF_4/O_2 , C_2F_6/CF_3Cl , Br_2 , CF_3Cl/Br_2
SiO_2	CF_4/H_2 , C_2F_6 , C_3F_8 , CHF_3/O_2
Si_3N_4	$CF_4/O_2/H_2$, C_2F_6 , C_3F_8 , CHF_3
SiC	CF_4/O_2 , NF_3 , SF_6/Cl_2 , CF_4/Cl_2
Al	BCl_3 , BCl_3/Cl_2 , $CCl_4/BCl_3/Cl_2$, $SiCl_4/Cl_2$
Cr	Cl_2 , Cl_2/O_2 , CCl_4/Cl_2
Mo, Nb, Ta, Ti, W	CF_4/O_2 , SF_6/O_2 , NF_3/H_2
Au	$C_2F_2Cl_4$, Cl_2 , $CClF_3$
Cu	Cl_2 , Br_2 , CCl_4
GaAs	BCl_3/Ar , Cl_2/O_2 , Cl_2/H_2 , HCl , H_2 , $CCl_2F_2/O_2/Ar$

2.5. Плазмохимическая обработка

2.5.1. Плазменное травление (ПТ)

При плазменном травлении обрабатываемый образец помещается непосредственно в область химически активной плазмы, располагаясь на специальном подложкодержателе, и находится обычно под плавающим потенциалом. Основными частицами, участвующими в процессе плазменного травления и влияющими на него, являются свободные атомы, радикалы, ионы и электроны. Вклад этих частиц в плазменное травление различен: химически активные частицы, т.е. свободные атомы и радикалы, вступают в химическую реакцию с поверхностными атомами материалов и удаляют поверхностные слои в результате образования летучих продуктов реакции, а электроны и ионы активируют эту реакцию, увеличивая скорость травления. Активирующее воздействие ионов и электронов определяется энергией, с которой они бомбардируют обрабатываемую поверхность. К плазменному травлению относятся процессы, в которых энергия ионов не превышает 100 эВ.

Генерацию энергетически и химически активных частиц для осуществления плазменного травления производят в реакторах, которые должны удовлетворять определенным требованиям. В первую очередь, должны обеспечиваться заданные скорость и равномерность процесса при приемлемых мощности разряда и расходе рабочего газа. Таким требованиям удовлетворяют реакторы с объемным расположением подложек в плазме и реакторы диодного типа, в которых подложки размещают на плоских электродах.

Реакторы с объемным расположением подложек чаще всего имеют цилиндрическую форму и выполняются из кварца. Основные конструктивные решения таких реакторов схематично изображены на рис. 2.4. Плазма в реакторах возбуждается либо индуктором (*а*), либо с помощью обкладок конденсатора (*б*), либо совместно индуктором и обкладками конденсатора (*в*). Во всех случаях электроды вынесены за преде-

лы реакционно-разрядной камеры, что обеспечивает отсутствие взаимодействия плазмы с их материалом и, следовательно, чистоту процессов плазменного травления.

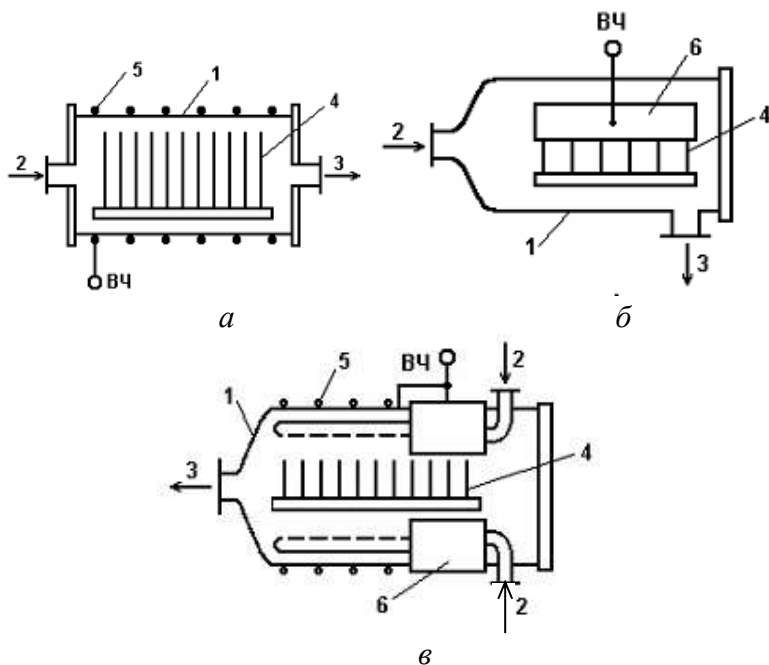


Рис. 2.4. Схемы реакторов плазменного травления:
а – с индукционным возбуждением; *б* - с конденсаторным возбуждением; *в* – комбинированное возбуждение.

1 – вакуумная камера, 2 – линия напуска газа,
 3 – линия откачки, 4 – обрабатываемые подложки,
 5 – индуктор, 6 – конденсаторные обкладки

Общей чертой всех реакторов объемного типа является кассетная загрузка подложек. Одновременно в реакторе может обрабатываться 20 - 100 подложек. Высокая производительность установок - их главное достоинство. В то же время кассетная загрузка подложек имеет существенные недостатки. Во-первых, это большая суммарная площадь обрабатываемой по-

верхности и, как следствие, возможность проявления загрузочного эффекта. Во-вторых, для получения стабильных результатов травления при обработке пластин партиями необходима высокая точность поддержания рабочих параметров от цикла к циклу, что является сложной технической задачей.

В процессе плазменного травления подложки вследствие рекомбинации на их поверхности заряженных частиц с выделением энергии, бомбардировки заряженными и нейтральными частицами, химической реакции, воздействия излучения плазмы могут нагреваться до 100 - 400 °С. При плазменном травлении может наблюдаться неравномерное распределение температуры обрабатываемых подложек, например при травлении в цилиндрических реакторах периферийные участки подложек нагреваются больше, чем центральная область. Кроме того, наблюдается неодинаковый нагрев различных подложек вследствие неравномерного пространственного распределения температуры газа в объеме реактора, что приводит к неравномерности плазменного травления по диаметру подложек и различных подложек в партии. Большим недостатком реакторов объемного типа является высокая неравномерность травления, поскольку скорость травления увеличивается от центра пластины к ее периметру

Значительно большую равномерность травления обеспечивают реакторы планарного типа (рис. 2.5), в которых плазма возбуждается с помощью верхнего ВЧ-электрода. В реакторах объемного типа между плазмой и подложками возникает разность потенциалов 10 – 50 В. Сочетание небольшой разности потенциалов и высокого давления (около 100 Па) обуславливает изотропный характер травления, обеспечивая высокую селективность травления одного материала по отношению к другому (10 – 20). В реакторах планарного типа газ чаще всего подается через отверстие в нижнем электроде и откачивается через отверстия, расположенные на периферии реактора. Разность потенциалов между плазмой и нижним заземленным электродом, на котором расположены подложки, достигает нескольких сотен вольт, поскольку плазма находится между

близкорасположенными электродами. Несмотря на высокий потенциал и низкое давление (менее 65 Па) травление носит изотропный характер. Добиться анизотропии путем снижения давления при близкорасположенных электродах практически невозможно, так как при малых давлениях затруднено стабильное горение разряда. Если увеличить расстояние между электродами, то можно снизить рабочее давление, однако травление, тем не менее, останется изотропным, поскольку при этом разность потенциалов между плазмой и нижним заземленным электродом быстро падает. Скорость травления в планарном реакторе обычно больше, чем в объемном, а селективность значительно ниже.

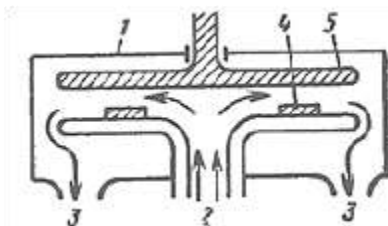


Рис. 2.5. Реактор планарного типа с плоскопараллельными электродами: 1 – корпус реактора; 2 – подача газа; 3 – откачка; 4 - обрабатываемые пластины; 5 – ВЧ-электрод

Основными рабочими параметрами, определяющими характеристики процесса плазменного травления, являются: мощность, вкладываемая в разряд, рабочее давление, расход газа и способ его подвода к обрабатываемой поверхности, температура подложек, состав используемого газа.

Плазменное травление характеризуется следующими операционными и выходными параметрами:

- давление газа 50 - 10^3 Па (для объемных реакторов);
10 - 10^2 Па (для планарных реакторов);
- расход газа (при нормальном давлении) 50 – 100 см³/с;
- скорость травления 2 - 10 нм/с;

- показатель анизотропии травления 2 – 5;
- разрешающая способность (на пленке материала толщиной 1 мкм при разрешении в маске 0,3 мкм) 0,7 – 1 мкм;
- селективность травления 10 – 30;
- равномерность травления (на пластине \varnothing 100 мм на неподвижном подложкодержателе) 80 – 90 %;
- температура подложки в процессе травления (без принудительного охлаждения подложкодержателя) 150 – 250 °С.

При производстве ИМС с субмикронными размерами элементов ПТ может быть применено только для формирования топологии в пленках толщиной более 0,5 мкм. Это обусловлено значительным подтравливанием под маскирующий слой, при этом величина подтравливания в некоторых случаях равна глубине травления. При ПТ показатель анизотропии обычно не превышает 2 - 5, что ограничивает предельное разрешение процесса на уровне 0,7 – 1,0 мкм. При требовании прецизионного травления плазменное травление может быть применимо, пока отношение ширины линии к толщине слоя превышает 5 : 1.

Увеличение анизотропии, и, следовательно, разрешения плазменного травления, возможно при снижении рабочего давления. При этом увеличивается длина свободного пробега активных частиц и при небольших размерах окон в маскирующем слое, сравнимых с его толщиной (примерно 0,5 мкм), вероятность попадания активных частиц на боковые стенки подвергаемых травлению элементов значительно снижается. Диапазон рабочих давлений при плазменном травлении определяется характеристиками используемого для возбуждения плазмы разряда. Наиболее перспективным в этом плане является СВЧ разряд, позволяющий проводить процесс при давлениях меньше 0,1 Па, однако при этом снижается скорость травления материалов.

В настоящее время при изготовлении ИМС и полупроводниковых приборов ПТ применяется для многих материалов, к числу которых в первую очередь относятся кремний и его соединения, молибден, титан, тантал, вольфрам и др. С

точки зрения влияния на обрабатываемые структуры при ПТ могут проявляться следующие особенности:

1. Увеличение шероховатости обрабатываемой поверхности, которое может быть связано, во-первых, с загрязнениями (выделение твердых продуктов разложения исходных газов, распыление электродов и конструкционных материалов реактора и т.д.) и, во-вторых, с переосаждением основного травимого материала, которое проявляется, преимущественно, при высоких скоростях травления. Для устранения первой причины необходимо правильно подбирать рабочие среды, использовать химически инертные по отношению к плазмообразующему газу конструкционные материалы реакторов, по возможности снижать потенциалы электродов. Исключение переосаждения основного материала может быть достигнуто выбором оптимального соотношения между скоростью травления и потоком рабочего газа.

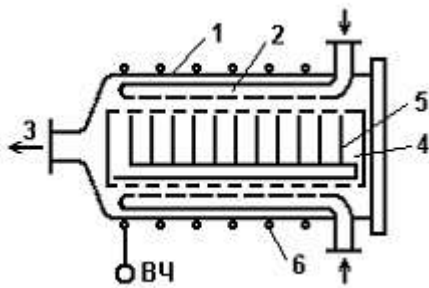
2. Появление радиационных дефектов, связанное с ионной бомбардировкой и ультрафиолетовым облучением. При плазмохимическом травлении радиационные дефекты, как правило, незначительны и, в случае необходимости, могут быть легко устранены отжигом при 400 - 500 °С.

2.5.2. Радикальное травление (РТ)

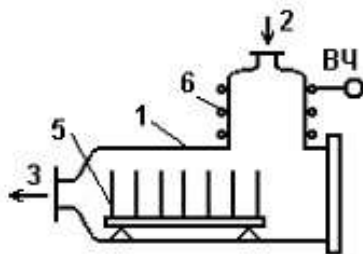
Радикальное травление представляет собой химическую реакцию взаимодействия атомов и радикалов, образующихся в условиях разряда, с материалом подложки. При этом обрабатываемый материал находится в зоне послесвечения, то есть отделен от плазмы перфорированным металлическим цилиндром, газовым промежутком или другим способом. В таких условиях практически исключено попадание на поверхность электронов и ионов и ослаблено воздействие излучения плазмы. Доставка атомов или радикалов из зоны разряда к обрабатываемой поверхности осуществляется с потоком газа или за счет диффузии. Радикальному травлению подвергаются материалы, которые образуют стабильные летучие соединения с

активными частицами и не требуют при этом активации реакции травления заряженными частицами или физического распыления их поверхности.

РТ может осуществляться в реакторах с перфорированным цилиндром (рис. 2.6, а) или в реакторах с объемным разделением плазменной и реакционной зон (рис. 2.6, б).



а



б

Рис. 2.6. Конструкции реакторов для проведения процесса РТ с перфорированным цилиндром (а) с объемным разделением плазменной и реакционной зон (б): 1 – вакуумная камера, 2 – линия подачи газа, 3 – линия откачки, 4 – перфорированный цилиндр, 5 – обрабатываемые подложки, 6 – индуктор

Различие между реакторами внутри каждого типа состоит в расположении элементов, способах загрузки подложки, входа и выхода газа. В цилиндрических реакторах с перфорированным цилиндром используется возбуждение плазмы ин-

дукционным и емкостным способами. В обоих случаях разряд является безэлектродным. При этом применяется ВЧ- или СВЧ-генераторы. Перфорированный цилиндр изготавливается из углеродистой стали, никеля или алюминия, имеет прозрачность не менее 25 % и диаметр отверстий более 3 мм (он должен быть больше длины свободного пробега частиц, чтобы не препятствовать их проникновению внутрь цилиндра). Наиболее широко применяются цилиндрические реакторы с горизонтальным расположением оси, что удобно для кассетной загрузки подложек. Имеются также установки с вертикальным расположением оси реактора, что обеспечивает удобство вращения подложкодержателя. Цилиндрические реакторы с перфорированным цилиндром широко используются в промышленности, в то время как реакторы с разделением реакционной и разрядной камер и кассетной загрузкой (рис. 2.6, б) не получили широкого распространения. Опыт их использования показал, что основной недостаток таких реакторов - большая неравномерность травления по подложке и в партии вследствие неоднородности распределения активных частиц по диаметру и длине реакционной камеры.

РТ характеризуется следующими операционными и выходными параметрами:

- давление газа $50 - 10^3$ Па (для объемных реакторов с перфорированным экраном); $10 - 10^2$ Па (для систем с удаленными источниками радикалов);
- расход газа (при нормальном давлении) $50 - 100$ см³/с;
- скорость травления $1 - 3$ нм/с;
- показатель анизотропии травления $2 - 5$;
- разрешающая способность (на пленке материала толщиной 1 мкм при разрешении в маске $0,3$ мкм) $0,7 - 1$ мкм;
- селективность травления $20 - 50$;
- равномерность травления (на пластине $\varnothing 100$ мм на неподвижном подложкодержателе) $90 - 99$ %;
- температура подложки в процессе травления (без принудительного охлаждения подложкодержателя) $100 - 200$ °С

(для объемных реакторов с перфорированным экраном); 20 – 100 °С (для систем с удаленными источниками радикалов).

Скорость РТ при одних и тех же операционных параметрах процесса (удельной мощности разряда, давления газа, скорости потока газа и др.) всегда меньше скорости ПТ из-за рекомбинации ХАЧ при доставке из зоны плазмы в реакционную зону и отсутствия стимуляции химических реакций ионной бомбардировкой и излучением плазмы.

По сравнению с плазменным травлением, РТ обладает следующими преимуществами:

1. При РТ температура обрабатываемых подложек значительно ниже, поэтому может быть получена большая селективность травления различных материалов. Так, отношение скоростей травления Si/SiO₂ в CF₄ при плазменном травлении равно 8 - 10, а при радикальном травлении возрастает до 30 - 50. Нагревание подложек, подвергаемых радикальному травлению, происходит вследствие экзотермического эффекта химической реакции и излучения плазмы. Равновесная температура в зоне реакции при радикальном травлении внутри перфорированного цилиндра обычно не превышает 150 °С, что значительно ниже температуры, которая установилась бы при отсутствии цилиндра. Это можно объяснить отсутствием внутри цилиндра рекомбинации заряженных частиц, при которой выделяется большое количество тепла, а также отсутствием ионной и электронной бомбардировки обрабатываемых подложек.

2. При некоторых режимах возможно РТ через незадубленные фоторезистивные маски. Хорошая стойкость фоторезиста при радикальном травлении позволяет использовать тонкие маски (0,1 – 0,3 мкм) и получать более высокое разрешение элементов микросхем.

3. Отсутствие ионной бомбардировки поверхности пластин исключает термические и радиационные повреждения кристаллических структур, а также и появление индуцированных зарядов на обработанной поверхности. Последнее особенно важно при производстве МДП структур.

Так как РТ обеспечивается только химической реакцией между активными частицами и атомами обрабатываемого материала, его основным недостатком является изотропность, то есть скорость травления по нормали к поверхности близка к скорости бокового подтравливания. На величину подтравливания оказывают влияние, в основном, три фактора: температура обрабатываемых подложек, площадь, подвергаемая травлению, и состав рабочего газа. Снижение температуры уменьшает подтравливание, но при этом снижается абсолютное значение скорости травления. Поэтому для повышения скорости травления в рабочий газ CF_4 добавляют O_2 . Меньшее подтравливание наблюдается при малых площадях обрабатываемого материала, при которых загрузочный эффект не проявляется и скорость травления определяется присущими материалу свойствами. Следовательно, небольшие площади обработки, например, поштучная индивидуальная обработка пластин, предпочтительнее с точки зрения получения меньшего подтравливания под маску. Снижение рабочего давления позволяет добиться анизотропного радикального травления. Так, при давлениях меньше 1 Па может быть достигнут показатель анизотропии 8 - 12 и, соответственно, минимальный размер элементов 0,3 - 0,5 мкм. Таким образом, освоение области субмикронных размеров связано с созданием систем радикального травления, работающих при давлениях меньше 1 Па.

2.6. Ионная обработка

2.6.1. Ионно-плазменное травление (ИПТ)

При ионно-плазменном травлении удаление поверхностных слоев материалов осуществляется за счет физического распыления ионами инертных газов или других ионов, химически не реагирующих с обрабатываемым материалом. При этом он находится в контакте с зоной плазмы, а необходимая энергия ионов обеспечивается подачей на материал отрицательного смещения. Для ионной очистки поверхности матери-

алов (удаления адсорбированных частиц) обычно используют ионы с энергией в диапазоне от 20 до 100 эВ, а для ионного травления (удаления слоев основного материала) - от 100 до 1000 эВ. В первом диапазоне распыление осуществляется в режиме первичного прямого выбивания, а во втором - как в режиме первичного выбивания, так и в режиме линейных каскадов.

По способу возбуждения и поддержания электрического разряда системы ИПТ подразделяются на системы с разрядами постоянного тока (ПТ), системы с самостоятельными ВЧ разрядами, а также системы на постоянном токе и высокой частоте с искусственным поддержанием разряда, где разряд поддерживается с помощью вспомогательных средств: термоэлектронной эмиссии, ВЧ и магнитных полей. Системы ИПТ можно классифицировать по числу электродов на двухэлектродные (диодные), трехэлектродные (триодные) и многоэлектродные (четыре и более электродов). Кроме того, по форме и расположению электродов системы ИПТ могут быть горизонтальными с плоскими электродами (планарные) и вертикальными с электродами в виде цилиндров и многогранных призм.

Планарная диодная ВЧ система ионно-плазменного травления приведена на рис. 2.7.

Планарная диодная ВЧ система содержит два дисковых электрода: заземленный (анод) и ВЧ электрод (или мишень), на который подается напряжение от ВЧ генератора. В диодной ВЧ системе возможность ИПТ любых материалов (металлов, полупроводников, диэлектриков, органических соединений и др.) сочетается с простотой конструкции и большой площадью ВЧ электрода, на которой обеспечивается равномерная ионная бомбардировка. К основным параметрам диодной ВЧ системы относятся давление рабочего газа p (0,5 - 5 Па), межэлектродное расстояние L (4 - 8 см), радиус ВЧ электрода (мишени) R (10 - 30 см), мощность W (1 - 4 кВт) и частота f ВЧ разряда (0,44; 1,76; 5,28; 13,56 и 27,12 МГц). Характерной особенностью систем с ВЧ разрядами является необходимость согласования ВЧ генератора с распылительной камерой, полное со-

противление (импеданс) которой может меняться в очень широких пределах в зависимости от размеров электродов, давления и состава рабочего газа, магнитного поля, а также в результате покрытия внутрикамерных конструкций пленками распыленных материалов. Поэтому в системах ИПТ с ВЧ разрядами должны быть предусмотрены устройство стабилизации рабочего давления при различных расходах рабочего газа и устройство согласования, обеспечивающее определенное значение сопротивления между ВЧ генератором и распылительной камерой, выполняющей роль нагрузки.

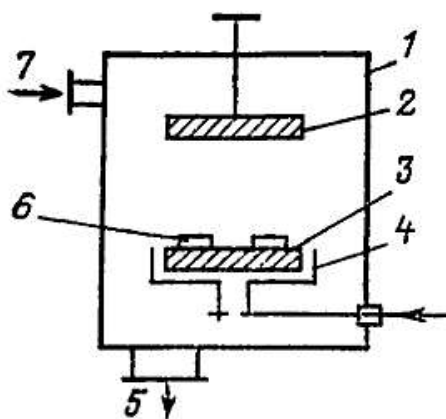


Рис. 2.7. Планарная диодная ВЧ (ПТ) система ионно-плазменного травления: 1 - камера; 2 - заземленный электрод; 3 - ВЧ (ПТ) электрод; 4 - заземленный экран; 5 - откачка; 6 - обрабатываемые пластины; 7 - напуск газа

ИПТ характеризуется следующими операционными и выходными параметрами:

- давление газа 1 - 10 Па (для диодных систем); 0,1 - 1 Па (для многоэлектродных систем);
- расход газа (при нормальном давлении) 20 – 50 см³/с;
- скорость травления 0,1 - 1 нм/с;
- показатель анизотропии травления 5 – 10;

- разрешающая способность (на пленке материала толщиной 1 мкм при разрешении в маске 0,3 мкм) 0,5 – 0,7 мкм;
- селективность травления 2 – 5;
- равномерность травления (на пластине \varnothing 100 мм на неподвижном подложкодержателе) 90 – 95 %;
- температура подложки в процессе травления (без принудительного охлаждения подложкодержателя) 200 – 400 °С.

При использовании полимерных органических масок (из фото-, электроно-, рентгено- и ионорезистов, полиимида и других) в процессах ИПТ возникают три проблемы. Первая связана с необходимостью поддерживать низкие уровни парциальных давлений химически активных остаточных газов (кислорода, водорода, паров воды) и их натекания в рабочую камеру. В противном случае резко увеличивается скорость травления органических масок. Для обеспечения стабильной и низкой скорости ионно-плазменного травления органических масок парциальные давления химически активных остаточных газов не должны превышать 10^{-4} Па. Такие же условия должны выполняться для исключения уменьшения скорости травления материалов за счет их окисления.

Вторая проблема связана с низкой термостойкостью органических масок, которая ограничивает плотность мощности на мишени (катоде) и требует эффективного охлаждения подвергаемых травлению образцов. Органические маски не выдерживают длительного воздействия температур выше 423 - 473 К. Существует критическая плотность мощности на мишень (катод), которую выдерживают стандартные фото- и электронорезисты при трех основных способах охлаждения образцов на мишени (катоде): 1) 0,05 – 0,1 Вт/см² для образцов, помещаемых на неохлаждаемую мишень, 2) 0,3 – 0,5 Вт/см² для образцов, находящихся на водоохлаждаемой мишени, и 3) 0,8 - 1 Вт/см² для образцов, прижимаемых к водоохлаждаемой мишени механически или с помощью теплопроводных паст. Для органических масок из полиимида критическое значение приблизительно в 1,8 - 2 раза выше, чем для фоторезистов. В связи с необходимостью увеличения производитель-

ности установок с индивидуальной обработкой пластин в последние годы появились эффективные системы охлаждения, работающие с помощью электростатического поджатия пластины к материалу с высокой теплопроводностью и подачи газа с высокой теплопроводностью в зазор между задней стороной пластины и подложкодержателем (мишенью). В установках с такими системами охлаждения органические маски выдерживают плотности мощности до 8 Вт/см^2 , что соответственно позволяет в 8 - 10 раз увеличить скорость травления.

Третья проблема связана с удалением остатков органических масок после ИПТ. В результате ионной бомбардировки в органических материалах возникают дополнительные поперечные связи, которые затрудняют удаление остатков маски в стандартных растворителях. Для решения этой задачи толщину маски делают больше, чем технологически необходимо, чтобы дополнительное «сшивание» не распространилось на всю толщину остатка маски к моменту окончания травления. Однако лучшее решение связано с удалением остатков маски в кислородсодержащей плазме в системах плазмо- или ионно-химического травления. Скорость ИПТ углерода в кислороде значительно выше, чем в аргоне. Это происходит за счет химических реакций углерода с атомами кислорода с образованием летучих соединений CO , CO_2 . Рост скорости травления с увеличением давления кислорода обусловлен интенсификацией этих реакций, а падение ее с увеличением давления аргона связано с возвращением на мишень части распыляемого материала за счет процессов обратного отражения и диффузии.

По своему механизму процесс ионно-плазменного травления должен обладать высокой анизотропией, однако низкая стойкость масок и селективность травления материалов, сильная зависимость скорости травления от угла падения ионов, затрудненный выход распыленного материала из глубоких канавок при используемых рабочих давлениях ограничивают показатель анизотропии в диапазоне 5 - 10.

Процессы ИПТ всегда сопровождаются образованием радиационных дефектов, которые подразделяются на дефекты

смещения, связанные со смещением атомов в решетке материала и образованием вакансий, и ионизационные дефекты, обусловленные ионизацией атомов решетки. К числу частиц, способных вызывать радиационные повреждения в обрабатываемых материалах при ионно-плазменном травлении, относятся ионы, электроны, нейтральные атомы и фотоны. Внедрение заряженных частиц в твердое тело вызывает ионизацию атомов решетки и возбуждение их электронных оболочек. В металлах с их высокой электропроводностью ионизация, вызванная облучением заряженными частицами, очень быстро (за время 10^{-16} - 10^{-19} с) нейтрализуется электронами проводимости, и этот процесс не приводит к каким-либо заметным изменениям электрофизических свойств металлических пленок. В полупроводниках под действием бомбардировки энергетическими частицами и излучения резко возрастает электропроводность. Однако этот эффект тоже не является длительным и устойчивым, и после прекращения облучения электропроводность возвращается к начальному уровню. Только в диэлектриках наблюдаются глубокие и устойчивые изменения электрофизических и химических свойств. Например, облучение пленок SiO_2 электронами с дозой около 1 Кл/см^2 или ионами с дозой примерно 10 мКл/см^2 приводит к увеличению скорости травления облученных участков в травителях на основе плавиковой кислоты в 3 - 4 раза.

Перечисленные выше ограничения привели к тому, что в настоящее время процессы ИПТ практически не используются для размерного травления материалов, но находят широкое применение для планаризации (сглаживания) и очистки их поверхностей. В то же время высокая эффективность очистки поверхности материала от различных загрязнений и адсорбированных газов, простота реализации и возможность интеграции в одной вакуумной камере с процессами и устройствами осаждения делают ионно-плазменное травление незаменимым для предварительной очистки подложек в одном вакуумном цикле перед нанесением функциональных слоев. Кроме этого, процессы ИПТ становятся конкурентоспособными и даже

предпочтительными при травлении слоев меди и никеля в печатных платах больших размеров.

2.6.2. Ионно-лучевое травление (ИЛТ)

Удаление поверхностных слоев при ионно-лучевом травлении осуществляется в результате физического распыления энергетическими ионами инертных газов или ионами, которые химически не реагируют с обрабатываемым материалом. Однако, в отличие от ионно-плазменного травления, при ИЛТ поверхность обрабатываемого материала не контактирует с плазмой, которая выполняет лишь роль источника ионов.

При распространении ионного пучка в вакууме на ИЛТ влияют длина свободного пробега ионов, объемный заряд и расходимость пучка, состав ионов в пучке.

Длина свободного пробега ионов должна превышать расстояние между источником ионов и подложкой; количественно этот параметр определяется сечениями процессов взаимодействия частиц в пучке (упругие взаимодействия с потерей энергий и импульсов, перезарядка, диссоциацию молекулярных ионов). В случае взаимодействия одноименных ионов и атомов определяющим является сечение процесса резонансной перезарядки. Это сечение слабо зависит от энергии ионов, однако из-за его изменения 100 % потери импульса и энергии происходят на 80 - 85 % длины свободного пробега.

Объемный заряд ионов вызывает расходимость пучка и существенно снижает скорость травления диэлектрических материалов. Для устранения этого эффекта используют нейтрализацию объемного заряда пучком электронов. Кроме объемного заряда расходимость пучка зависит также от конструктивных особенностей источника ионов, их энергии и плотности тока. Расходимость отрицательно сказывается на анизотропии ИЛТ, особенно при обработке неподвижных мишеней.

Процессы ИЛТ обычно реализуются с помощью автономных ионных источников, в качестве которых могут быть

использованы источники на базе ускорителей с анодным слоем и на базе ускорителей с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения. Для прецизионного травления микроструктур наиболее широкое применение нашли многопучковые ионные источники (МИИ), которые часто называют источниками Кауфмана (рис. 2.8)

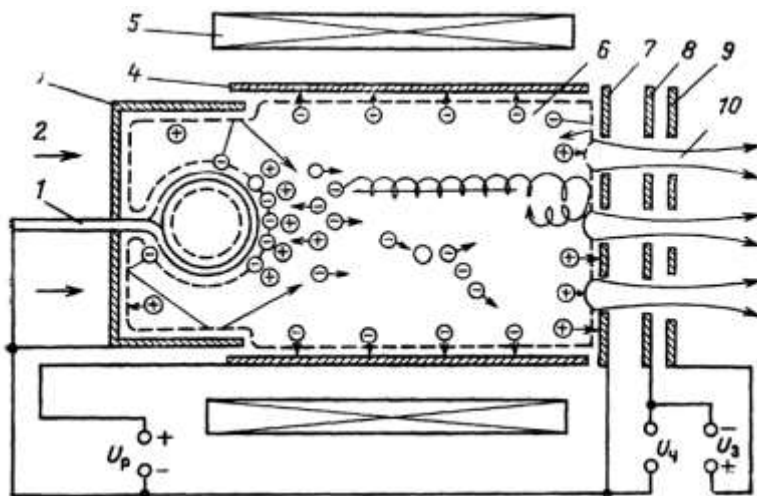


Рис. 2.8. Расположение электродов и принцип действия МИИ:

1 – термокатод; 2 – ввод рабочего газа; 3 – экран катода;

4 – цилиндрический анод; 5 – соленоид; 6 – плазма;

7 – отражательно - эмиссионный электрод; 8, 9 – ускоряющий и замедляющий электроды; 10 – ионный пучок;

U_p – напряжение разряда; U_y – ускоряющее напряжение;

U_3 – замедляющее напряжение

В МИИ эмитированные катодом первичные электроны, ускоряющиеся в области катодного падения потенциала, движутся в плазме по спиральным траекториям вдоль магнитного поля и, осциллируя в потенциальной яме между катодом и отражательно-эмиссионным электродом, ионизуют рабочий газ. Благодаря осцилляциям, время жизни электронов и вероят-

ность ионизации ими рабочего газа существенно увеличиваются, в результате чего в стационарном разряде достигается плотность плазмы около 10^{12} см^{-3} уже при давлении порядка 10^{-2} Па и напряжении до 25 В. Отражательно-эмиссионный электрод имеет отверстия, соосные с отверстиями в ускоряющем и замедляющем электродах. Таким образом, все три электрода образуют ионно-оптическую систему, с помощью которой формируется ионный пучок.

Ионно-оптическая система предназначена для одновременной экстракции ионов с границы плазмы, первичной фокусировки ионного потока большого диаметра, состоящего из множества (до 1000) ионных пучков, формирования каждого пучка в отдельности, фокусировки ионного потока в целом, а также для ускорения ионов до энергий 100 - 2000 эВ. Обычно ионно-оптическая система представляет собой блок из двух (реже трех) металлических или графитовых сеток с отверстиями одинакового диаметра, число которых определяет количество отдельных ионных пучков в потоке. На выходе ионного потока из ионно-оптической системы необходима нейтрализация его объемного заряда, наличие которого вызывает расфокусировку и плохую коллимацию ионного пучка. Для нейтрализации обычно применяют специальный инжектор электронов. При этом полной рекомбинации электронов и ионов, как правило, не происходит, а обеспечивается лишь компенсация заряда в ионном пучке. Наиболее простым методом получения нейтрализующих электронов служит использование внешних термоионных (обычно вольфрамовых) эмиттеров, погруженных непосредственно в ионный поток. Одной из существенных особенностей применения МИИ с многоапертурной ионно-оптической системой является необходимость поддерживать значительный перепад давлений между разрядной ($p \cong 10^{-1}$ Па) и рабочей ($p \cong 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-3}$ Па) камерами. Низкое давление в рабочей камере необходимо для того, чтобы снизить потери в ионном потоке и устранить возможность расфокусировки пучков. Кроме того, при этом снижается вероятность загрязнения обрабатываемых микроструктур остаточными газами.

Давление в разрядной и рабочей камерах прежде всего зависит от газового потока, подаваемого в разрядную камеру. Снижение потока вызывает уменьшение ионного тока и, как следствие, скорости травления. Кроме того, на эффективность работы ионного источника значительное влияние оказывает способ ввода газа в разрядную камеру (рис. 2.9). При подаче газа обратным потоком со стороны ионно-оптической системы (рис. 2.9, *а*) плотность плазмы максимальна на выходе разрядной камеры и убывает в направлении катода. При прямом потоке газ (со стороны катода) через одно центральное и два симметрично расположенных отверстия (рис. 2.9, *б*), наоборот, плотность плазмы максимальна в прикатодной области. Первый вариант ввода рабочего газа позволяет достичь значительной плотности ионного тока, но однородность ионного потока по сечению неудовлетворительная. Во втором варианте ионный поток более однородный, но с низкой плотностью тока. Чаще всего в технологических источниках ионов газ вводится прямым потоком с катодной стороны разрядной камеры через специальную сетку - газовый распределитель (рис. 2.9, *в*). При этом можно получить оптимальное значение ионного тока при достаточно хорошей коллимации ионного пучка.

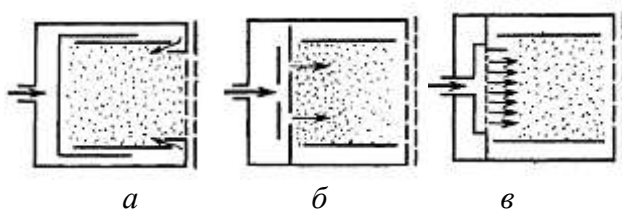


Рис. 2.9. Способы введения рабочего газа в разрядную камеру МИИ: *а* – обратный поток; *б*, *в* – прямой поток

Многopучковые ионные источники имеют ряд преимуществ перед другими ионными источниками, применяемыми в ионной технологии, поскольку они характеризуются:

- низким напряжением разряда (начиная с 20 В), что ограничивает возможность возникновения многозарядных

ионов, распыления стенок разрядной камеры, находящихся под потенциалом катода, и тем самым обеспечивает возможность получения ионного пучка с малым разбросом энергии и относительно малым (около 10^{-6}) количеством примесей;

- специфическим механизмом разряда, позволяющим создавать разрядную камеру большого диаметра, что при довольно гомогенном распределении плотности плазмы обеспечивает извлечение однородного многолучевого ионного пучка;

- низким давлением в разрядной камере (10^{-1} - 10^{-2} Па), в результате чего в пространстве действия ионного пучка, например в камере распыления, можно поддерживать высокий вакуум при относительно низкой мощности откачной системы;

- высоким коэффициентом использования рабочего газа (до 80 %) и малыми затратами энергии на получение одного иона.

Среди недостатков МИИ необходимо выделить два основных момента. Во-первых, наличие термокатода ограничивает применение источника для формирования ионных пучков в химически активных средах. Данное ограничение можно частично снять, используя плазменный катод. Во-вторых, магнитное поле, используемое в источниках, возбуждает плазменные неустойчивости, которые оказывают влияние на оптические свойства и компенсацию пространственного заряда ионного пучка. В этом плане значительный интерес представляют последние разработки, в которых эффективная ионизация рабочего газа осуществляется без использования магнитного поля. Удержание плазмы в разрядной камере и повышение эффективности ионизации в источниках этого типа достигаются за счет градиента электрического поля, который создается с помощью анодов специальной конструкции, или за счет размещения дополнительных анодов в пределах разрядной камеры.

ИЛТ характеризуется следующими операционными и выходными параметрами:

- давление газа 10^{-3} – 10^{-2} Па;

- расход газа (при нормальном давлении) 1 – 10 см³/с;

- скорость травления 0,3 - 3 нм/с;
- показатель анизотропии травления 10 – 100;
- разрешающая способность (на пленке материала толщиной 1 мкм при разрешении в маске 0,3 мкм) 0,3 – 0,5 мкм;
- селективность травления 2 – 5;
- равномерность травления (на пластине \varnothing 100 мм на неподвижном подложкодержателе) 95 – 97 %;
- температура подложки в процессе травления (без принудительного охлаждения подложкодержателя) 150 – 300 °С.

К числу достоинств ИЛТ относятся:

1. Высокое разрешение процессов, которое в настоящее время ограничено минимальными размерами элементов, получаемыми в органических резистивных масках, а не возможностями самого процесса.

2. Высокая равномерность травления.

3. Хорошая воспроизводимость всех основных параметров процесса травления от цикла к циклу.

4. Возможность управления процессом с помощью четырех легко измеряемых и контролируемых параметров (энергии, угла падения ионов, плотности ионного тока и давления), которые в используемом при ионно-лучевом травлении диапазоне давлений (10^{-3} - 10^{-2} Па) не зависят друг от друга.

5. Универсальность процесса, позволяющая проводить травление практически любого материала.

6. Возможность изменения профиля травления за счет изменения угла падения ионов.

7. Отсутствие загрузочного эффекта и влияния адсорбированных газов на характер протекания процесса травления, поскольку предварительно рабочая камера откачивается до $p < 10^{-4}$ Па.

К числу недостатков ИЛТ относятся следующие факторы и явления:

1. Низкая селективность травления материала относительно маски (особенно органической).

2. Ограничение скорости травления за счет теплового воздействия ионов на органическую маску.

3. Значительное тепловое и радиационное воздействие на обрабатываемые структуры, ограничивающее применение процесса для изготовления МДП – структур.

4. Переосаждение распыленного материала на боковых стенках структур.

5. Образование фасок в плоскостях, соответствующих углам, при которых обеспечивается максимальная скорость травления.

6. Подтравливание и уменьшение толщины слоев на боковых гранях и плоскостях вблизи стенок за счет отражения ионов.

В настоящее время ИЛТ применяется для изготовления приборов на основе пермаллоя, ортоферритов, гранатов, ниобата лития, свинца, то есть тех материалов, для которых еще не в полной мере разработаны процессы ионно-химического и плазмохимического травления.

Дальнейшее совершенствование ИЛТ(и в первую очередь с использованием автономных ионных источников) должно быть направлено на травление материалов через неорганические маски, формируемые с помощью ионно-химических и плазмохимических процессов, разработку низкоэнергетических ионных источников (300 - 500 эВ) с высокой плотностью тока (5 - 10 мА/см²), встроенных в системы для индивидуальной обработки пластин большого диаметра с охлаждением последних до температуры жидкого азота, что позволит достичь высоких плотностей тока и существенно повысит производительность процесса.

2.7. Ионно-химическое (реактивное ионное) травление

2.7.1. Реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ)

При проведении реактивного ионно-плазменного травления обрабатываемые образцы находятся в контакте с плазмой и размещаются на электроде, подключенном к источнику ВЧ напряжения. Удаление материала происходит как за счет фи-

зического распыления ускоренными ионами химически активных газов, так и в результате химических реакций между свободными атомами и радикалами, образующими в плазме, и поверхностными атомами обрабатываемого материала. При проведении РИПТ физический и химический механизмы не являются независимыми: физическое распыление активирует поверхность материала, повышая скорость химических реакций, которые, в свою очередь, ослабляют химические связи поверхностных атомов, увеличивая тем самым скорость физического распыления.

Соотношение вкладов химического и физического механизмов при РИПТ в каждом конкретном случае определяется видом рабочего газа, энергией ионов, вводимой в разряд мощностью, давлением рабочего газа, типом и геометрией реактора. В низкотемпературной плазме степень ионизации обычно не превышает десятых долей процента, тогда как степень диссоциации, определяющая концентрацию нейтральных ХАЧ, достигает нескольких десятков процентов. Поэтому в случае высокой активности ХАЧ к обрабатываемому материалу и образования летучих стабильных продуктов взаимодействия основной вклад в РИПТ вносит химический механизм. Однако при невысокой химической активности свободных атомов и радикалов к обрабатываемому материалу или при образовании нелетучих продуктов реакции основной вклад в травление материала вносит процесс физического распыления. Если энергия бомбардирующих поверхность ионов становится меньше 100 эВ, вклад физического распыления в травление материала будет несущественным (коэффициент распыления меньше 0,1 атом/ион), в этом случае травление переходит в плазменное.

Процессы РИПТ проводят в горизонтальных диодных и триодных ВЧ системах с плоскими параллельными электродами, а также в вертикальных диодных ВЧ системах с коаксиальными электродами в виде многогранной призмы и цилиндра (рис. 2.10). Во всех системах обрабатываемые пластины располагаются на электродах, к которым подводится ВЧ напряжение.

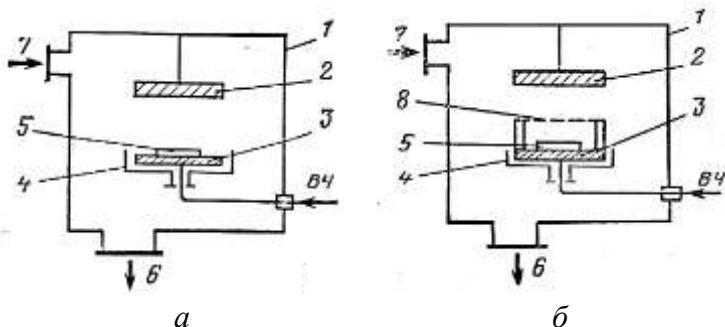


Рис. 2.10. Планарная диодная (а) и триодная (б) ВЧ системы:
 1 – рабочая камера, 2 – заземленный электрод,
 3 – ВЧ электрод, 4 – заземленный экран, 5 – обрабатываемые
 пластины, 6 – линия откачки, 7 – линия напуска газа,
 8 – триодная сетка

Ограничения планарных диодных ВЧ систем открытого (рис. 2.10, а) и полузакрытого типов, связанные с радиационными повреждениями обрабатываемой поверхности и низкой стойкостью органических масок вследствие высокоэнергетичной ионной бомбардировки, привели к созданию триодных и магнетронных систем. В триодной системе (рис. 2.10, б) вблизи электрода, на который подается ВЧ напряжение, помещена электрически изолированная от катода сетка, находящаяся под плавающим потенциалом. При этом образуется своеобразный полый катод, наличие которого в 3 - 4 раза увеличивает плотность ионов между сеткой и ВЧ электродом и, в то же время, в 4 - 5 раз снижает напряжение автосмещения на ВЧ электроде. Кроме того, малое расстояние между сеткой и ВЧ электродом (порядка 15 мм) обеспечивает устойчивое горение тлеющего разряда при напряжении автосмещения 20 В. Характерные для триодной системы высокие скорости травления в сочетании с низкими энергиями ионов позволяют значительно уменьшить радиационные дефекты.

РИПТ характеризуется следующими операционными и выходными параметрами:

- давление газа 1 – 5 Па (в диодных системах); 0,1 – 1 Па (в многоэлектродных системах);
- расход газа (при нормальном давлении) 20 – 50 см³/с;
- скорость травления 1 - 5 нм/с;
- показатель анизотропии травления 5 – 30;
- разрешающая способность (на пленке материала толщиной 1 мкм при разрешении в маске 0,3 мкм) 0,4 – 0,6 мкм;
- селективность травления 5 – 10;
- равномерность травления (на пластине \varnothing 100 мм на неподвижном подложкодержателе) 90 – 95 %;
- температура подложки в процессе травления (без принудительного охлаждения подложкодержателя) 150 – 250 °С.

Подобно ионно-плазменному и ионно-лучевому процессам, РИПТ вызывает нарушения структуры поверхностных слоев обрабатываемых материалов, загрязнение их поверхностей распыленными частицами электродов, деградацию электрофизических параметров обрабатываемых слоев и границ раздела между слоями, ухудшение рабочих параметров создаваемых приборов. Однако существенный вклад химического механизма в РИПТ значительно уменьшает вышеперечисленные опасности по сравнению с процессами чисто ионного травления. Например, если скорость удаления материала в результате химической реакции достаточно высока, то нарушенные ионной бомбардировкой слои успевают стравиться, прежде чем дефекты диффундируют из них в глубь материала. Для устранения нежелательных изменений электрофизических параметров обрабатываемых слоев, границ раздела между слоями и рабочих характеристик приборов образцы после процессов РИПТ можно подвергнуть восстанавливающему отжигу.

2.7.2. Реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ)

РИЛТ называется процесс, при котором обрабатываемый материал вынесен из зоны плазмы, находится в вакууме и под-

вергается действию пучка ускоренных ионов химически активного газа. В процессах перезарядки, диссоциации и нейтрализации в пучке и на поверхности обрабатываемого материала эти ионы могут образовывать нейтральные ХАЧ и производить химическое травление. Таким образом, по сравнению с ИЛТ, РИЛТ использует как физическое, так и химическое взаимодействие ионов с поверхностью, что позволяет достигать более высоких скоростей процесса.

Процессы РИЛТ обычно реализуются в системах с автономными ионными источниками, которые можно разделить на три большие группы:

1) электростатические источники ионов, в которых ионный пучок формируется с помощью электростатической ионно-оптической системы. На выходе из нее осуществляется компенсация объемного заряда ионного пучка при инжекции в него электронов из термокатода;

2) плазменные ускорители, которые сразу создают пучок ионов с компенсированным объемным зарядом;

3) многопучковые ионные источники с наложением магнитного поля (источники Кауфмана).

Наличие химической составляющей в механизме РИЛТ приводит к тому, что, кроме энергетических характеристик ионного пучка, скорость процесса становится чувствительной и к составу пучка - этот параметр определяет качественный и количественный состав образующихся нейтральных ХАЧ. Достоинством источников Кауфмана является возможность регулирования состава ионного пучка в достаточно широких пределах при изменении величины индукции магнитного поля. Еще одной важной характеристикой механизма РИЛТ является соотношение вкладов химического и физического взаимодействия. Для ответа на этот вопрос достаточно сравнить выход травления Y_b (фактическое количество атомов обрабатываемого материала, удаляемых на один падающий ион) и коэффициент распыления материала при данной энергии ионов Y_p . При $Y_b \cong Y_p$ можно говорить о том, что вклад химического взаимодействия невелик, а основной вклад вносит физическое распы-

ление материала. Напротив, при $Y_v > Y_p$ химическое взаимодействие является доминирующим. Максимально возможный вклад химических реакций в процесс РИЛТ реализуется при энергиях ионов меньше 200 эВ. Это объясняется созданием при определенной критической энергии ионов максимально возможного числа активных центров на обрабатываемой поверхности, на которых протекает взаимодействие ХАЧ.

Основными параметрами, определяющими скорость РИЛТ, количественно являются: плотность пучка, угол падения пучка на подложку, масса и энергия бомбардирующих частиц и степень их химической активности по отношению к обрабатываемому материалу (тип рабочего газа и его давление), степень легирования материала и тип легирующей примеси.

РИЛТ характеризуется следующими операционными и выходными параметрами:

- давление газа $10^{-2} - 0,5$ Па;
- расход газа (при нормальном давлении) $1 - 20$ см³/с;
- скорость травления $0,3 - 3$ нм/с;
- показатель анизотропии травления $10 - 100$;
- разрешающая способность (на пленке материала толщиной 1 мкм при разрешении в маске $0,3$ мкм) $0,3 - 0,5$ мкм;
- селективность травления $5 - 10$;
- равномерность травления (на пластине $\varnothing 100$ мм на неподвижном подложкодержателе) $95 - 97$ %;
- температура подложки в процессе травления (без принудительного охлаждения подложкодержателя) $100 - 200$ °С.

Процесс РИЛТ более точно воспроизводит профиль элементов субмикронных размеров, чем процесс ИЛТ. Кроме того, при РИЛТ значительно уменьшены эффекты переосаждения материала, которые также приводят к искажению профилей травления элементов при ионно-лучевом травлении, особенно в случае субмикронных размеров.

Высокий показатель анизотропии травления РИЛТ ($L = 10 - 100$) позволяет получать в слоях рабочих материалов элементы субмикронных размеров, вплоть до $0,1$ мкм. Из вакуумно-плазменных процессов травления только процессы ионно-

лучевого травления обладают такой же разрешающей способностью. Однако процессы реактивного ионно-лучевого травления имеют по сравнению с ИЛТ следующие преимущества:

1. Более низкие энергии ионов (0,1 – 0,5 кэВ вместо 0,5 - 2,0 кэВ) позволяют проводить травление любых материалов через органические резистивные маски, тогда как в процессах ИЛТ часто необходимо использовать дополнительные неорганические маски. Кроме того, при РИЛТ уменьшаются радиационные повреждения поверхностных слоев обрабатываемых материалов.

2. Более высокая селективность травления материалов (5 - 10 вместо 2 - 5) позволяет проводить травление пленок материалов на тонких подслоях без повреждения последних.

3. Уменьшение эффектов переосаждения удаляемого материала и благоприятная угловая зависимость скорости травления позволяет более воспроизводимо получать как профили, так и линейные размеры элементов субмикронных размеров.

Энергетическая ионная бомбардировка обрабатываемой поверхности при РИЛТ может изменять электрофизические параметры МДП - структур. Однако травление со снижением мощности разряда в ионном источнике в конце цикла травления позволяет избавиться от этого недостатка. Поверхность обрабатываемого материала при РИЛТ может загрязняться материалами элементов ионного источника, подложкодержателя и нелетучими компонентами рабочего газа. Однако правильным выбором состава рабочего газа и материалов элементов источника и подложкодержателя можно полностью или частично решить и эту проблему. Таким образом, в настоящее время процессы РИЛТ являются наиболее перспективными для изготовления ИМС с элементами субмикронных размеров.

2.8. Радиационно-стимулированное травление (РСТ)

При проведении процессов травления в условиях неравновесной низкотемпературной газоразрядной плазмы (ННГП) процессы взаимодействия ХАЧ с поверхностью стимулируют-

ся потоками ионов, электронов и излучением плазмы. Однако столь широкий спектр одновременного воздействия различных стимулирующих факторов не дает возможности выделить вклад каждого из них в процесс травления и независимо управлять его параметрами.

Невозможность точного выделения стимулирующего воздействия плазмы, а также независимого управления его параметрами без изменения параметров других воздействий и потоков частиц приводят:

- к значительному усложнению конструкции оборудования для реализации процессов травления за счет обеспечения высокой точности и стабильности поддержания операционных параметров;

- к необходимости контролировать момент окончания травления слоев;

- к большому разбросу геометрических и электрофизических параметров обрабатываемых структур, особенно при групповых способах обработки;

- к ограничению функциональных возможностей процессов травления по скорости, селективности, разрешению и однородности обработки.

Поэтому в последние годы все больший интерес исследователей, технологов и разработчиков оборудования привлекают процессы радиационно-стимулированного травления (рис. 2.11). При РСТ поток стимулирующего воздействия и поток частиц, производящих травление, генерируются и подаются к обрабатываемой поверхности независимо друг от друга. В качестве ХАЧ, обеспечивающих травление, могут использоваться как молекулы газов, так и свободные атомы и / или радикалы. В первом случае травление называется радиационно-стимулированным газовым, во втором - радиационно-стимулированным радикальным. В качестве стимулирующего воздействия применяются потоки ионов (ионно-стимулированное травление), электронов (электронно-стимулированное травление) и излучений (фотонно-стимулированное травление). Фотонно-стимулированное трав-

ление в зависимости от вида излучения подразделяется на процессы, стимулированные инфракрасным излучением, излучением в видимой области спектра, ультрафиолетовым и рентгеновским излучением, а в зависимости от источника излучения - на лазерное, ламповое и синхротронное.



Рис. 2.11. Классификация процессов радиационно-стимулированного травления

При анализе механизмов газового и радикального РСТ следует различать два случая: когда молекулы газа или радикалы могут спонтанно (самопроизвольно) травить материал без радиационного воздействия и когда спонтанное травление материала невозможно. В первом случае роль радиационного воздействия заключается в повышении скорости (стимулировании) спонтанного травления, а во втором параметры радиационного воздействия (вид, энергия и интенсивность) непосредственно определяют скорость травления материала. Модель РСТ материала включает следующие основные стадии:

1. Генерация химически активных частиц из молекул рабочего газа при радиационно-стимулированном газовом травлении. Эта стадия может быть стимулирована радиационным воздействием, через диссоциацию молекул при поглощении квантов стимулирующего излучения.

2. Доставка ХАЧ к поверхности обрабатываемого материала с помощью диффузии и газового потока. Интенсифицировать эту стадию может только мощное лазерное излучение, сфокусированное в плоскости на малом (около 1 мм) расстоянии от поверхности обрабатываемого материала и ускоряющее процессы переноса за счет нагрева газовой среды.

3. Адсорбция газовых молекул и химически активных частиц на поверхности обрабатываемого материала. Поскольку адсорбция химически активных частиц протекает с выделением энергии, то, очевидно, радиационное воздействие не может интенсифицировать эту стадию. При воздействии излучения возможны процессы диссоциации адсорбированных молекул и радикалов и их десорбции. Вероятность осуществления процессов диссоциации и десорбции зависит от конкретного вида молекул, радикалов, радиационного воздействия и его параметров.

4. Образование продуктов реакции.

5. Рекомбинация химически активных частиц на поверхности материала.

6. Удаление с поверхности материала продуктов реакции и адсорбированных частиц. Продукты реакции могут удаляться с помощью как обычной, так и радиационно-стимулированной десорбции. При использовании в качестве радиационного воздействия ионов с энергией больше 50 эВ необходимо учитывать процесс удаления поверхностных атомов материала за счет физического распыления.

Безусловно, рассмотренные стадии не охватывают всего многообразия явлений, происходящих при радиационно-стимулированном травлении материалов, но наиболее существенны и типичны.

2.8.1. Фотонно-стимулированное травление

Фотонно-стимулированное травление и очистка материалов связана с воздействием излучения: 1) на газовую фазу с генерацией радикалов или возбуждением газовых молекул; 2)

на адсорбированный слой с генерацией в нем радикалов и стимуляцией процессов десорбции и испарения; 3) на материал с возбуждением его электронов, решетки и нагреванием локальных областей. Преобладание теплового механизма травления материалов характерно для излучений в инфракрасной и видимой областях спектра с плотностью мощности больше 10^9 Вт/см². Для излучения малой плотности мощности (менее 10^7 Вт/см²) в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра характерен диффузионно-рекомбинационный механизм травления.

Варианты конструкций систем фотонно-стимулированного травления разнообразны (рис. 2.12).

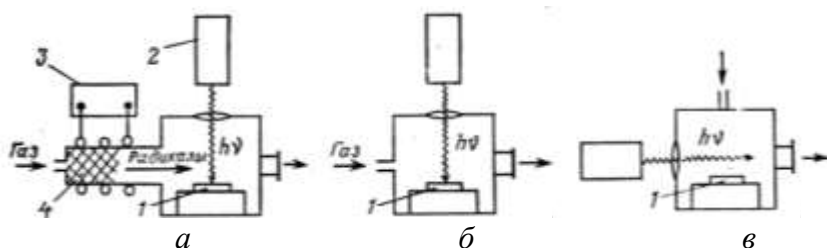


Рис. 2.12. Системы фотонно-стимулированного радикального (а) и газового (б, в) травления: 1 - обрабатываемый материал, 2 - источник излучения, 3 - генератор плазмы, 4 - зона плазмы

Излучение может быть направлено как перпендикулярно, так и параллельно поверхности материала. В первом случае воздействие осуществляется на обрабатываемый материал и газовую фазу одновременно, во втором - только на газовую фазу. Кроме того, в каждом случае излучение может быть сфокусировано с помощью линз.

Скорость фотонно-стимулированного травления в том случае, когда излучение падает перпендикулярно поверхности обрабатываемого материала, всегда выше, чем при воздействии излучения только на газовую фазу (падение параллельно поверхности), и может быть в десятки раз больше скоростей

плазмохимического травления. При фотонно-стимулированном травлении достигается высокая селективность травления материалов, не уступающая, а во многих случаях даже превосходящая селективность плазмохимического травления. Анизотропия фотонно-стимулированного травления материалов, определяющая пространственное разрешение, зависит от лимитирующей стадии процесса. Если лимитирующей является стадия химической реакции или удаления с поверхности нелетучих частиц, то разрешение зависит от зоны «расплывания» лазерного луча на поверхности. При преобладании теплового механизма стимуляции разрешение примерно в 3 раза больше диаметра лазерного пучка и может составлять 1,5 - 5 мкм для сфокусированных пучков. При нетермическом механизме удаления нелетучих частиц разрешение определяется размером пучка и может быть меньше 1 мкм. Если же лимитирующей является стадия генерации химически активных частиц в газовой фазе, то при травлении чаще всего получают изотропные профили.

Равномерность фотонно-стимулированного травления зависит от распределения интенсивности излучения по диаметру пластины и может составлять больше 95 % при диаметре 100 мм для ламп и источников рентгеновского излучения. При использовании сфокусированных лазерных лучей обработку проводят в сканирующем режиме, производительность которого весьма низка для внедрения в промышленное производство. Однако создание и освоение мощных эксимерных лазеров, позволяющих целиком обрабатывать пластину большого диаметра, несомненно, будет способствовать широкому внедрению фотонно-стимулированных процессов. Большими достоинствами этих процессов являются:

- возможность одновременного экспонирования и проявления органических масок;
- уменьшение числа загрязнений и дефектов по сравнению с плазменным и ионно-плазменным травлением;
- достижение высоких скоростей удаления материалов, не образующих летучих соединений;

- повышение скорости травления материалов в процессах плазмохимического и реакционного ионного травления.

2.8.2. Электронно-стимулированное травление

Конструкции систем электронно-стимулированного травления приведены на рис. 2.13.

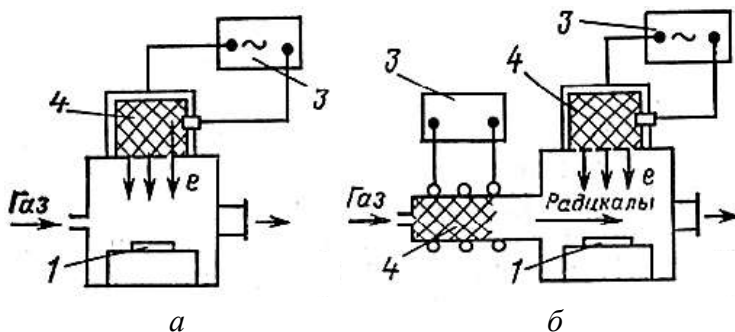


Рис. 2.13. Системы электронно-стимулированного газового (а) и радикального (б) травления: 1 - обрабатываемый материал, 2 - источник излучения, 3 - генератор плазмы, 4 - зона плазмы

Процессы электронно-стимулированного травления характеризуются сравнительно малыми скоростями, поскольку электронный поток вызывает преимущественно десорбцию частиц с поверхности и применяется только для очистки их поверхностей. При радикальном травлении скорость процесса при электронной стимуляции значительно возрастает, что связано с эффективной очисткой активных центров.

Показатель анизотропии увеличивается при электронной стимуляции процесса и может возрастать в несколько раз. В процессе электронно-стимулированного радикального травления материалов можно эффективно и в широких пределах управлять селективностью травления одного материала относительно другого. Равномерность процесса зависит от распределения, как потока радикалов, так и потока электронов по поверхности пластины, и можно легко достичь уровня, необхо-

димого для промышленного производства. Электроны при энергиях 50 - 200 эВ, используемых в процессах электронно-стимулированного травления, не могут вносить дефекты в обрабатываемые материалы и нагревать образцы до высоких (больше 120 °С) температур. Основным видом загрязнений поверхности после травления могут быть только полимерные пленки, которые легко удаляются в присутствии кислорода.

2.8.3. Ионно-стимулированное травление

В настоящее время в технологии микроэлектроники ионно-стимулированное травление используется наиболее интенсивно. Механизм ионно-стимулированного газового травления материалов при различных комбинациях системы ион - газ аналогичен механизмам РИЛТ. В процессе ионно-стимулированного газового травления в ионный источник подается инертный газ, из атомов которого формируется пучок ускоренных ионов, направляемый на поверхность обрабатываемого материала. Одновременно к поверхности материала подается химически активный (рабочий) газ. Соотношение между плотностью потока рабочего газа и плотностью тока пучка ионов инертного газа составляет обычно больше, чем 50 : 1. Это приводит к тому, что давление рабочего газа около обрабатываемой поверхности на один - два порядка больше, чем давление инертного газа в источнике. Таким образом, значительно (в 5 - 10 раз) увеличивается скорость травления за счет вклада химической составляющей. Одновременно повышается селективность травления материалов.

Конструкции систем ионно-стимулированного травления приведены на рис. 2.14.

В качестве рабочих газов при ионно-стимулированном газовом травлении могут использоваться газы и соединения, которые спонтанно могут травить обрабатываемый материал без ионной бомбардировки, а также газы, которые производят травление только в присутствии ионной бомбардировки. Очевидно, что в случае ионно-стимулированного газового травле-

ния скорость травления материала при установившейся температуре его поверхности будет зависеть от вида, энергии и плотности тока ионов, вида и потока химически активного газа. Равномерность травления определяется распределением плотности ионного тока и плотности потока химически активного газа по поверхности материала, а анизотропия травления зависит от угла падения на поверхность ионов и молекул химически активного газа.

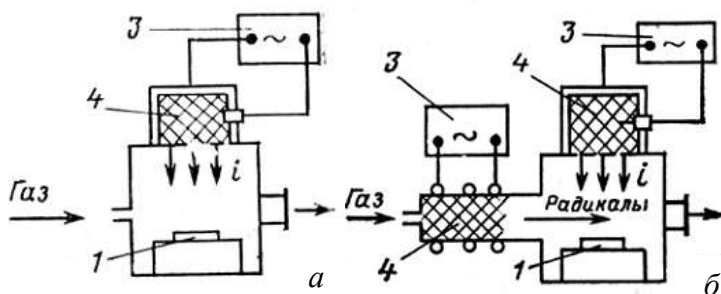


Рис. 2.14. Системы ионно-стимулированного газового (а) и радикального (б) травления: 1 - обрабатываемый материал, 2 - источник излучения, 3 - генератор плазмы, 4 - зона плазмы

Селективности травления материалов в процессе ионно-стимулированного газового травления значительно выше, чем при ионно-лучевом травлении, и достигают 5 - 20.

В процессе ионно-стимулированного газового травления можно управлять анизотропией травления и формой профиля получаемых элементов, варьируя угол падения на поверхность материала потоков ионов и химически активного газа. Выбором соответствующих комбинаций материал - ион - химически активный газ можно достичь очень больших значений показателя анизотропии (около 100) и получить высокое разрешение (0,02 мкм). Ионно-стимулированное газовое травление позволяет получать структуры субмикронных размеров с самым большим отношением глубины травления к ширине элемента (например, для *GaAs* - от 35 до 50).

К сожалению, обеспечение равномерности ионно-стимулированного газового травления на больших площадях представляет собой сложную техническую задачу из-за перераспределения плотности молекул химически активного газа после выхода из сопла коллектора. Для лучших систем ионно-стимулированного газового травления высокая равномерность травления (95 %) получена на площади диаметром не более 2 см. В настоящее время малая площадь обработки, на которой обеспечивается высокая равномерность травления, является основным сдерживающим фактором на пути внедрения ионно-стимулированного газового травления в промышленное производство микросхем.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

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.

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.

3.1. Физические принципы создания лазерного излучения

Атом или молекула - есть квантовые системы, т. е. элементы микромира, подчиняющиеся законам квантовой электроники, которые характеризуются величиной внутренней энергии.

Важнейшим свойством квантовой системы является то, что внутренняя энергия системы может принимать только определенные дискретные значения. Каждому из этих разрешённых энергетических состояний соответствуют дискретные орбиты движения электронов, ядер или молекулы в целом.

Взаимодействие излучения (т. е. электромагнитного поля) с веществом основано на скачкообразном переходе квантовой системы (атомов или молекул вещества) с одного уровня энергии на другой, причём при поглощении кванта излучения система переходит вверх (накапливает энергию), а при переходе вниз (релаксация) - система отдаёт энергию в виде кванта, равную разности энергетических состояний.

Существует три возможных процесса взаимодействия квантовых систем и электромагнитного излучения, которые схематически показаны на рис. 3.1.

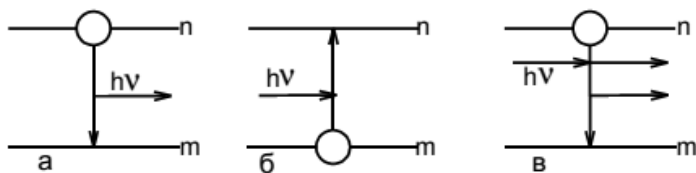


Рис. 3.1. Квантовые переходы при взаимодействии с фотоном:
 а - спонтанный переход с испусканием фотона;
 б - вынужденный переход с поглощением фотона;
 в - вынужденный переход с испусканием фотона

В связи с этим в веществе могут протекать такие процессы взаимодействия, как **поглощение, люминесценция, вынужденное излучение**.

Поглощение - уменьшение амплитуды бегущих волн при прохождении через вещество (среду), обусловленное превращением энергии волны в различные формы внутренней энергии вторичного излучения с иным, чем у первоначальной волны, спектральным составом.

При обычных температурах большинство атомов находится в основном состоянии. Эта ситуация нарушается в результате воздействия на систему фотона с энергией, равной $h\nu_{mn}$. Атом в состоянии E_m поглощает фотон и переходит в возбужденное состояние E_n . Это и составляет процесс **поглощения излучения** (рис. 3.1, б). Возбужденное состояние является нестабильным и через короткий промежуток времени без какого-либо внешнего воздействия атом переходит в основное состояние, испуская фотон с энергией $h\nu_{mn}$. Этот процесс называется **спонтанной эмиссией** (рис. 3.1, а). 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. Спонтанный, самопроизвольный переход возбужденного атома с верхнего уровня энергии на нижний называется **люминесценцией** (рис. 3.1, в).

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**.

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. В результате генерируются два кванта с одинаковой частотой, распространяющиеся в одном направлении, т.е. неотличимые друг от друга.

Индукцированное (вынужденное или стимулированное) излучение - это переход электрона с высокого на низший энергетический уровень под воздействием внешнего электромагнитного поля, сопровождающийся излучением кванта энергии.

Итак, для работы лазера необходимо преобладание вынужденной излучательной рекомбинации над поглощением квантов света. Преобладание излучения над поглощением или поглощения над излучением зависит от соотношения в кристалле полупроводника возбужденных и невозбужденных атомов, то есть от населенности энергетических уровней полупроводника. Под **населенностью уровня энергии** понимают число атомов в единице объема, имеющих одинаковое энергетическое состояние. В равновесных условиях на более высоких энергетических уровнях при любой температуре полупроводника число электронов меньше, чем на более низких энергетических уровнях. При этом нельзя получить усиления света в результате вынужденной рекомбинации. Для преобладания вынужденной рекомбинации над поглощением квантов света необходимо, чтобы верхние энергетические уровни были больше заполнены электронами, чем нижние. Состояние полупроводника, в котором число электронов на одном из энергетических уровней с большей энергией больше числа электронов на уровне с меньшей энергией, называют **состоянием с инверсной населенностью**.

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.

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, обращенных друг к другу отражающими поверхностями. Для вывода из резонатора

полезного излучения отражающие поверхности делаются либо частично отражающими, либо одна полностью, а другая частично отражающей.

3.2. Устройство и принципы работы лазеров

Общая схема оптического квантового генератора (лазера) приведена на рис. 3.2. 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 возбужденных 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.

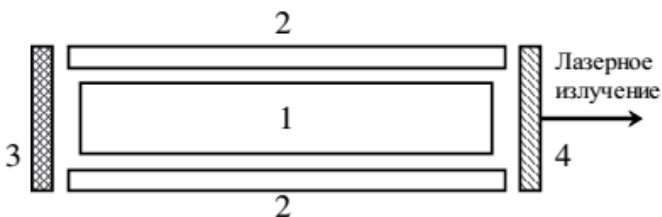


Рис. 3.2. Принципиальная схема лазера: 1 - активный элемент; 2 - устройство накачки; 3 - зеркало со стопроцентным отражением; 4 - полупрозрачное зеркало

3.2.1. Рабочее вещество

Активная среда лазера может быть различна по агрегатному состоянию. Именно по этому признаку различают следующие разновидности лазеров - оптических квантовых генераторов:

- твердотельные с кристаллическим и стеклянным активным элементом;
- полупроводниковые (в частности на арсениде галлия, антимониде индия и т. д.);
- жидкостные на кристаллах и неорганических растворах;
- газовые лазеры, которые по типу возбуждаемой квантовой системы делятся на атомные, ионные и молекулярные. Последние из них имеют разновидности: газостатические, газодинамические и непрерывные.

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.

В технологии, т.е. для целей обработки материалов, нашли применение импульсные твердотельные и непрерывные газовые лазеры, поскольку они могут создать необходимую плотность мощности на поверхности материала для реализации фазовых изменений структуры материала.

3.2.2. Создание инверсии

Возбуждение активного вещества или накачка может осуществляться несколькими методами.

1. Оптическая накачка. 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-иодные, криптоновые и ртутные капиллярные лампы высокого давления, обычные лампы накаливания, лазеры. Это достаточно универсальный и широко используемый метод накачки твердотельных и жидкостных лазеров, иногда он применяется и для накачки полупроводниковых и газовых лазеров.

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 *p-n*-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.

3.2.3. Условия самовозбуждения и насыщения усиления

Условием возникновения вынужденного излучения является наличие инверсной населенности. Энергия или мощность накачки, при которой достигается пороговая инверсия для генерации, называется *пороговой энергией* или

мощностью генерации. 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.

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.

3.2.4. 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.

Оптический резонатор представляет собой пару отражающих элементов, обращенных друг к другу. В качестве отражающих элементов используют плоские зеркала (рис. 3.3, а), сферические или параболические зеркала (рис. 3.3, б), призмы полного внутреннего отражения (рис. 3.3, в) или комбинацию этих элементов (рис. 3.3, г).

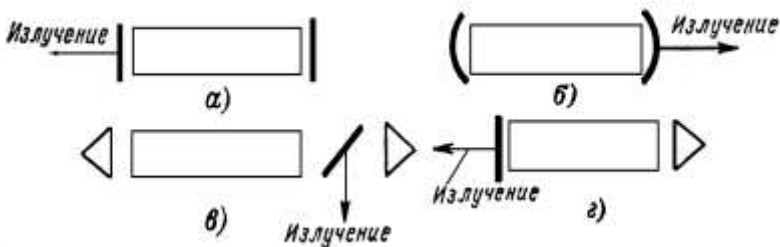


Рис. 3.3. Оптические резонаторы

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.

Условия резонанса в оптическом резонаторе в общих чертах ничем не отличаются от подобных условий в других резонансных системах. Стоячая волна образуется в резонаторе при условии, что на его длине L укладывается целое число полуволен. Таким образом, резонансные длины волн равны

$$\lambda_n = 2L/n, \quad (3.1)$$

где $n = 1, 2, 3$.

Для получения резонанса необходимо, чтобы расстояние L между отражающими элементами было равно целому числу длины волны генерируемого излучения. Следовательно, для резонансных частот можно записать

$$\nu_n = (c \cdot n)/2L, \quad (3.2)$$

где c - скорость света.

Расстояние между соседними резонансными частотами равно:

$$\Delta\nu = c/2L. \quad (3.3)$$

Оптический резонатор обладает собственными потерями за счет дифракции света, неидеального отражения зеркал и др. Поэтому его полоса имеет конечную ширину $\Delta\nu_p$ (рис. 3.4). Ее величина равна:

$$\Delta\nu_p = \nu Q, \quad (3.4)$$

где ν - резонансная частота;

Q – добротность резонатора. $Q = (2\pi L)/\beta\lambda$, где β - коэффициент суммарных потерь в резонаторе.

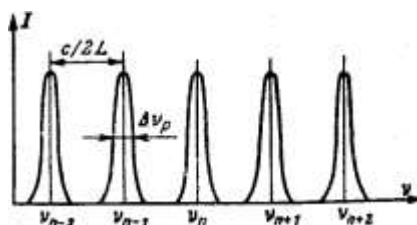


Рис. 3.4. Резонансные частоты оптического резонатора

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_{∞} .

Для вывода излучения наружу одно из зеркал резонатора делается полупрозрачным.

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. 3.5). Преимущество сферических зеркал перед плоскими заключается в том, что требуется значительно меньшая точность их юстировки.

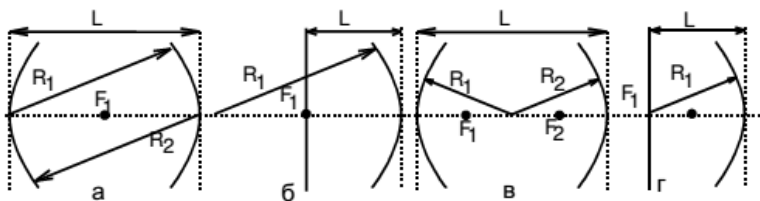


Рис. 3.5. Схемы различных типов резонаторов со сферическими зеркалами *а* - конфокальный ($R_1 = R_2 = L$); *б* - полуконфокальный ($R_1 = 2L, R_2 = \infty$); *в* - концентрический ($R_1 = R_2 = L/2$); *г* - полуконцентрический ($R_1 = L, R_2 = \infty$)

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.

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.

3.2.5. Импульсная генерация, модуляция добротности и синхронизация мод

В нестационарном режиме работы лазеров уровень инверсии и выходная мощность представляют собой определенную последовательность импульсов. На рис. 3.6. 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.

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 пиков, интенсивность которых во

времени не затухает и меняется хаотично (рис. 3.6, *a*). 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.

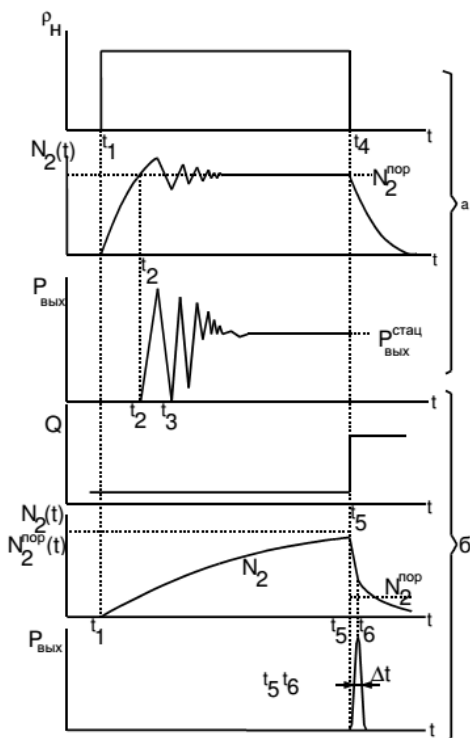


Рис. 3.6. Временная диаграмма развития лазерного импульса при прямоугольном импульсе накачки: *a* - режим свободной генерации; *b* - режим модуляции добротности

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. 3.6, б). 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 $P_{\text{макс}}$ 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 твердотельных лазеров, однако невозможно для типичных газовых лазеров. Так в газоразрядных лазерах можно получить импульсы длительностью порядка 1 нс, а в твердотельных порядка 1 пс и менее.

В режиме синхронизации мод можно получать большие пиковые мощности, ибо пиковая мощность увеличивается пропорционально числу синхронизованных мод, которое в твердотельных 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 1 пс.

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.

3.3. Свойства лазерного излучения

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 монохроматич-

ности. В случае спектральной линии степень монохроматичности μ равна:

$$\mu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (3.5)$$

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).

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).

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).

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.

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.

Яркость и мощность излучения. Яркость B определяется как мощность на единицу площади и на единицу телесного угла. Для луча круглого сечения радиусом R , расходимостью θ и полной мощностью P имеем:

$$B = \frac{P}{\pi R^2 \theta^2}. \quad (3.6)$$

Спектральная яркость $B_\nu = B/\Delta\nu$, 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.

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).

3.4. 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.

3.4.1. 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.

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*-АИГ и лазеры на неодимовом стекле.

Рубиновый лазер. Энергетическая диаграмма рубина представлена на рис. 3.7. Рубин представляет собой кристалл оксида алюминия Al_2O_3 (корунд – диэлектрик с широкой запрещенной зоной), в который при выращивании введен в виде примеси оксид хрома Cr_2O_3 . Ионы Cr^{3+} замещают в кристаллической структуре корунда ионы Al^{3+} окруженные шестью ионами O^{2-} . Вследствие этого в кристалле возникают две полосы поглощения: одна - в зеленой, другая - в голубой части спектра. Густота красного цвета рубина зависит от концентрации ионов Cr^{+3} , чем больше концентрация, тем гуще красный цвет. В темно-красном рубине концентрация ионов Cr^{+3} достигает 1 %. Создание инверсной населенности в рубине происходит по трехуровневой схеме с использованием метода оптической накачки.

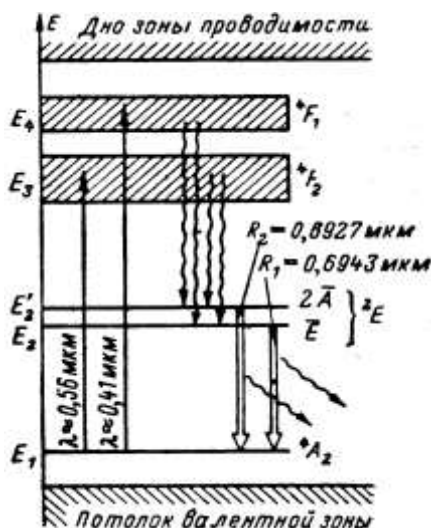


Рис. 3.7. Энергетическая диаграмма рубина

Энергетический уровень E_1 – основное состояние иона хрома в рубине. Помимо основного имеется два нижних уровня возбуждения E_2 и E_2' , разделенных малым энергетическим интервалом (порядка 10^{-4} эВ). Эти уровни характеризуются большим временем жизни носителей (порядка 10^{-3} с).

Более высокие уровни энергии E_3 и E_4 образуют широкие энергетические полосы (порядка 10 эВ). Время жизни частиц в этих энергетических состояниях весьма мало (порядка 10^{-8} с).

При облучении кристалла рубина светом ксеноновой лампы наблюдается интенсивное поглощение в диапазоне волн $\lambda \approx 0,41 - 0,56$ мкм и заселяются энергетические полосы E_3 и E_4 . Эти состояния не долговечны, и в результате безызлучательных переходов частицы быстро переходят в состояния E_2 и E_2' , рассеивая свою энергию на тепловых колебаниях кристаллической решетки. Вероятность переходов $E_3 \rightarrow E_1$ и $E_4 \rightarrow E_1$ очень мала.

Вследствие достаточно большого времени жизни на уровне E_2 его населенность увеличивается и при интенсивных

переходах $E_1 \rightarrow E_3$ и $E_1 \rightarrow E_4$ на переходе $E_2 \rightarrow E_1$ создается инверсная населенность частиц.

Индукцированное излучение возникает на одной из двух линий R_1 или R_2 , соответствующих переходам $E_2 \rightarrow E_1$ и $E_2' \rightarrow E_1$.

Обычно рубиновый лазер генерирует на линии R_1 , для которой легче реализуются пороговые условия. Время релаксации частиц между уровнями E_2 и E_2' равно 10^{-7} с. Поэтому при возникновении генерации на линии R_1 распределение частиц на уровнях E_2 и E_2' быстро переходят в состояние термодинамического равновесия ($N_2 > N_2'$) и пороговое соотношение для генерации на линии R_2 не выполняются.

На рис. 3.8 схематически представлено устройство рубинового лазера.

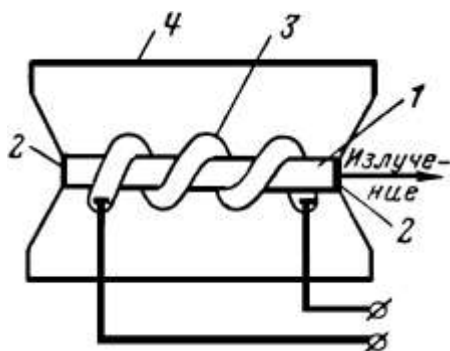


Рис. 3.8. Устройство рубинового лазера: 1 – рубин; 2 – зеркала; 3 – ксеноновая лампа; 4 – отражатель

Рабочим веществом является рубин. Активный элемент лазера изготавливают в виде стержня круглого или квадратного сечения, с поперечным размером от 1 – 2 мм до 2 – 3 см. Длина стержня может быть различной, примерно 2 – 60 см. Торцы стержня используются, как правило, в качестве основы для изготовления зеркал, образующих оптический резонатор. Поэтому их плоскости должны быть строго параллельны. По-

верхности торцевых плоскостей шлифуются и полируются, затем на них наносятся зеркала.

Кристалл рубина в виде стержня с параллельными зеркально отражающими торцевыми плоскостями охвачен газоразрядной лампой с ксеноновым наполнением. Все устройство помещено в кожух с хорошо отражающей внутренней поверхностью.

При подаче импульса высокого напряжения на ксеноновую лампу в ней возникает электрический разряд. Спектр излучения лампы достаточно широкий. Часть этого излучения, отражаемого внутренней поверхностью кожуха, интенсивно поглощается рубином в зеленой и фиолетовой областях спектра. За счет этого поглощения ионы хрома переходят на более высокие энергетические уровни, таким образом, в кристалле создается инверсная населенность. Как только число активных частиц на верхнем уровне превысит пороговую величину, возникает генерация излучения.

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 преиму-

щественно 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 (АИГ). Лазеры на алюмоиттриевом гранате с примесью неодима $Y_3Al_5O_{12} : Nd^{3+}$ – твердотельные лазеры. Неодим замещает в решетке примерно 1 % атомов иттрия и может излучать на длине волны 1,06 мкм (инфракрасный цвет) Для возбуждения могут использоваться как газоразрядные источники, так и светодиоды типа *GaAlAs*. АИГ - лазеры работают как в непрерывном, так и в импульсном режиме с большой частотой повторения со средней мощностью до нескольких сотен ватт. Они отличаются 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 ($Y_3Al_5O_{12}$), а не аморфной (стекло). Активирование алюмоиттриевого 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.

3.4.2. 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 заселённости 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.

Примерная конструкция газового лазера приведена на рис. 3.9. 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.

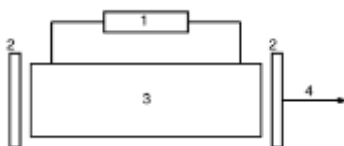


Рис. 3.9. Принципиальная схема газоразрядного лазера:
1 - источник питания разряда; 2 - оптический резонатор;
3 - активный элемент; 4 - лазерное излучение

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

Атомные лазеры. Гелий-неоновый лазер. В основе работы гелий-неонового ($He - Ne$) лазера лежит явление излучения энергии при переходе из одного энергетического состояния атомов газа в другое. Энергетические диаграммы гелия и неона представлены на рис. 3.10.

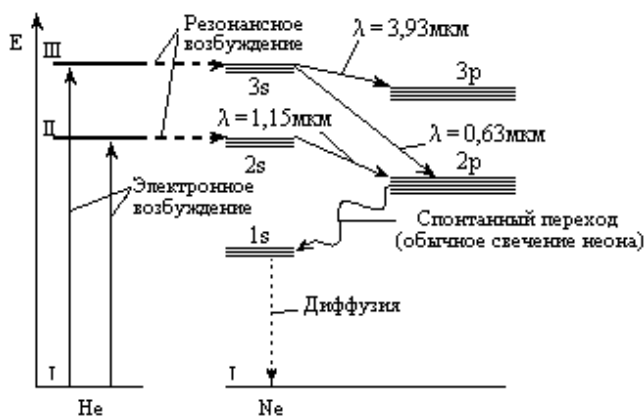


Рис. 3.10. Энергетические диаграммы гелия и неона

Основное невозбужденное состояние атомов гелия и неона соответствует нижнему энергетическому уровню на диаграмме. При электрическом разряде в кювете происходит ионизация газа: появляются ионы гелия, неона и свободные электроны. Вследствие неупругих соударений со свободными электронами, имеющих большую кинетическую энергию, происходит возбуждение атомов гелия, которые могут переходить на метастабильные уровни 2^3s_1 и 2^1s_0 . (уровни для которых запрещены переходы в основном состоянии). Энергетические уровни гелия 2^3s_1 и 2^1s_0 очень близки к уровням $2s$ и $3s$ неона, поэтому при неупругих соударениях возбуждённых атомов гелия с невозбуждёнными атомами неона происходит эффективная передача избыточной энергии атомов гелия к атомам неона. Атомы неона переходят в возбуждённые состояния $2s$ или $3s$, а атомы гелия — в основное состояние I.

В гелий-неоновом лазере рабочими являются переходы

между энергетическими уровнями неона ($3s \rightarrow 3p$; $3s \rightarrow 2p$; $2s \rightarrow 2p$). Инверсную населённость на указанных уровнях можно получить за счёт прямого электронного возбуждения атомов неона, при переходе их в верхние состояния рабочих переходов ($3s$ или $2s$). Но такой процесс в приборах не используется, ввиду того, что за счёт электронного возбуждения происходит также интенсивное заселение уровня $2p$ частицами с уровня $1s$. Увеличение населённости уровня $2p$ снижает коэффициент инверсии на рабочих переходах, так как их верхние уровни $3s$ и $2s$ с малым временем жизни заселяются недостаточно интенсивно.

Атомы гелия являются посредниками при передаче энергии от быстрых электронов к атомам неона. Поэтому гелий можно назвать вспомогательным каналом заселения верхних рабочих уровней $3s$ и $2s$ неона, а неон — основным, или рабочим, газом. Очевидно, существует обратный процесс передачи энергии от атомов неона к атомам гелия. Чтобы прямой процесс преобладал, необходимо значительное преобладание концентрации гелия над концентрацией неона. Эффективность передачи энергии оказывается высокой также потому, что время жизни гелия на метастабильных уровнях II и III большое (10^{-3} с). В результате выше изложенного процесса образуются инверсная населенность на рабочих переходах $3s \rightarrow 3p$, $3s \rightarrow 2p$ и $2s \rightarrow 2p$. В процессе индуцированного излучения частицы неона переходят на более низкий уровень $2p$, с которого через малый промежуток времени попадают на уровень $1s$. Опустошение этого уровня происходит за счёт диффузии частиц на стенки кюветы, где они теряют часть энергии и переходят в основное состояние, при этом на стенках выделяется тепловая энергия.

Устройство гелий-неонового лазера показано на (рис. 3.11). Стеклоянная или кварцевая трубка является газовой кюветой, которая заполнена смесью газов гелия и неона, парциальные давления которых различны (гелий при $p \approx 1$ мм рт. ст., а неон при $p \approx 0,1$ мм рт. ст.).

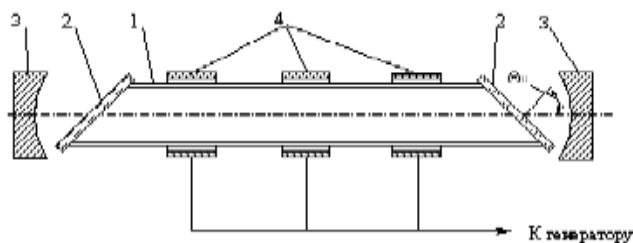


Рис. 3.11. Устройство гелий-неонового лазера:
 1 – кювета; 2 – кварцевые пластины; 3 – зеркала;
 4 – кольцевые электроды

Длина кюветы в различных генераторах может быть разной — от нескольких сантиметров до нескольких метров; диаметр кюветы $d \geq 1$ см. К торцам кюветы приварены плоскопараллельные стеклянные или кварцевые пластины, расположенные относительно оси кюветы под углом θ_0 — углом Брюстера. С двух сторон кюветы расположены зеркала, образующие оптический резонатор. Одно из зеркал делают полупрозрачным или с центральным отверстием для вывода луча из системы. Так как световые лучи в рабочем объеме лазера почти не рассеиваются, то это позволяет располагать зеркала оптического резонатора на достаточно большом расстоянии друг от друга и получать излучение с высокой степенью направленности и монохроматичности.

Зеркала могут быть размещены внутри газовой кюветы, а также снабжены юстировочными механизмами для точной регулировки их взаимного расположения. На кювете размещают кольцевые электроды, с помощью которых в ней возбуждается высокочастотный тлеющий разряд. Электроды питаются от мощного генератора высокой частоты. При использовании тлеющего разряда на постоянном токе анод и катод размещают в специальных отростках, привариваемых к кювете. К этим электродам подводят высокое напряжение: 1 - 2 кВ на метр разрядного промежутка.

Основные рабочие переходы обеспечивают генерацию

излучения в видимой части диапазона ($\lambda = 0,63$ мкм, переход $3s \rightarrow 2p$ обладает наименьшим усилением), а также в инфракрасной области ($\lambda = 1,15$ мкм, переход $2s \rightarrow 2p$ и $\lambda = 3,39$ мкм, переход $3s \rightarrow 3p$).

Коэффициент полезного действия гелий-неоновых лазеров невелик порядка 1 %.

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-N* 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. Ионные лазеры - это наиболее мощные источники непрерывного излучения в видимой и ультрафиолетовой частях спектра.

В качестве активного вещества используются возбужденные до состояния ионизации инертные газы - аргон, криптон. В ионных лазерах генерация осуществляется на электронных переходах в ионах. Для возбуждения иона аргона на лазерный переход требуется двухступенчатый процесс. Сначала атом аргона ионизируется, т.е. переходит с основного состояния нейтрального атома на основное состояние иона (около 16 эВ) за счет электронного удара. Затем с этого уровня ион требуется возбудить до 35,5 эВ откуда, совершая вынужденный переход на уровень 33 эВ, ион аргона испускает фотон на длине волны около 0,5 мкм. Возбуждение в ионных лазерах требует большой плотности тока 200 – 400 А/см² и напряжения между электродами 6 кВ.

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 от-

метить 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.

Ионные лазеры имеют следующие основные особенности:

- высоко расположенные и разреженные энергетические уровни ионов дают возможность получить лазерную генерацию в сине-зеленой части видимой и ультрафиолетовой областях спектра;

- большая вероятность переходов и высокие параметры насыщения обеспечивают высокую мощность излучения в непрерывном режиме (до 500 Вт);

- вследствие необходимости поддерживать высокую плотность ионов активный элемент работает в напряженном электрическом и термическом режиме.

Молекулярные лазеры. Молекула как квантовая система имеет собственный энергетический спектр колебательных и вращательных уровней. Молекулярные лазеры создавались сначала на переходах между колебательными уровнями молекулы углекислого газа в чистом CO_2 , а затем на смеси азота, гелия и CO_2 , что позволило резко увеличить его мощность.

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 (менее 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.

Эксимерные лазеры представляют особый класс молекулярных лазеров на электронно-колебательных переходах между устойчивым возбужденным и химически неустойчивым основным состояниями некоторых молекул. Молекула A_2^* , которая может существовать только в возбужденном состоянии, называется эксимером. Свойствами эксимеров обладают некоторые соединения благородных газов Xe_2^* , Kr_2^* , XeF^* , ArF^* и др. Накачка лазера осуществляется пучком электронов ускоренных до энергий 0,1 – 1 МэВ. Эти лазеры работают в импульсном режиме, с большой мощностью излучения в ультрафиолетовой области при высоком КПД с длиной волны излучения 120 -350 нм.

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 -, CO_2 -лазеры, H_2O -, SO_2 -лазеры) и вращательными уровнями в основном электронном состоянии в дальней ИК-области (HF -, CH_3F -лазеры). Одним из важнейших типов лазеров является CO_2 -лазер. Его КПД (больше 20 %) превышает КПД почти всех лазеров. В CO_2 -лазере получены самые малые для газовых лазеров длительности импульсов (менее 30 пс). Лазер работает на смеси газов CO_2 , N_2 , He . Лазерное излучение в нем возникает при переходах между колебательно-вращательными уровнями молекулы CO_2 в основном электронном состоянии. Заселение верхнего лазерного уровня может происходить за счет всех характерных для газовых лазеров способов создания инверсии. Механизм возбуждения CO_2 -лазера:

- электронным ударом;
- передачей возбуждения от азота к CO_2 ;

- за счет каскадного перехода при соударениях на лазерный метастабильный уровень (0,3 эВ) с более верхних после возбуждения электронами.

Наиболее часто используется накачка за счёт газового разряда. Мощность CO_2 -лазеров в непрерывном режиме достигает десятков киловатт, а в импульсном - сотен мегаватт, длина волны излучения обычно составляет 10,6 мкм.

Особенностью CO_2 лазера является:

- 1) генерация в инфракрасном диапазоне ($\lambda = 10,6$ мкм);
- 2) высокий КПД (до 60 %);
- 3) высокая мощность излучения (несколько тысяч кВт в импульсном и десятки кВт в непрерывном режиме).

В силу генерации инфракрасного излучения возникают трудности с технической реализацией оптических элементов. Зеркала изготавливают из тугоплавких металлов, линзы и выходные окна - из кристаллов поваренной соли, германия, арсенида галлия и других материалов.

Разновидностями CO_2 - лазеров являются:

- 1) отпаянный лазер - герметичная трубка заполнена смесью газов $CO_2 : N_2 : He = 1 : (1...2) : (3...5)$ при давлении около 1 кПа;
- 2) газодинамические CO_2 - лазеры— с прокачкой горячих молекул CO_2 через теплообменник;
- 3) лазер с медленной прокачкой (скорость газового потока около 1 м/с);
- 4) лазер с быстрой прокачкой (скорость газового потока около 30 м/с).

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_3J .

Газодинамические лазеры. Газодинамический лазер (ГДЛ) с тепловой накачкой и смещением газов в камере сгорания являющийся разновидностью молекулярных лазеров.

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.

В газодинамическом лазере инверсная населенность энергетических уровней достигается за счет колебательной релаксации, вызываемой столкновением молекул в процессе сверхзвукового расширения газа и резким снижением его температуры и давления за время, гораздо меньшее, чем это требуется для релаксации верхних энергетических уровней. Схема лазера, в котором реализуется данный способ получения инверсной населенности, показана на рис. 3.12. В камеру сгорания A поступает жидкое топливо и окислитель. При сгорании топлива образуется углекислый газ CO_2 . Горячий газ смешивается с азотом и водяными парами, в

результате чего образуется высокотемпературная ($T = 1400 \text{ K}$) газовая смесь. В этой разогретой смеси ее молекулы CO_2 возбуждаются и переходят на более высокие уровни. Тепловое равновесие системы достигается уже при более высокой населенности верхних уровней возбужденными молекулами, чем это имеет место при обычной температуре. Однако число молекул на нижних уровнях все же превышает их число на верхних, поэтому индуцированное излучение отсутствует. Для создания инверсной населенности необходимо обеспечить условия, при которых нижние уровни обедняются, а верхние сохраняют свою населенность.

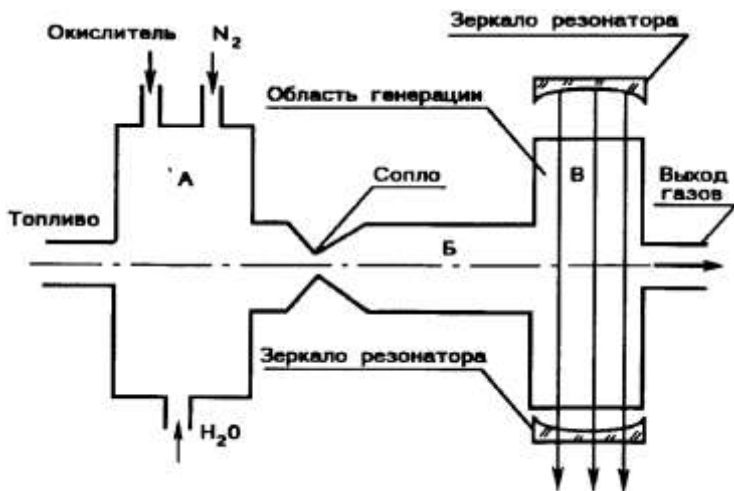


Рис. 3.12. Газодинамический лазер

С этой целью разогретая смесь газов под большим давлением прокачивается со сверхзвуковой скоростью через сопло. В камере В происходит быстрое расширение газовой смеси, сопровождающееся ее охлаждением до $T = 354 \text{ K}$, что вызывает уменьшение числа возбужденных молекул CO_2 . Но вследствие того, что верхний уровень возбуждения имеет большее время жизни (время нахождения на нем молекул

CO₂), чем нижний, населенность нижнего уровня падает быстрее, чем верхнего, и уже на расстоянии 3 см от сопла она практически исчезает. Возникает инверсная населенность, приводящая к индуцированному излучению на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм. Это условие сохраняется и в камере резонатора.

В лазерах этого типа, построенных по схеме рис. 3.12, мощности генерации составляли около 60 кВт, а в импульсном режиме с длительностью импульса 4 с среднее значение мощности достигало уже 400 кВт. К недостаткам данной схемы следует отнести то, что в камере сгорания вместе с азотом охлаждаются другие компоненты смеси (CO₂, H₂O или He), и поэтому молекулы этих газов действуют как примеси, уменьшая эффективность накачки. Кроме того, газовую смесь необходимо нагреть до максимальной температуры. Однако критическая температура для CO₂, при которой начинается диссоциация молекул, лежит в области $T = 2300$ К, а диссоциация азота происходит при $T > 4000$ К. Поэтому предварительное смешение газовой смеси или получение ее в камере сгорания не использует всех потенциальных возможностей данной активной среды.

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.

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 %.

3.4.3. 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. 3.13. Зеркалами являются гладкие грани самого полупроводникового кристалла, получаемые обычно скалыванием или полировкой его краев.

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.

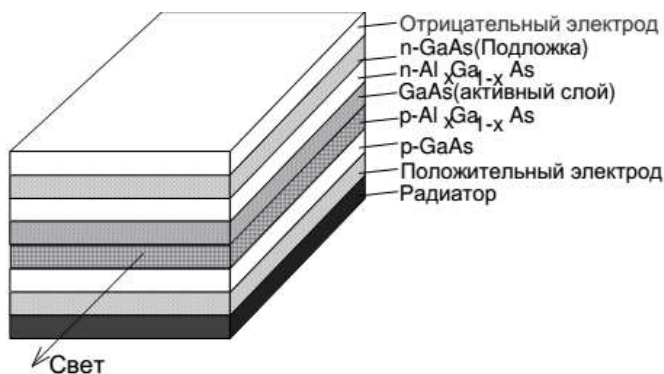


Рис. 3.13. Схема полупроводникового инжекционного лазера

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.

3.4.4. Лазеры на красителях

В лазерах на красителях вынужденное излучение возникает на флуоресцентном переходе в многоатомных органических молекулах. Концентрация красителя составляет 0,0001 - 0,005 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 нанометров). Перестройка частоты может осуществляться изменением состава, концентрации и температуры раствора.

4. ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

4.1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом

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. 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.

Лазерное излучение, падающее на поверхность образца, интенсивно поглощается в очень тонком слое 1 – 2 мкм. Выделившееся тепло проникает вглубь материала за счет теплопроводности. 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 вглубь материала, и приводит к образованию канала, заполненного парами материала. После достижения на поверхности температуры плавления вглубь материала перемещается фронт расплава. Появляется жидкая фаза. Если позволяет плотность мощности, образуется плазма, экранирующая луч от дна отверстия. Из-за кратковременности процесса взаимодействия (около 10^{-3} с) испарение носит характер взрыва. 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 вглубь материала. На передней стенке канала происходит плавление материала, а затем затвердевание. Наличие канала даёт возможность лазерному излучению проникать в материал на некоторую глубину.

Заключительная стадия формирования лунки может быть различна.

1. При свободной генерации импульс лазера состоит из множества пиков, причем в конце импульса они даже не сливаются друг с другом, энергия их недостаточна для испарения. Это вредное явление приводит к образованию жидкой фазы после испарения. Появляются наплывы материала на внутренних стенках отверстия.

2. В режиме «модулированной добротности» при генерации лазером коротких импульсов с крутыми фронтами жидкая фаза на заключительной стадии формирования отверстия не образуется. Форма отверстия получается близкой к цилиндрической.

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.

4.2. 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. 4.1):

- технологический лазер;
- систему отклонения и фокусировки луча;
- систему наблюдения;
- оснастку для крепления и перемещения детали;
- средства контроля за параметрами процесса.

В зависимости от параметров технологического процесса в качестве технологического лазера могут использоваться твердотельные или газовые лазеры.

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.

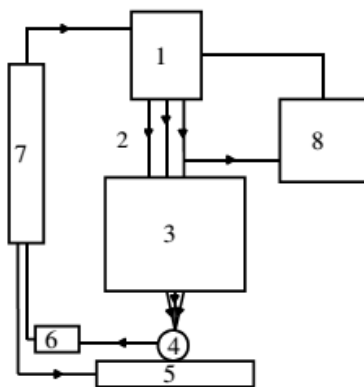


Рис. 4.1. Структурная схема лазерной технологической установки: 1 - технологический лазер; 2 - лазерное излучение; 3 - оптическая система; 4 - обрабатываемая деталь; 5 - устройство для закрепления и перемещения детали; 6 - датчики параметров технологического процесса; 7 - программное устройство; 8 - датчики параметров излучения

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 растру. 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 ин-

тенсивности 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. С целью увеличения плотности лучистого потока его фокусируют оптическими системами.

4.3. 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 при диаметре пучка 1 см порядка 10^4

Вт/см². Поэтому термическую обработку больших поверхностей проводят киловаттными лазерами на углекислом газе.

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. 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 CO₂-лазеры, а также в ряде случаев - лазеры на алюмоиттриевом гранате (АИГ).

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 мате-

риала. 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.

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.

4.4. 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 активирования 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 монопольный, так и импульсно-периодический режимы. Достоинства импульсного режима: точное, прецизионное дозирование энергетического вклада, высокая воспроизводимость технологических параметров, малое время формирования паяного соединения. 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 распространённостью твердотельных лазеров и простотой управления их энергетическими

и оптическими характеристиками. Основные применения пайки в электронной промышленности:

- пайка электрических проводников к поверхности;
- пайка электродной фольги с выводами электролитических конденсаторов;
- пайка лакирующего материала с подложкой;
- пайка выводов к видеоголовкам;
- пайка электронных ЧИПов к контактам;
- соединения типа трубка-лента (рис. 4.2);
- пайка конденсаторов и резисторов на контактных площадках микрополосовой линии подложки;
- пайка электрических выводов к тонкоплёночным системам;
- пайка электрических выводов ИС к проводнику;
- пайка проводников с плёнкой на подложке;
- соединение полублоков магнитных головок;
- соединение ИС с печатной платой;
- герметизация малогабаритного корпуса ПП прибора с крышкой;
- соединение нитей (вольфрам) с проволокой (молибден).

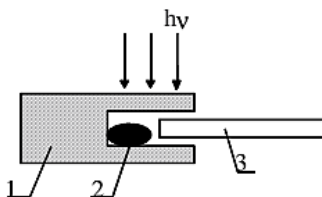


Рис. 4.2. Лазерная пайка: 1 - трубка с глухим отверстием, 2 - припой, 3 - лента

Достоинства лазерной пайки: бесконтактность, высокая степень локальности, точность энерговозложения, 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.

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

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, изготовленных 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.

Лазерная сварка применяется при герметизации корпусов на установке шовной лазерной сварки «Квант 17». 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.

Для импульсной лазерной точечной сварки разработан ряд специализированных установок: СПС-10-1; «Квант-10»; «Квант-12», «Квант-17».

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.

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 %.

4.6. 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:

Лазерная резка большинства металлов и полупроводников ($a = 0,1 - 1 \text{ см}^2/\text{с}$) при скорости резания до $1 \text{ см}/\text{с}$ соответствует условию медленного движения источника тепла.

Для сред с малой теплопроводностью (диэлектрики, металлические пленки на диэлектрических подложках) часто проявляется приближение быстродвижущегося теплового источника.

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 количе-

ство 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, очень высокой производительностью процесса; возможностью автоматизации процесса резки и резки по сложному профилю в двух и даже трёх измерениях.

В большинстве случаев резка осуществляется CO_2 -лазером непрерывного действия, несмотря на высокую отражательную способность металлов в ИК-области.

Для резки неметаллических материалов (бумага, стекло, кварц, фанера, полимеры, кожа) используются также CO_2 -лазеры непрерывного действия, только меньшей мощности (порядка 500 Вт).

4.7. 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:

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

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 вглубь 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 вглубь 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.

В настоящее время для сверления отверстий используются в основном лазеры на АИГ. 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.

4.8. 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.

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 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. 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. 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.

4.9. Лазерные микротехнологии

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

- 1) малая зона термического влияния;
- 2) регулирование глубины обработки;
- 3) быстрота выполнения;
- 4) 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 ла-

зерная 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:

$$R = \frac{\rho L}{hB},$$

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. 4.3).



Рис. 4.3. Доводка резисторов: *а* - удаление материала на дискретных участках; *б* - удаление материала посредством линейных 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 трапециевидная, а прорезей в них - X -рез (вдоль линий тока); Y -рез (поперёк линий тока); L -рез (комбинация X - и Y -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 гене-

ратора Ганна производится путём изменения длины отрезка микрополосковой линии.

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. 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.

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.

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, переكري-

сталлизация - 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 x 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*, *Me₂Si*, *Me₄Si* 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 вглубь расплавленного материала. При этом примесные атомы занимают узлы кристаллической решётки, при-

чем 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 B или Si p -типа с P даёт выпрямляющие $n-p^+$ и $p-n^+$ - переходы.

4.10. 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 CO_2 , Nd -АИГ- или рубиновый лазер. Для испарения изоляторов и большинства полупроводниковых материалов предпочтительнее CO_2 -лазеры, тогда как Nd -АИГ- или рубиновый лазер предпочтительнее для испарения металлов.

Фотолит (фотоосаждение). Разложение молекулы под действием лазерного излучения называется лазерным фотолитом. 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. С помощью фотолиза могут быть получены плёнки металлов, SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 и др. Скорость осаждения при фотолизе определяется мощностью лазерного импульса, давлением в камере и площадью, на которую осаждается плёнка, и обычно составляет 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. Лазерное излучение падает на оптически прозрачную подложку с предварительно осаждённой тонкой плёнкой.

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.

5. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

5.1. 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 со-

ударении 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 обусловле-

но 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 **термолизированные 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 термолизированных в зоне проводимости электронов, как правило, достаточно велико и может достигать десятков и сотен микросекунд. Однако, в конечном счете эти нерав-

новесные 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 относятся 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 ис-

ключительно 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 элек-

тронно-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.

5.2. 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:

$$\frac{dE}{dx} = - \frac{2\pi N_A \cdot e^4 Z \rho}{A \varepsilon} \ln \frac{b \varepsilon}{I}, \quad (5.1)$$

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:

$$E_x^n = E_0^n - \rho b_1 x \quad \text{или} \quad R = \frac{E_0^n}{\rho b_1} = E_0^n \cdot k \quad (5.2)$$

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

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

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 (5.2) при $n = 2$ является уравнение Виддингтона $E_x^2 = E_o^2 - \rho b_1 I$, 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:

$$x_d = \frac{12R}{Z+8} \text{ и } r_d = (Z - 4)R/(Z + 8). \quad (5.3)$$

5.3. Взаимодействие ускоренных электронов с твердым телом

Электронный луч представляет собой направленный поток электронов, переносящий энергию от излучателя электронов к зоне обработки.

Этапами формирования электронного луча являются:

- получение эмиссии свободных электронов;
- ускорение электронов электростатическим полем и фокусирование электронного пучка;
- отклонение луча по необходимой траектории для целей обработки.

Ускоренные электроны приобретают кинетическую энергию, пропорциональную их скорости. При торможении высокоскоростных электронов в веществе происходит переход их кинетической энергии в теплоту вещества обрабатываемого объекта.

Так как электроны теряют свою энергию при столкновении с молекулами и атомами вещества, то в пространстве рабочей камеры должен поддерживаться высокий вакуум, который необходим также для защиты катода бомбардировки положительным ионами.

Вышедший из катода электронной пушки электрон ускоряется в электрическом поле и приобретает энергию

$$W_e = \frac{m_e v^2}{2} = e_0 U [\text{эВ}], \quad (5.4)$$

где m_e и e_0 - масса и заряд электрона;

U - пройденная электроном разность потенциалов (В).

Излучаемые катодом электроны ускоряются в электрическом поле и формируются электрическими и магнитными полями в электрический луч. Мощность электронного луча

$$P_{\text{л}} = I_{\text{л}} \cdot U_y, \quad (5.5)$$

где $I_{\text{л}}$ - ток луча, (А);

U_y - ускоряющее напряжение, В.

Удельная мощность в луче и на поверхности обработки

$$P_{\text{л.уд.}} = \frac{P_{\text{л}}}{S_{\text{л}}} = \frac{I_{\text{л}} U_y}{\pi r_{\text{л}}^2}, \quad (5.6)$$

где $S_{л}$ и $r_{л}$ - поперечное сечение и радиус луча на обрабатываемой поверхности.

Сформированный электронный пучок проходит через рабочую камеру и попадает на поверхность обрабатываемого объекта. Скорость электронов при попадании на поверхность детали

$$v = \sqrt{\frac{2e_0 U_y}{m_e}} \quad (5.7)$$

При торможении электронов в веществе возникают явления упругих и неупругих столкновений с атомами вещества. Электроны отдают свою кинетическую энергию атомам, что приводит к раскачке кристаллической решетки (нагревание), и потере внутрискристаллических связей (плавление и кипение). Упруго сталкивающиеся электроны многократно отражаются и рассеиваются внутри вещества (рис. 5.1).

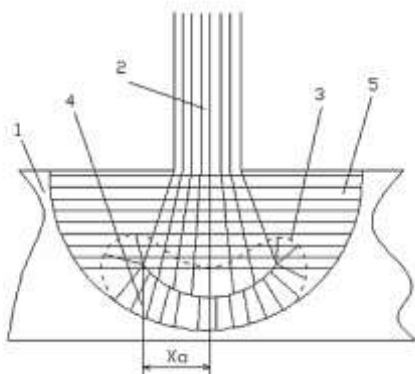


Рис. 5.1. Модель зоны взаимодействия монокристаллического электронного пучка с веществом: 1 - мишень; 2 - пучок электронов; 3 - зона рассеяния пучка при столкновениях на малые углы; 4 - зона диффузно рассеянных электронов; 5 - область рассеяния электронов при столкновениях на большие углы (в направлении к поверхности)

Часть электронов отражается от поверхности, формируя рентгеновское излучение (0,1 - 1 % всей мощности). После выделения энергии в поверхностном слое вещества происходит теплоотдача в глубинные слои.

Благодаря высокой интенсивности потока и огромной скорости энергии в вещество, развиваются очень высокие температуры (выше температур кипения металлов). Расстояние, пробегаемое тормозящим электроном в веществе очень мало, и для электронов с энергией 5 – 100 эВ может быть определено по формуле Шонланда

$$b = 2,1 \cdot 10^{-17} U_y \rho, [\text{м}] \quad (5.8)$$

где ρ - плотность вещества мишени, кг/м³.

Это расстояние в зависимости от скорости составляет 5 - 30 мкм. Время торможения при этом составляет около 10⁻⁶ с. За это время микропорция материала расплавляется и вскипает.

Возможность получения глубокого проплавления определяется, в основном, свойствами материала, а не характеристиками источника энергии.

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 может превышать температуру кипения. Вольфрам имеет значительно большую плотность, поэтому тепловой источник локализуется вблизи поверхности, а относительно высокая теплопроводность позволяет выровнять температуру по глубине.

Основное требование к источнику энергии - он должен быть достаточно малых размеров. Реальные величины 0,2 – 0,5 мм. По этому принципу требующая для глубокого плавления плотность мощности равна 10⁵ - 10⁶ Вт/см².

После вскипания формируется парогазовое облако, выбрасываемое навстречу лучу. Луч рассеивается облаком на стенки канала (экранируется от дна). При этом плавятся стенки, и углубление канала не происходит. После окончания взрыва и рассеивания облака луч проникает на дно углубления, и процесс повторяется. Таким образом, вследствие периодической экранировки обработка идет в прерывистом режиме.

Периодическое смыкание канала проплавления, зависящее от времени воздействия луча на материал, т. е. от плотности потока, происходит с частотой 10 – 20 Гц.

Варианты формообразования каналов электронным лучом представлены на рис. 5.2.

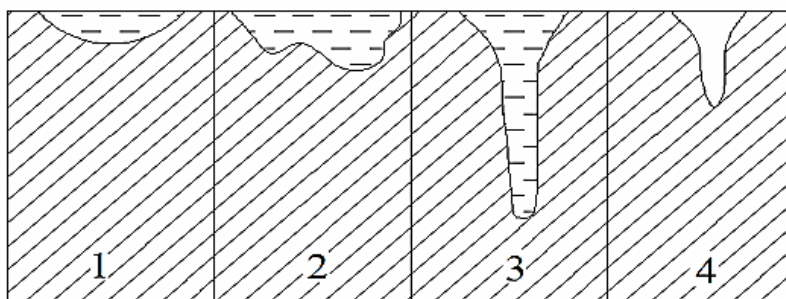


Рис. 5.2. Варианты формы расплавленного электронным лучом канала в металле: 1 - «мягкий» режим (плотность мощности - $5 \cdot 10^4$ Вт/см²) - образование расплавленной лунки; 2 - переход к «жесткому» режиму; 3 - «кинжальное» проплавление (10^5 - 10^6 Вт/см²); 4 - формирование отверстия в металле (более 10^6 Вт/см²)

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. 5.3) по уравнению:

$$R_k = \frac{2\sigma}{v_{и}\sqrt{2kT/(M-\rho h_k)}}, \quad (5.9)$$

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.

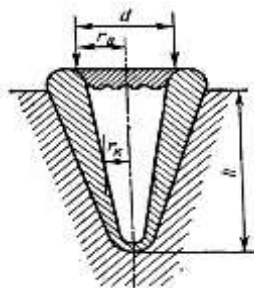


Рис. 5.3. Образование паро-плазменного канала при глубоком проплавлении

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.

Важное значение при формировании канала отверстия имеет длина фокуса магнитной линзы, т.е. угол сходимости электронного луча в точке фокуса. Короткофокусные линзы (угол сходимости более 10°) обеспечивают меньшую глубину проплавления, чем длиннофокусные (угол сходимости до $2 - 3^\circ$).

6. ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

6.1. 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.

Электронно-лучевой нагрев применяется для выполнения следующих технологических операций:

- получение отверстий, резка металлов, диэлектриков, синтетических материалов;
- получение монтажных соединений в изделиях микроэлектроники;
- испарение металлов и оксидов с целью металлизации и напыления;
- сварка узлов электронных приборов, корпусов мощных полупроводниковых приборов, герметизация сваркой изделий микроэлектроники;
- сварка тугоплавких и химически активных металлов толщиной от нескольких десятых долей миллиметра до десятков и более миллиметров;
- сварка крупногабаритных (более 100 мм) изделий ответственного назначения из различных металлов, когда необходимо глубокое и узкое проплавление металла;
- сварка изделий из разнородных металлов (тугоплавких и обычных), не удающаяся на воздухе;
- получение сплавов особо чистых веществ;
- выращивание монокристаллов и т. д.

С технической точки зрения основными преимуществами электронно-лучевого нагрева следует считать:

- возможность в широких пределах плавно изменять удельную энергию в зоне нагрева;
- большую удельную мощность (от десятков ватт до нескольких мегаватт) в месте взаимодействия электронного луча с обрабатываемым изделием;
- возможность управления пространственным положением луча с помощью магнитной системы;
- возможность использования вакуума как рабочей среды;
- возможность получения прецизионной (малоразмерной) зоны воздействия электронного луча на обрабатываемый материал.

К временным недостаткам этого вида нагрева следует отнести:

- необходимость обеспечения высокого вакуума в электронной пушке;
- сложность изготовления, эксплуатации и высокую стоимость электронно-лучевого оборудования.

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-микроанализатором. 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.

6.2. Электронно-лучевые установки

6.2.1. Общие принципы построения электронно-лучевых установок

Достаточно многочисленные электронно-лучевые установки имеют ряд одинаковых функциональных узлов. Укрупненная функциональная структурная схема технологической установки имеет вид, представленный на рис. 6.1.

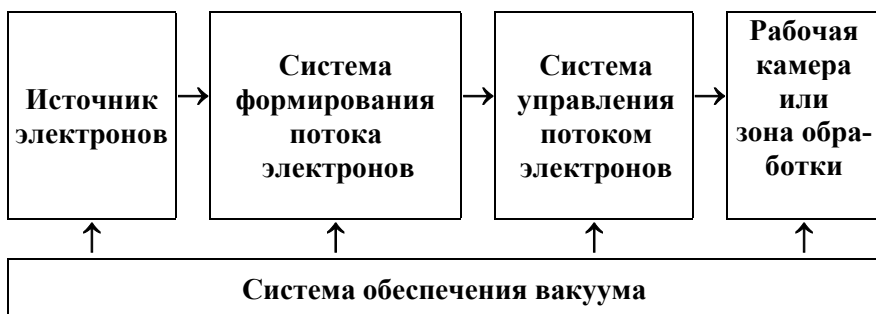


Рис. 6.1. Структурная схема электронно-лучевой установки

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.

6.2.2. 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:

- обеспечение требуемого электронного тока;
- устойчивость к ионной бомбардировке, долговечность работы;
- 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:

$$I_{\text{л}} = GU_{\text{а}}^{3/2}, \quad (6.1)$$

где G - первеанс источника электронов; $U_{\text{а}}$ - 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:

$$j_e = \frac{1}{4} en_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}}, \quad (6.2)$$

где T_e - температура электронного газа в К.

Если принять $T_e = 10^4$ К, $n_e = 10^{18}$ м⁻³ - концентрация электронов в плазме, то из плазменного источника можно получить токи с плотностью 10^3 А/см², что в 10^3 раз больше, чем для рассмотренных твердотельных эмиттеров.

6.2.3. 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 распределе-

нием 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:

$$G = U_a^{3/2}/I_{\text{л}}, \quad (6.3)$$

где $I_{\text{л}}$ - ток луча; U_a - 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^{-5} 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/см^2 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 0,01 - 0,1 мкс. Для отклонения электронных пучков используются преимущественно магнитные устройства.

6.2.4. 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 $10^{-17} - 10^{-15} \text{ см}^2$. Это означает, что при давлении остаточных газов 1 Па на каждом метре пути электрон испытывает в среднем от одного до ста таких соуда-

рений. 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 избежании 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.

6.2.5. 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.

6.3. 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. Основные технологические операции электронно-лучевой обработки можно условно разделить на 4 группы:

- плавка (технологические операции плавки в вакууме, локального переплава);
- испарение (испарение в вакууме, размерная обработка электронным лучом);
- термообработка (без изменения агрегатного состояния вещества);
- сварка.

Диапазоны мощности и удельной мощности пучка, используемые в основных процессах электронно-лучевой технологии, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Параметры электронного пучка при электронно-лучевой обработке

Виды обработки	Энергия электронов, кэВ	Радиус электронного пучка, мкм
Нетермическая	250	0,01 - 10
Химическая электронно-лучевая	5000	5 - 150
Плавка	40	5 - 25
Испарение	40	1 - 15
Сварка	175	0,05 - 3
Термическая размерная	150	2 - 50

6.3.1. Электронно-лучевое испарение материалов (ЭЛИ)

Испарение в вакууме материалов при нагреве их электронным лучом широко используют для получения тонких пленок. 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 водоохлаждаемые 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.

Электронно-лучевое испарение применяют в микроэлектронике для нанесения различных металлических покрытий на стальную ленту, для изготовления фольги из псевдосплавов сложного состава. Электронным лучом можно испарять с последующим осаждением на подложку различные неметаллические материалы: диоксид кремния, оксид алюминия, различные виды стекла. Конденсационные покрытия применяют в оптической промышленности и в различных областях электроники.

Принципиальная схема электронно-лучевой испарительной установки для нанесения покрытий показана на рис. 6.2. Из бункера 5 испаряемый материал по желобу 7, приводимому в действие вибратором 6, поступает в водо-охлаждаемый тигель 9. Траектория электронного луча 3, получаемого с помощью электронной пушки 7, искривляется отклоняющей системой 2 в направлении испаряемого вещества 8. В результате воздействия луча 3 на вещество оно испаряется, частицы пара поднимаются вверх и оседают на поверхности подложки 4, образуя плотную пленку. Применение отклоняющего магнитного

поля позволяет располагать электронную пушку 1 практически в любом удобном месте.

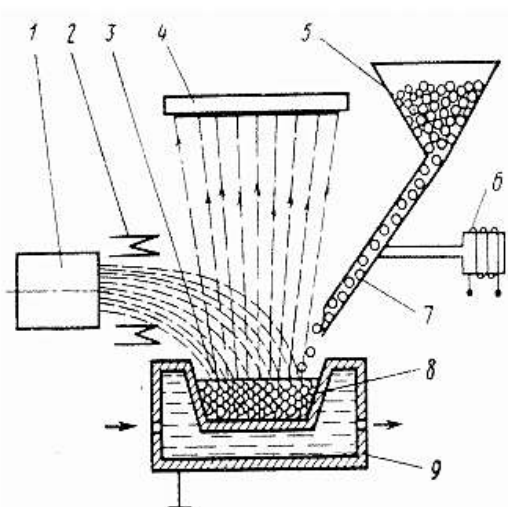


Рис. 6.2. Принципиальная схема электронно-лучевой испарительной установки

Принцип ЭЛИ заключается в следующем. 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.

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 пленок 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.

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 компонен-

ты 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.

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).

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_{ϕ} 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 трехэлектродный электронный прожек-

тор 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 дополнительной камеры 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

$$\frac{v_{\Gamma}}{v_{\Pi}} = 55,5 \frac{M_p p_{\Gamma}}{\rho V_k}, \quad (6.4)$$

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 рабо-

ты электронно-лучевых испарителей. Импульсное напыление на частотах 100 - 1000 Гц даже при форвакуумном давлении 10^{-1} - 10 Па по результатам эквивалентно нанесению плёнок в вакууме порядка 10^{-7} - 10^{-6} 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^{-6} - 10^{-5} г массы.

Такие режимы могут быть осуществлены на различных электронно-лучевых отечественных установках, в частности ЭЛУ-9, А.306.9, А.306.13. 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.

6.3.2. 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.

Плавка электронным лучом в вакууме применяется в тех случаях, когда необходимо получить особо чистые металлы.

Переплавляемый материал может быть использован практически в любой форме (шихта, прутки, лом, спеченные штабики, губка).

Важную роль при электронно-лучевой плавке играет вакуум:

1. В вакууме происходит интенсивное удаление растворенных в металле газов, что значительно улучшает его механические свойства, особенно пластичность. Многие сплавы на основе вольфрама, молибдена, ниобия и других химически активных металлов получили промышленное применение только благодаря тому, что их выплавляют в вакууме.

2. Некоторые из вредных примесей (нитриды, карбиды, оксиды) при нагреве в вакууме разлагаются, при этом происходит вакуумное рафинирование переплавляемого металла.

3. При плавке металла в вакууме непрерывно происходит удаление газообразных продуктов из зоны реакции, вследствие чего равновесие химических реакций $MeO + C = Me + CO$ сдвигается вправо, т.е. резко интенсифицируются раскислительные реакции. Это повышает качество выплавляемого в вакууме металла, значительно снижает в нем содержание газов и прежде всего кислорода.

Переплавляемый металл (рис. 6.3, 6.4) в виде порошка, гранул или мелкого металлолома подается в установку, где он подвергается обработке одной или несколькими пушками.

Электронно-лучевая плавка удобна при выращивании монокристаллов (рис. 6.4), когда на затравку 2 наплавляется материал 5 из тигля 7 и вытягивается с заданной скоростью вертикально вверх с получением монокристалла 3.

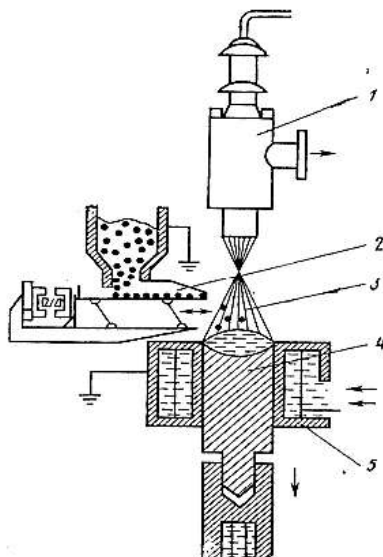


Рис. 6.3. Схема ЭЛУ для переплавки порошка:
 1 – электронная пушка; 2 – переплавляемый порошок;
 3 – электронный луч; 4 - переплавляемый слиток;
 5 - водоохлаждаемый кристаллизатор

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 бестиглевом методе Вернейля материал в виде порошка подается на поверхность расплава. Эта поверхность непрерывно разогревается электронной бомбардировкой. Монокристалл вытягивается вниз со строго контролируемой скоростью.

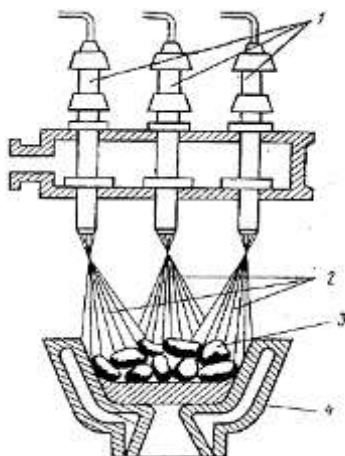


Рис. 6.4. Схема ЭЛУ для переплавки металлолома:
 1 – электронные пушки; 2 – электронные лучи;
 3 – переплавляемый металлолом; 4 – водо-охлаждаемая форма

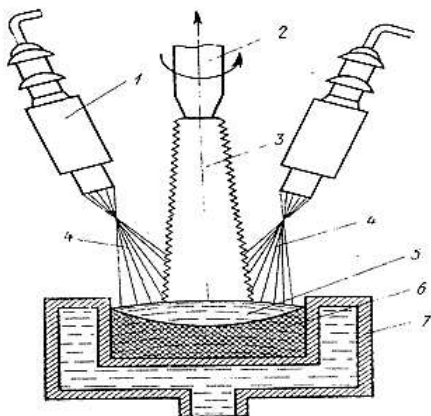


Рис. 6.5. Схема ЭЛУ для выращивания монокристаллов:
 1 – электронная пушка; 2 – затравка; 3 – монокристалл;
 4 – электронный луч; 5 – расплав переплавляемого
 материала; 6 – переплавляемый материал;
 7 - водоохлаждаемый тигель

В промышленности применяют электронно-лучевую плавку с последующей заливкой в вакууме литейных форм. На различных ЭЛУ для плавки в вакууме при давлении $10^{-7} - 10^{-4}$ Па получают слитки массой до 20 тонн.

Локальный переплав обрабатываемых поверхностей с помощью электронного луча дает возможность получать чрезвычайно высокие скорости кристаллизации металла в зоне плавления. Образующиеся при этом структуры значительно отличаются от структур, получаемых в обычных условиях: расширяются границы растворимости для твердых растворов, измельчается микроструктура, значительно повышаются пластичность и твердость.

Такое поверхностное оплавление материала называют «облагораживающим», что позволяет для изготовления ответственных конструкций с высокими показателями износостойкости использовать недорогие исходные металлы и сплавы.

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.

6.3.3. Сварка электронным пучком

Электронно-лучевая сварка является одним из самых распространенных технологических применений электронного луча. Ее производят с помощью тонкого пучка электронов, который фокусируется на стыке соединяемых деталей и нагревает их до плавления. Сварочный шов при электронно-лучевой сварке получается чистым и свободным от газов, оксидов и летучих примесей. Общее количество энергии, необходимое для расплавления материала, гораздо меньше, чем при других видах нагрева в процессе сварки. Это обусловлено высокой концентрацией энергии в фокусе электронного луча.

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.

Установки электронно-лучевой сварки делятся на два основных типа: низковольтные с рабочим ускоряющим напряжением до 15 - 20 кВ и высоковольтные, работающие при ускоряющем напряжении 150 – 200 кВ.

При электронно-лучевой сварке благодаря высокой концентрации энергии в сварочной зоне сварочный шов представляет собой вытянутый клин с большим отношением длины зо-

ны расплавления к ее ширине. 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 $\nu_e > 20$ происходит уменьшение отношения h/d , а при $\nu_e \approx 10^4$, 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 подогревая 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 определяются 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. 5.3). 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.

В режиме «кинжального» проплавления ширина швов b уменьшается пропорционально величине $\sqrt{U_{\text{уск}}}$.

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.

6.3.4. 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. Размерная обработка основана на том, что при достаточно большой удельной поверхностной мощности скорость испарения обрабатываемого материала и давление пара возрастают настолько, что весь жидкий металл с потоком пара выбрасывается из зоны обработки. Строгое дозирование подводимой энергии осуществляется импульсным воздействием электронного луча на поверхность или его перемещением по поверхности с заданной скоростью.

Можно выделить три режима размерной электронно-лучевой обработки:

1. Моноимпульсный режим - обработка ведется одиночным импульсом, т.е. отверстие получают за время действия одного импульса.

2. Многоимпульсный режим - отверстие получают воздействием на заданное место заготовки несколькими импульсами.

3. Режим обработки с перемещением электронного луча по заготовке с заданной скоростью.

Электронный луч нашел применение в первую очередь для размерной обработки твердых материалов - алмазов, кварца, керамики, кристаллов кремния и германия.

Особой разновидностью размерной электронно-лучевой обработки является перфорация (получение мелких сквозных отверстий) различных материалов. Этим способом изготавливают металлические и керамические элементы фильтров, пористый материал для охлаждения камер сгорания и лопаток турбин.

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 $t_{имп}$, тока импульса $I_{и}$ и положения фокуса относительно поверхности).

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 участ-

ка. 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.

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 некоторо-

го 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.

6.4. 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.

6.4.1. 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 SiO_2 и Si_3N_4 приводит облучение силанов электронным лучом.

6.4.2. Электронно-стимулированное травление

Электронно-лучевые процессы требуют больших доз (более 1 Дж/см², 10^{-2} Кл/см²) по сравнению с фотостимулированными реакциями, но их можно использовать, 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 (менее 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/см^2 . 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.

6.4.3. Электронно-лучевая литография

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. 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 электронно-лучевой литографии (ЭЛ-литографии) по кремниевой пластине для формирования металлизированных межсоединений в биполярных ИС. Резистом может служить любой полимер, либо неорганический пленкообразующий материал. Возможна даже безрезистивная 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. 6.2).

Таблица 6.2

Резисты высокой чувствительности

Доза	Вещество
10 Кл/см ²	AgBr (Н)
0,1 мДж/см	ПММА-акриловая кислота (Н)
10 Кл/см ²	Полиэпоксиды (Н)
1 мДж/см ²	Полисиликоны (Н). Полигалогенакрилаты (П). Полиаллилы (Н)
10 Кл/см ²	Полисульфоны (П). Полиальдегиды (Н)

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

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.

К параметрам, определяющим разрешающую способность метода, 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.

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 растр 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 символьного 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 безрезистивной 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 (более 10^{-4} Кл/см²) и эффекты обратного рассеяния. Низкая производительность и радиационные дефекты остаются предметом забот с точки зрения экономичности и надежности.

Современные методы электронолитографии позволяют получать разрешение 1 нм, что на 1,5 – 2 порядка превышает предельное разрешение оптических методов. Разработано два метода электроннолучевой литографии: электронолитография со сканирующим сфокусированным пучком электронов и проекционная электронолитография (рис. 6.6). В первом случае используют растровые электронные микроскопы или специализированные электронно-лучевые установки.

Сканирование пучка осуществляют либо по всему растру с включением его в тех местах, которые должны быть проэкспонированы, либо перемещением пучка и экспонированием не по всей площади растра, а только по участкам, где необходимо

получить изображение. И в том, и другом варианте управление током и перемещением пучка осуществляется с помощью ЭВМ.

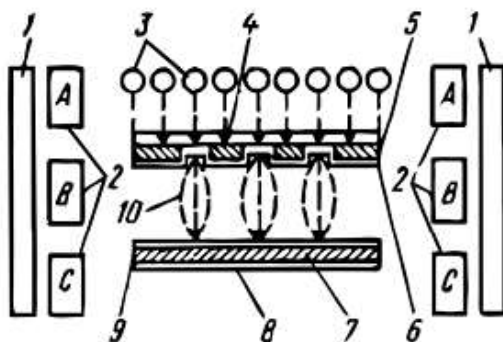


Рис. 6.6. Схема проекционной электронолитографии:
 1 – отклоняющие катушки; 2 – фокусирующие катушки; 3 –
 УФ-лампы; 4 – кварцевая пластина; 5 – слой диоксида титана;
 6 – слой палладия; 7 – 9 – окисленная пластина кремния с
 электронорезистом; 10 – траектория электронов

В некоторых типах растровых электронных микроскопов можно получать линии шириной до 0,1 мкм на площади до 20 см². Основной недостаток систем электронолитографии со сканирующим пучком – большое время экспонирования, увеличивающееся с уменьшением ширины линии. Преимущества метода – отсутствие фотошаблонов и возможность автоматизации процесса.

В процессе проекционной электронолитографии экспонирование подложки с нанесенным на нее электроночувствительным слоем производят несфокусированным потоком электронов через свободную металлическую маску. Свободная маска не позволяет получать замкнутые кольцевые рисунки. Ввиду этого чаще используют потоки электронов с катодов заданной конфигурации.

Для создания фотокатодов на полированную пластину из плавленого кварца наносят слой титана, в котором формируют изображение.

Вытравленные в титановом слое участки в дальнейшем служат источником фотоэлектронов. Затем титан окисляют до диоксида титана, поглощающего УФ-излучение, после чего на всю поверхность напыляют слой палладия толщиной около 4 – 5 нм. При освещении обратной стороны кварцевой пластины УФ-светом палладий эмиттирует электроны с малой энергией около 0,1 эВ. Плотность потока электронов невелика и составляет 100 мкА/см²

Ускоряющее поле напряженностью 10 кВ/см, фокусирующее магнитное поле, обеспечивают перенос изображения на резист в масштабе 1:1.

Минимальная ширина линии 1 мкм, диаметр рабочего поля более 125 мм, время экспонирования составляет всего 5 с.

Ограничениями метода проекционной электронолитографии являются трудность выполнения операции совмещения и необходимость создания сложных фотокатодов.

7. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

7.1. 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:

$$\frac{dE}{dx} = N[S_n(E) + S_e(E)], \quad (7.1)$$

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 потенци-

ала 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:

$$S_n(\varepsilon) = \frac{A\sqrt{\varepsilon}}{(B + \varepsilon)}; A = 0,45; B = 0,3, \quad (7.2)$$

где ε - безразмерная приведенная энергия:

$$\varepsilon = \frac{aM_2E_1}{Z_1Z_2e^2(M_1+M_2)}, \quad (7.3)$$

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:

$$S_e = K\sqrt{\varepsilon}, \quad (7.4)$$

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

Зависимость ядерной и электронной тормозной способности от энергии ионов показана на рис. 7.1. При малых энергиях ионов преобладающим является ядерное торможение, а при высоких - электронное (рис. 7.1). Масштаб величин виден из табл. 7.1.

Таблица 7.1

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
<i>B</i>	3	17	3000	0,037	0,21
<i>P</i>	17	140	30000	0,44	0,28
<i>As</i>	73	800	200000	1,42	0,29
<i>Bi</i>	530	6000	2000000	2,78	0,25

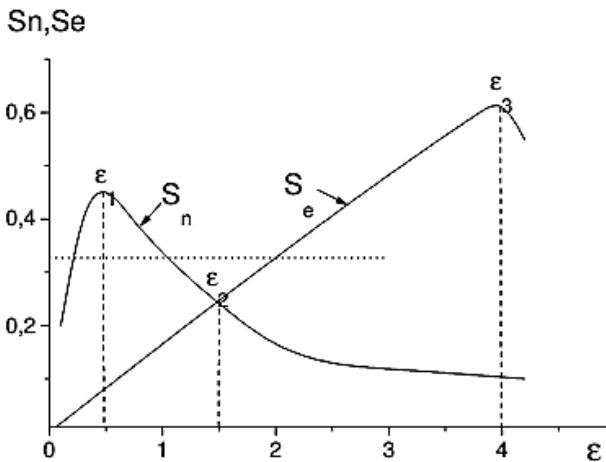


Рис. 7.1. Зависимость тормозной способности ионов в веществе от приведенной энергии ионов

7.2. Пробеги 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 (*проеекционный пробег*). В общем случае траекторный пробег может быть найден из уравнения:

$$R_t = \frac{1}{N} \int_0^\varepsilon \frac{d\varepsilon}{S_n(\varepsilon) + S_e(\varepsilon)}. \quad (7.5)$$

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:

$$R_p = \frac{6E_1M_2(M_1+M_2)(Z_1^{\frac{2}{3}}+Z_2^{\frac{2}{3}})^{1/2}}{\rho Z_1Z_2M_1}, \quad (7.6)$$

где ρ - плотность твердого тела.

Соответствующие величины для кремния приведены в табл. 7.2. Величина проекции пробега растет с увеличением энергии падающих ионов (при ядерном торможении по закону, близкому к линейному).

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.

Таблица 7.2

Проекции 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
<i>B</i>	78,4	32,1	243,8	70,8	397,7	93,2	537,4	109,8
<i>P</i>	26	9,4	73,2	23,1	123,3	35,4	175,2	46,6
<i>As</i>	15,9	3,7	37,7	8,4	58,4	12,5	78,9	16,3
<i>Sb</i>	14	2,4	30,8	5,1	45,7	7,4	59,9	9,5

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

$$N_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\Delta R_p}} \quad (7.7)$$

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.

7.3. 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 $3 - 6^\circ$. 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. 7.2. 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.



Рис. 7.2. Распределения внедренных атомов при эффекте 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:

$$R_{\max} = \frac{1}{n_0} \int_0^{\varepsilon} \frac{dE}{S_e(E)} = \frac{2E_1^{0,5}}{n_0 k_e^*}. \quad (7.8)$$

7.4. 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:

$$N(\varepsilon) = E_0/(2E_d). \quad (7.9)$$

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 определенных условиях может сократить число дефектов решетки и восстановить её почти до первоначального состояния. Так как при увеличении температуры внедренные примеси диффундируют в подложке, температура термообработки должна быть минимальной. Дефекты решетки, 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 решетки и концентрацией вакансий, увеличенной по сравнению с равновесной. Эта зависи-

мость 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.

7.5. 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 p - n -переходы в материалах, для которых диффузионные методы неприменимы, например, в алмазе, сульфидах кадмия и цинка и других.

8. ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Ионная бомбардировка твердого тела сопровождается многочисленными физическими и химическими эффектами, которые могут быть использованы при синтезе, 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 изготовления 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 SiO_2 - Si и др.

8.1. Ионно-лучевые установки

В современных ионно-лучевых установках ионы ускоряются до энергий 20 - 450 кэВ, перспективны и установки с энергией до 1 МэВ. На рис. 8.1 показана структурная схема ионно-лучевой установки.

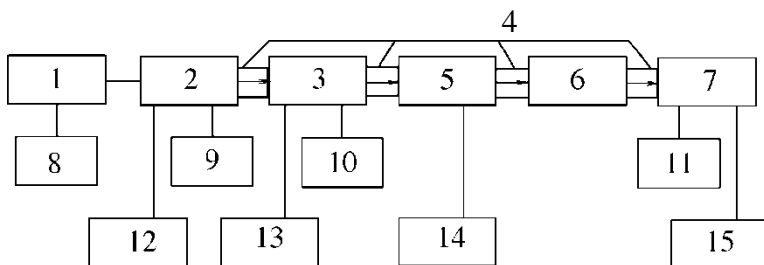


Рис. 8.1. Структурная схема ионно-лучевой установки:
 1- система напуска рабочего вещества; 2 - ионный источник;
 3 - система формирования ионного пучка; 4 - ионопровод;
 5 - сепаратор ионов; 6 - система ускорения; 7 - камера с образцами;
 8 - 11 - системы откачки; 12 - 14 - блоки питания;
 15 - устройство 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.

8.1.1. 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.

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 адсор-

бирова́нного атома I меньше работы выхода электрона из материала основы φ , то степень ионизации будет описываться экспоненциальным уравнением вида:

$$\alpha = \frac{N_+}{N_0} = A \exp \left[- \frac{e(\varphi - I)}{kT} \right] \quad (8.1)$$

Конструкция такого источника может состоять из прямо-накального вольфрамового керна, выполненного из ленты. На ленту помещают запас щелочного металла или соединения его в виде соли. Обычно на поверхности ионизатора наносят галогидную соль щелочного или щелочноземельного 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 рениевой 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^{-4} - 10^{-3} А/см².

Наиболее обширный класс **ионных 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.

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.

В *ионном источнике с дуговым разрядом* 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 заземлён. 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 объёмный 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.

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. 8.2.

Рабочий газ или пары вещества поступают через трубку напуска 1 в рабочую камеру. Термокотод 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 тупоплавкой 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. Достигаемая 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.

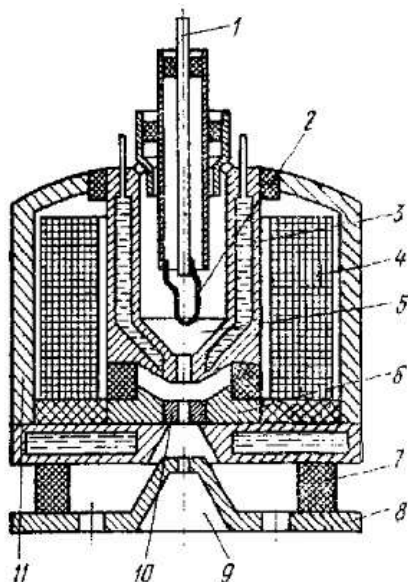


Рис. 8.2. Конструкция дуоплазматрона: 1- система напуска газа; 2 - термокатод; 3 - промежуточный электрод; 4 - обмотка электромагнита; 5 - область начального зажигания разряда; 6 - анод; 7 - изолятор; 8 - вытягивающий электрод; 9 - выход ионного пучка; 10 - тугоплавкая вставка; 11 - корпус

Газоразрядный источник типа Пеннинга может быть как с термокатодом так и с использованием высоковольтного тлеющего разряда без термокатада.

На рис. 8.3 представлена схема одного из типов пеннинговских источников с горячим катодом.

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.

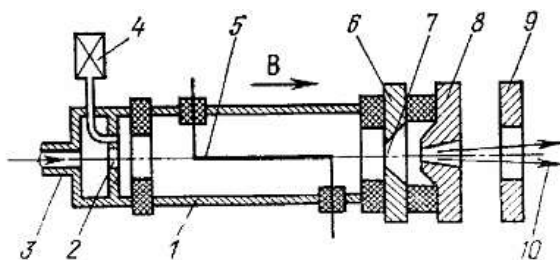


Рис. 8.3. Источник ионов типа источника Пеннинга: 1 - камера; 2 - система напуска газа; 3 - диафрагма; 4 - манометрический преобразователь; 5 - термокатод; 6 - антикатод; 7 - отверстие для формирования электронного пучка; 8 - вытягивающий электрод; 9 - ускоряющий электрод; 10 - поток ионов

В 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.

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 твёрдых 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.

Существуют два типа **полевых ионных 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. 8.4.

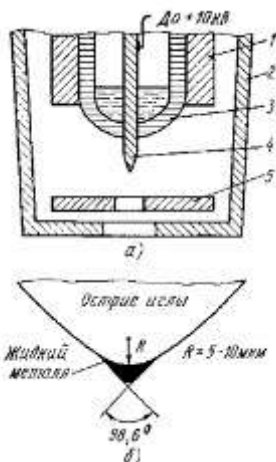


Рис. 8.4. Полевой ионный источник с жидким металлом:
а - общая схема; б - укрупненный вид иглы

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. Ис-

точник 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/(см·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 В/см. В качестве эмиттера источника используется игла из монокристаллического иридия, ось которого совпадает с кристаллографическим направлением $\langle 110 \rangle$. Острие 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.

8.1.2. 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.

8.1.3. 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

$$R = \frac{M_i v_i}{qB} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2M_i U}{q}}, \quad (8.2)$$

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. 8.5. С увеличением отношения массы иона к его заряду радиус описываемой окружности возрастает. Выделение нужных ионов осуществляется с помощью диафрагмы на выходе из сепаратора.

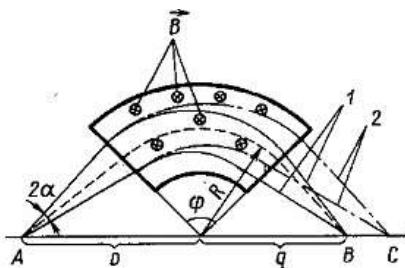


Рис. 8.5. Траектории движения ионов в поперечном магнитном поле

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.

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.

8.1.4. 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 *дифракционные, иммерсионные и одиночные линзы*. На рис. 8.6 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 ионами электронами.

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.

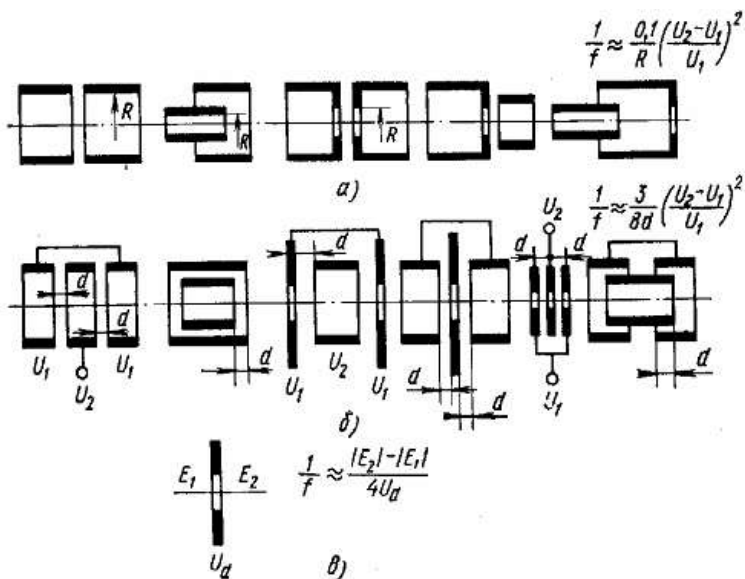


Рис. 8.6. Конструктивные схемы имерсионных (а), одиночных (б) линз и плоской диафрагмы (в): f - фокусное расстояние; U_1 и U_2 - напряжения на электродах; E - напряженность электрического поля

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 быстроедействие ионно-лучевой системы (скорость сканирования).

8.1.5. Вакуумные системы, приемные камеры, устройства контроля

Для проведения ионно-лучевых процессов необходим вакуум порядка 10^{-5} - 10^{-4} 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.

8.2. Ионное легирование материалов

8.2.1. Особенности технологии ионного легирования

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 автоматиза-

ции 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.

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.

Основные задачи технологического применения ионного легирования заключаются в точности определения и предсказания профилей распределения имплантированных ионов и пробега 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.

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

- остросфокусированных ионных пучков;

- возможность получения скрытых в глубине слоев, 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:

1. **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 дей-

ствием 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.

2. 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:

$$N_x = \frac{N_2}{2S} \left(\operatorname{erf} \frac{x - R_p + Q \frac{S}{N_2}}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right) - \operatorname{erf} \frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p} \quad (8.3)$$

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:

$$N_x = \frac{N_2}{2S} \left(\operatorname{erfc} \frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right), \quad (8.4)$$

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 (8.4) при $x = 0$. Эта максимальная концентрация не зависит от дозы имплантированных ионов Q и приближенно равна N/S .

3. Нагрев материала мишени. При больших дозах облучения становится существенным нагрев материала мишени

под действием ионной бомбардировки. Плотность мощности при ионной бомбардировке равна

$$q = \frac{E_0 j_i}{e}, \quad (8.5)$$

где E_0 - энергия ионов; j_i - плотность ионного тока.

Вся тепловая энергия выделяется в слое толщиной порядка проекции траекторного пробега. Глубина прогреваемого 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:

$$T = \frac{2q\sqrt{a\tau}}{\sqrt{\pi K}} + T_0 \quad (8.6)$$

где T_0 - начальная температура образца, a - коэффициент температуропроводности, K - коэффициент теплопроводности.

Оценки по уравнению (8.6) 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:

$$T = \left(\frac{q}{2\varepsilon\sigma} + T_0 \right), \quad (8.7)$$

где ε - степень черноты материала; σ - постоянная Стефана-Больцмана.

В рассматриваемом режиме температура пластины составляет несколько сотен градусов, и процессы диффузии становятся существенными.

8.2.2. Установки для ионного легирования

Отечественная промышленность выпускает несколько типов установок для ионного легирования материалов: ИЛУ, «Везувий», «Полла», «Лада» и другие. Технические характеристики некоторых из них приведены в таблице. Неоднородность легирования в промышленных установках составляет 2 – 4 %.

Установки ионного легирования

Марка	Диапазон энергий, кэВ	Сила тока ионов, мА	Система сепарации	Потребляемая мощность, кВт
«Везувий - 1»	20-200	200 (P ⁺) 20 (B ⁺)	Электромагнит	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 ⁺)	Электромагнит	15
«Везувий - 8М»	10-125	10·10 ³ (P ⁺) 210 ³ (B ⁺)	Электромагнит	25
«Везувий - 9»	25-600	10 ⁴ (P ⁺)	Электромагнит	15
«ИЛУ - 3»	20-80	300 (P ⁺)	Электромагнит	45
«ИЛУ - 4»	20-100	3·10 ⁴ (P ⁺)	Электромагнит	45
«Иолла - 2»	50-80	100	Электромагнит	6
«Иолла - 3»	10-150	10 ⁴ (P ⁺)	Электромагнит	10

8.2.3. 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 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. 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.

Оптимальным для изоляции слоев с толщиной до 0,3 мкм является диапазон доз 1 - 10 мкКл/см³ 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/см³. При толщине менее 0,1 мкм использовалась изоляция ионами аргона с энергией 100 кэВ и дозой 0,005 мкКл/см³.

Ионно-лучевая технология изготовления полупроводниковый резисторов. Резисторы формируются путем 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, Ne, H, Si такой дозой, чтобы получить кристаллическую структуру, насыщенную радиационными дефектами, но не аморфизированную. Сопротивление резистивных слоев 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 тонкопленочной технологии, либо с использованием в качестве резистивного слоя объема полупроводника. В технологии ИС в качестве резистивных слоев применяются нанесенные различными методами пленки металла, силицидов и керметов. При выборе резистивного ма-

териала учитываются следующие факторы: удельное поверхностное сопротивление, термостабильность, температурный коэффициент сопротивления, диапазон рабочих частот. В настоящее время разработан технологический процесс изготовления тонкопленочных 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.

8.3. 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:

$$d_{\min} = \left(\frac{16}{3\pi^2} c^{2/3} \frac{I_0}{\beta} \right)^{3/8}, \quad (8.8)$$

где β - яркость ионного источника, А/(м²·ср); I_0 - сила тока луча, А; c - коэффициент сферической аберрации фокусирующей системы.

Источники на основе легких ионов водорода или гелия имеют малую яркость - порядка 10⁶ А/(м²·ср), 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 10¹⁰ А/(м²·ср) и более.

Тонкий пучок ионов имеет значительно более слабое угловое рассеяние в мишени, чем пучок электронов, и обеспечи-

вает 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 (ИЛЛ) 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 мм^2 , 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 см^2 , 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 мишене. 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 $0,5 - 1 \text{ мкм}$.

Схемы установок ИЛЛ приведены на рис. 8.7

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.

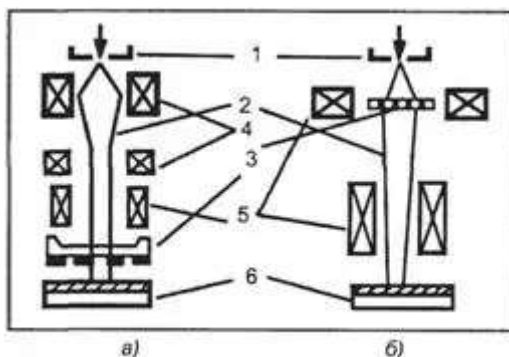


Рис. 8.7. Схема установок ИЛЛ с использованием ионно-проекционной системы (а) и коллимированных ионных пучков (б): 1 – источник ионов, 2 – ионный пучок, 3 – ионшаблон, 4 – коллимирующая система, 5 – фокусирующая система, 6 - подложка

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.

Контрастность ионного резиста определяется обратной величиной десятичного логарифма отношения чувствительности к пороговой дозе, необходимой для начала процесса экспонирования.

Разрешающая способность резистов - минимальную ширину линии, которая может быть проявлена в резистивном слое заданной толщины.

Изменение условий облучения, толщины резиста и времени проявления позволяет достичь высокой разрешающей способности (в несколько десятков нанометров).

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.

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.

Рассмотрим влияние ионной бомбардировки на травление пленок диоксида кремния, применяемых в изделиях микроэлектроники в качестве диэлектрических масок. Скорость травления диоксида 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 диоксида 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 диоксида 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

щую 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.

8.4. Модификация твердого тела при ионной бомбардировке

8.4.1. 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).

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 ориен-

тированы 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*, *B-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 удастся 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 со-

стоит в том, что при бомбардировке ионами P , B , 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.

8.4.2. Ионный синтез. Ионная металлургия. Ионная эпитаксия

Пусть в мишень, состоящую из атомов B , имплантировано большое количество ионов A . Если в природе при нормальных условиях существует соединение AB , 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**.

Ионный синтез, как технологический метода создания тонких слоев химических соединений, обладает рядом достоинств. 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 P 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.

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 $300\text{ }^{\circ}C$ 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 $310\text{ }^{\circ}C$ 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 концен-

трации 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 структурыготавливаемых 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.

8.5. Ионное распыление материалов

Ионное распыление – метод вакуумного напыления, в котором осаждаемый атомарный поток получают в результате бомбардировки ускоренными ионами поверхности исходного напыляемого материала и последующей инжекции распыленных атомов в паровую фазу.

Характер взаимодействия бомбардирующих ионов с поверхностью твердого тела определяется их энергией. При энергиях меньших 5 эВ, взаимодействие ограничивается физически и химически адсорбированными слоями, вызывая их десорбцию и обуславливая протекание различных химических реакций. При кинетических энергиях, превышающих энергию связи атомов в кристаллической решетке, бомбардировка вызывает разрушение приповерхностного слоя и выброс атомов в паровую фазу (распыление). Минимальная энергия ионов, приводящая к выбиванию атомов с поверхности, называется пороговой энергией распыления. Значение ее находится в интервале энергий от 15 до 30 эВ.

Характеристикой процесса ионного распыления служит коэффициент распыления, определяемый средним количеством атомов мишени, выбитых с бомбардируемой поверхности падающим ионом.

$$K_s = \frac{N_p}{N} \quad (8.9)$$

где K_s - коэффициент распыления,
 N_p - количество выбитых (распыленных) атомов мишени,
 N - количество бомбардирующих ионов.

Коэффициент распыления определяется энергией и направлением падения ионов, природой взаимодействующих материалов, кристаллографической структурой и атомным строением бомбардируемой поверхности.

При возрастании энергии бомбардирующих ионов свыше 100 эВ коэффициент распыления резко увеличивается и в области 5 - 10 кэВ выходит на насыщение. Дальнейшее повышение кинетической энергии свыше 100 кэВ приводит к снижению распыления, вызванному радиационными эффектами и внедрениями ионов в кристаллическую решетку. Диапазон энергий бомбардирующих ионов, представляющих интерес при получении покрытий, находится в пределах от 300 до 5000 эВ. Распыление вызывается, в основном, передачей импульса энергии от бомбардирующей частицы атомам кристаллической решетки в результате серии последовательных столкновений. Передача импульса от падающих ионов происходит в первых атомных слоях решетки, например, при бомбардировке поверхности поликристаллической меди ионами аргона с энергией 1000 эВ глубина проникновения равнялась трем атомным слоям. Энергия распыления атомов значительно превышает кинетическую энергию испаренных атомов и составляет 0,1 - 100 эВ. Распыление сопровождается эмиссией вторичных электронов, которые ускоряются в электрическом поле, вызывая дополнительную ионизацию.

Наибольшее распространение в качестве источника бомбардирующих ионов получил инертный газ аргон, имеющий массу, достаточную для распыления, и характеризующийся относительно малой стоимостью. Влияние температурных условий незначительно. Распыление металлов в твердом и расплавленном состояниях практически не различается. Исключение составляет область температур, при которых переход атомов в паровую фазу путем испарения становится существенным и превышает распыление. Необходимо заметить, что с увеличением угла падения ионов (относительно нормали к поверхности) эффективность распыления возрастает. В зави-

симости от схемы распылительного устройства напыление происходит при давлении остаточных газов от 10 до 10^{-2} Па.

В установках вакуумного напыления поток распыленных атомов создается либо в результате бомбардировки ионами плазмы разряда поверхности исходного напыляемого материала, находящегося под отрицательным потенциалом или являющегося катодом тлеющего разряда (*ионно-плазменное распыление*, разновидностями которого являются *катодное* (физическое и реактивное), а также *ВЧ-* и *магнетронное распыления*), либо за счет бомбардировки ускоренными ионами, эмитированных автономным источником (*ионно-лучевое распыление*). В ионно-лучевом методе для распыления используется пучок частиц высокой энергии. Для создания таких потоков частиц с контролируемой энергией разработаны системы ионных пушек.

Распыление материалов под действием ионной бомбардировки широко используется для получения тонких плёнок. Особенно эффективно использование ионного распыления для «сухого» процесса травления.

8.5.1. Ионное травление

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. 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 желателно выбирать материал маски с минимальной скоростью ионного травления по сравнению с мишенью.

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 мА/см 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*, *SiO₂*, *Si₃N₄*, *W*, *Mo*, *Ti*, *Ta* осуществляют чаще в плазме *CF₄*; *Al* - в *CCL₄* и *BCL₃*. Продуктами реакций являются летучие фтористые и хлористые соединения, например, *SiF₄*. 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. 8.8).

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 *CF₄*, то на поверхности трубы возникает защитная плёнка фторида алюминия, препятствующая её разрушению. При давлении рабочего газа 30 - 300 Па время жизни радикалов *CF₃* и *F* составляет 0,3 с, что при коэффициенте диффузии 50 см²/с обеспечивает диф-

фузионную длину их движения порядка 250 мкм. 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.

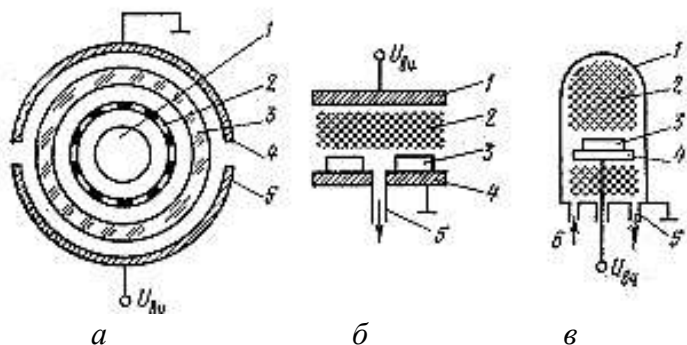


Рис. 8.8. Схемы устройств для ионно-плазменного травления:
a - трубчатый реактор с перфорированной алюминиевой трубой: 1 - обрабатываемое изделие; 2 - перфорированная труба; 3 - кварцевый баллон; 4 - заземлённый электрод; 5 - высокочастотный электрод); *б* - плоский реактор с изделиями на заземлённом 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 - на пуск 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 мкм. 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, Si_3N_4 - 100, SiO_2 - 20 нм/мин.

8.5.2. 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.

Установка ионно-лучевого распыления представлена на рис. 8.9.

Установка содержит источник ионов на основе двухкададного самостоятельного разряда с холодным полым катодом 1 и модифицированный вариант источника ионов Кауфмана с открытым торцом 2. Источник ионов 1 служит для распыления пучком ионов аргона с энергией 0,8 кэВ и плотностью тока 0,3 мА/см² мишени 3 чистотой не хуже 99,8 %. По направлению потока распыляемого материала установлены подложки, закрепленные на четырех позициях вращающегося держателя 4. Поток ионов аргона со средней энергией 80 эВ и плотностью

тока $0,45 \text{ мА/см}^2$ из источника ионов 2 служит для очистки и активации поверхности рабочей подложки в течение 2 минут перед нанесением пленки. Источник ионов 2 во время нанесения пленки отключается, подача аргона через него прекращается, а термокатод используется для нагрева поверхности рабочей подложки.

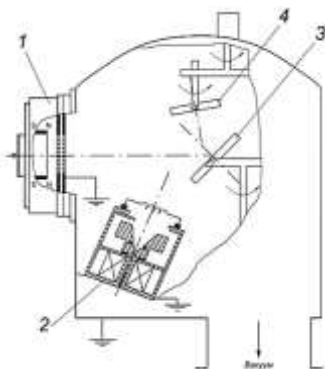


Рис. 8.9. Схема установки ионно-лучевого распыления

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, характеризующая степень ионизации a потока, также высока ($a = 60 - 95 \%$). 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 явля-

ется 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 макрокапельной 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 като-

да. 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, перемикающего 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 вза-

имодействия азимутального холловского тока в ней с радиальной компонентой магнитного поля.

8.5.3. Ионно-плазменное распыление

Ионно-плазменные методы получили широкое распространение в технологии электронных средств благодаря своей универсальности и ряду преимуществ по сравнению с другими технологическими методами. Универсальность определяется тем, что с их помощью можно осуществлять различные технологические операции: формировать тонкие пленки на поверхности подложки, травить поверхность подложки с целью создания на ней заданного рисунка интегральной микросхемы, осуществлять очистку поверхности. К преимуществу ионно-плазменных методов относится высокая управляемость процессом; возможность получения пленок тугоплавких материалов, а также химических соединений и сплавов заданного состава; лучшая адгезия пленок к поверхности и так далее.

Суть методов ионно-плазменного напыления тонких пленок заключается в обработке поверхности мишени из нужного вещества ионами и выбивании атомов (молекул) из мишени. Энергия ионов при этом составляет величину порядка сотен и тысяч электрон-вольт. Образующийся атомный поток направляется на подложку, где происходит конденсация вещества и формируется пленка. Различают ионно-лучевое распыление, осуществляемое бомбардировкой мишени пучком ускоренных ионов, сформированным в автономном ионном источнике, и собственно ионно-плазменное распыление, при котором мишень является одним из электродов в газоразрядной камере и ее бомбардировка осуществляется ионами, образующимися в результате газового разряда.

Для распыления мишени используются ионы инертных газов (обычно аргон высокой чистоты). Источником ионов служит либо самостоятельный тлеющий разряд, либо плазма несамостоятельного разряда (дугового или высокочастотного).

В настоящее время в производстве применяют различные процессы распыления, отличающиеся:

- характером питающего напряжения (постоянное, переменное, высокочастотное);

- способом возбуждения и поддержания разряда (автотермоэлектронная эмиссия, термоэлектронная эмиссия, магнитное поле, электрическое высокочастотное поле);

- количеством электродов в газоразрядной камере (двухэлектродные, трехэлектродные и многоэлектродные системы).

Ионно-плазменный метод включает в себя катодное, диодное магнетронное и ВЧ-распыление. **Катодное распыление** заключается в следующем. Положительные ионы инертного газа, источником которого является плазма тлеющего разряда, ускоряются в электрическом поле и бомбардируют катод, вызывая его распыление. Распыленные атомы попадают на подложку и оседают в виде тонкой пленки.

Диодная установка для напыления состоит из двух плоских электродов, расположенных параллельно и отстоящих друг от друга на расстоянии 5 - 15 см. Катод изготавливают из напыляемого материала. Он электрически изолирован и соединен с отрицательным полюсом высоковольтного выпрямителя. Анод, он же и подложкодержатель, обычно находится под потенциалом земли. Камера предварительно вакуумируется до 10^{-3} Па и на катод подается потенциал 3 - 5 кВ. При определенном напряжении, которое зависит от геометрии электродов, расстояния между ними и давления газа, происходит пробой и возбуждается в аргоне тлеющий разряд постоянного тока. Положительные ионы, ускоренные в прикатодной области, бомбардируют и распыляют поверхность катода – напыляемого материала. Поток распыленных атомов осаждается на подложке в виде тонких пленок. Незначительные скорости осаждения (0,01 мкм/мин), обусловлены низкой плотностью ионного тока на катоде и невысокий вакуум ограничивают применение метода. Кроме того, эмитированные катодом и ускоренные в электрическом поле (2 - 5 кэВ) электроны интен-

сивно бомбардируют анод и размещенные на нем подложки, вызывая их перегрев и радиационные дефекты в структуре.

Конструкция установки для катодного распыления, изображенной на рис. 8.10, состоит из газоразрядной камеры 1, в которую вводится рабочий газ (обычно аргон) под давлением 1 - 10 Па; катода 2, выполняющего функцию распыляемой мишени; анода 3 и закрепленной на ней подложки 4. Между анодом и катодом подается постоянное напряжение величиной несколько киловольт, обеспечивающее создание в межэлектродном пространстве электрического поля напряженностью порядка 0,5 кВ/см. Анод заземлен, а отрицательное напряжение к катоду подается через изолятор 5. Чтобы исключить загрязнение стеклянного колпака камеры, вблизи катода закрепляют экран 6.

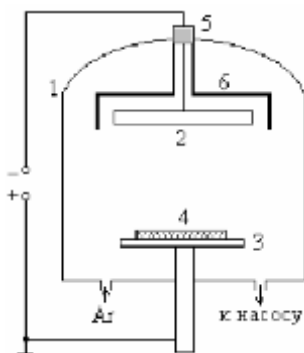


Рис. 8.10. Схема установки для катодного распыления

Электрическое поле, существующее между катодом и анодом, ускоряет электроны, образующиеся в межэлектродном пространстве в результате фотоэмиссии из катода, автоэлектронной (полевой) эмиссии, воздействия космического излучения или других причин. Если энергия электронов превышает энергию ионизации молекул рабочего газа, то в результате столкновения электронов с молекулами газа возникает газовый разряд, то есть образуется газоразрядная плазма. Для того что-

бы электрон мог набрать необходимую для ионизации газа энергию, ему требуется обеспечить минимально необходимую длину свободного пробега. Только при этом условии электрон, двигаясь без столкновений, способен увеличить свою энергию до нужной величины.

Однако если длина свободного пробега электронов становится сравнимой с расстоянием между катодом и анодом, то основная часть электронов будет пролетать межэлектродное пространство без столкновений с молекулами рабочего газа. Газоразрядная плазма погаснет. Эти два фактора и определяют нижний и верхний пределы давлений газа в камере.

Образующаяся в результате газового разряда плазма состоит из электронов, ионов и нейтральных молекул рабочего газа. Ионы под воздействием электрического поля ускоряются и бомбардируют катод-мишень. Если энергия ионов превышает энергию связи атомов мишени, то происходит ее распыление. Кроме выбивания атомов с поверхности мишени, ионы способны выбить из нее вторичные электроны (вторичная электронная эмиссия). Эти вторичные электроны ускоряются и ионизируют молекулы рабочего газа; образующиеся при этом ионы бомбардируют мишень, вызывая вторичную электронную эмиссию, и процесс повторяется. Таким образом, газовый разряд поддерживает сам себя и поэтому называется самостоятельным тлеющим разрядом.

С повышением тока, протекающего через газоразрядную плазму, увеличивается плотность ионного потока и интенсивность распыления мишени. При некоторой плотности потока, зависящей от условий охлаждения мишени, начинает проявляться термоэлектронная эмиссия. Ток в разряде возрастает, а сам разряд становится несамостоятельным, приобретая характер дугового разряда.

Для предотвращения перехода самостоятельного тлеющего разряда в дуговой высоковольтный источник питания должен иметь ограничения по мощности, а мишень интенсивно охлаждаться.

Для описания процессов катодного распыления мишени используют модели, основанные на двух механизмах. Согласно первому механизму распыленные атомы возникают в результате сильного локального разогрева поверхности мишени самим падающим ионом (модель «горячего пятна») или быстрой вторичной частицей (модель «тепловой клина»). Вторым механизмом является передача импульса падающего иона атомам решетки материала мишени, которые, в свою очередь, могут передать импульс другим атомам решетки, вызвав тем самым каскад столкновений (модель столкновений).

Для повышения чистоты получаемой на подложке пленки процесс ионно-плазменного распыления необходимо проводить при как можно меньшем давлении рабочего газа. Однако понижение давления приводит к тому, что при большой длине свободного пробега электронов вероятность их столкновения с атомами рабочего газа становится ничтожно малой, и газовый разряд гаснет. Поэтому для поддержания разряда в камере и обеспечения распыления мишени при низких давлениях необходимы специальные меры.

Одним из вариантов решения проблемы является применение *трехэлектродной системы распыления*, изображенной на рис. 8.11. В данной системе имеются три независимо управляемых электрода: термокатод, анод и распыляемая мишень, потенциал которой относительно термокатада составляет несколько киловольт.

По достижении в камере вакуума порядка 10^{-4} Па термокатод разогревают и в камеру через натекаТЕЛЬ подают инертный газ при давлении 0,05 - 1 Па. В результате термоэлектронной эмиссии с катода будут интенсивно испускаться электроны, ускоряющиеся вертикальным электрическим полем. При напряжении между термокатодом и анодом порядка 100 В возникает самостоятельный газовый разряд, при этом разрядный ток достигает нескольких ампер. Мишень, имеющая отрицательный потенциал относительно катода, оттягивает на себя значительную часть ионов, образующихся в газовом разряде, и ускоряет их.

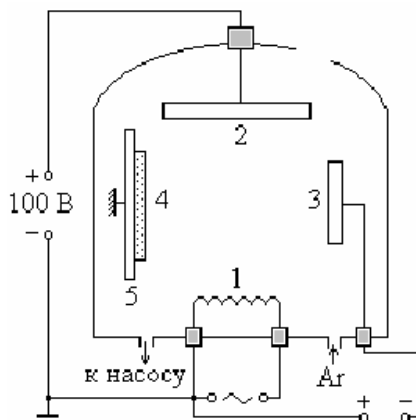


Рис. 8.11. Трехэлектродная система распыления:
 1 – термокатод; 2 – анод; 3 – мишень; 4 – подложка;
 5 – подложкодержатель

В результате бомбардировки мишени ионами происходит ее распыление, и распыленные атомы осаждаются на подложке, формируя тонкую пленку. Такие трехэлектродные системы, в которых электрические цепи разряда и распыления разделены и управляются независимо друг от друга, обеспечивают гибкость управления процессом. Скорость осаждения составляет единицы нанометров в секунду, что в несколько раз превышает аналогичный показатель для двухэлектродной схемы катодного распыления.

Дальнейшее развитие трехэлектродных систем распыления привело к использованию автономных ионных источников. Ионный источник представляет собой газоразрядную камеру с термокатодом, в которую подается рабочий газ под давлением порядка 0,5 Па, что обеспечивает высокую концентрацию ионов. Газоразрядная камера отделена от камеры осаждения калиброванными отверстиями, благодаря чему обеспечивается перепад давлений, и давление в камере осаждения, где расположены мишень и подложка, составляет около 0,015

Па. Часть ионов поступает через отверстия в камеру осаждения, ускоряется и распыляет мишень. Такая конструкция позволяет увеличить скорость распыления мишени и повысить чистоту осаждаемых на подложке пленок.

Рассмотренные выше методы получения тонких пленок используют постоянные напряжения, прикладываемые к электродам системы распыления мишени. Это позволяет распылять мишени только из электропроводящих или полупроводниковых материалов. Если мишень выполнена из диэлектрика, то при ее бомбардировке положительно заряженными ионами на ней очень быстро будет накапливаться положительный заряд. Этот заряд создаст электрическое поле, которое будет тормозить бомбардирующие мишень ионы. Распыление мишени очень быстро прекратится.

Для распыления диэлектрической мишени необходимо между анодом и катодом-мишенью подавать *переменное ВЧ-напряжение*. В этом случае мишень поочередно будет обрабатываться потоками электронов и положительно заряженных ионов. При отрицательном потенциале на мишени будет происходить ее распыление ионами, а при положительном потенциале – нейтрализация заряда потоком электронов. Это в принципе позволяет распылять мишени из диэлектрических материалов, однако эффективность такого метода распыления будет невысокой.

Эффективность распыления можно значительно повысить, если между анодом и катодом - мишенью подать переменное напряжение частотой порядка 10 МГц (обычно используют частоту 13,56 МГц, разрешенную для технологических установок, работающих в этом частотном диапазоне). Повышение эффективности при высокочастотном распылении объясняется следующим образом. Масса электронов значительно меньше массы ионов. Поэтому, обладая значительно большей подвижностью, электроны успевают следовать за быстроменяющимся полем, переходя с одного электрода на другой. Ионы, будучи гораздо менее подвижными, не успевают заметно перемещаться в межэлектродном пространстве, в результате

чего там образуется объемный положительный заряд ионов. Кроме того, количество электронов, поступающих на мишень за полпериода, значительно превышает то количество, которое необходимо для нейтрализации заряда ионов на мишени. В результате на диэлектрической мишени скапливается отрицательный заряд электронов. Все это приводит к появлению в межэлектродном пространстве дополнительного электрического поля, которое способно ускорить часть ионов до больших энергий, что и увеличивает эффективность распыления мишени.

Следует отметить еще одно важное обстоятельство. В условиях высокочастотного разряда заряженные частицы (электроны и ионы) совершают колебательное движение с амплитудой A , равной $A = \mu E_0 / \omega$, где μ - подвижность частицы, зависящая от давления газа; E_0 - амплитуда напряженности переменного электрического поля; ω - циклическая частота питающего напряжения.

Если расстояние между электродами превышает амплитуду A , то на электроды поступают только те частицы, которые находятся от электрода на расстоянии, не превышающем A . При этом существенно, что в средней части разряда электроны совершают осциллирующие движения, эффективно ионизируя газ, поэтому высокочастотный разряд может существовать при более низких давлениях, и надобность в сложной трехэлектродной системы отпадает.

Благодаря пониженному давлению в газоразрядной камере, высокочастотные системы с успехом используют для распыления не только диэлектрических мишеней, но и мишеней из металлов и полупроводников.

Системы ВЧ-распыления бывают ассиметричные и симметричные. В ассиметричной ВЧ-системе 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. 8.12. На рис. 8.12, *a* изображён дисковый электрод, расположенный концентрически внутри кольцевого электрода такой же площади, причём оба электрода закрыты

одним диском распыляемого диэлектрика. В конструкции, показанной на рис. 8.12, б, возможно как прямое распыление самих электродов, так и распыление диэлектрических мишеней, помещаемых на поверхность этих электродов.

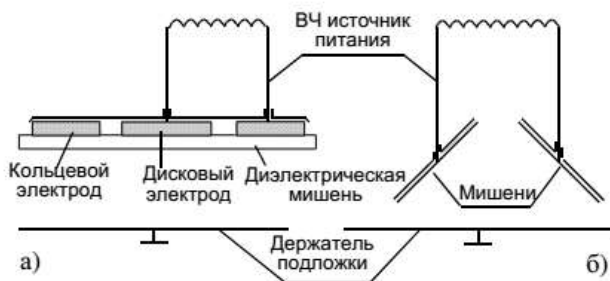


Рис. 8.12. Симметричные системы ВЧ-распыления

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.

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.

Стремление снизить давление рабочего газа в камере и увеличить скорость распыления мишеней привело к созданию метода магнетронного распыления.

Магнетронное распыление относится к методам распыления материалов ионной бомбардировкой. Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля.

Схема магнетронной распылительной системы приведена на рис. 8.13.

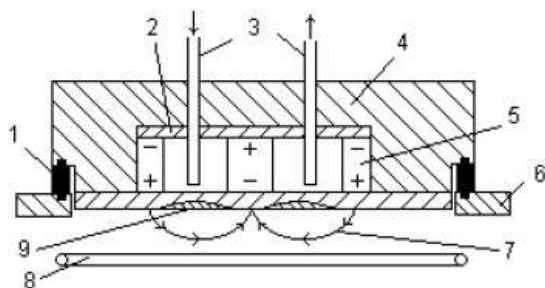


Рис. 8.13. Установка магнетронного распыления: 1 – изолятор; 2 – магнитопровод; 3 – система водоохлаждения; 4 – корпус катодного узла; 5 – постоянный магнит; 6 – стенка вакуумной камеры; 7 – силовые линии магнитного поля; 8 – кольцевой водоохлаждаемый анод; 9 – зона эрозии распыляемого катода

Основными элементами являются плоский катод, изготовленный из напыляемого материала, анод, устанавливаемый по периметру катода, магнитная система, обычно на основе постоянных магнитов, и система водоохлаждения. Силовые линии магнитного поля, замыкаясь между полюсами, пересекаются с линиями электрического поля. Принцип действия установки основан на торможении электронов в скрещенных электрических и магнитных полях.

Известно, что на заряд, движущийся в электромагнитном поле, действует сила Лоренца, направление которой, по правилу сложения сил, зависит от направления ее составляющих. При этом, часть силы Лоренца, обусловленная действием магнитного поля, не совершает работы, а лишь искривляет траекторию движения частицы, заставляя ее двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной V и B .

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля к распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Электрон циркулирует в электромагнитной ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых он потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости осаждения покрытия.

Таким образом, в магнетронных устройствах при одновременном действии электрических и магнитных полей изменяется траектория движения электрона. Электроны, эмитированные катодом, и образующиеся в результате ионизации, под

действием замкнутого магнитного поля локализируются непосредственно над поверхностью распыляемого материала. Они попадают в ловушку, образуемую, с одной стороны, действием магнитного поля, заставляющего двигаться электроны по циклоидальной траектории вблизи поверхности, с другой – отталкиванием их электрическим полем катода в направлении к аноду. Вероятность и количество столкновения электронов с молекулами аргона и их ионизация резко возрастают. Из-за неоднородности действия электрических и магнитных полей в прикатодной зоне интенсивность ионизации в различных участках различна. Максимальное значение наблюдается в области, где линии индукции магнитного поля перпендикулярны вектору напряженности электрического поля, минимальное – где их направление совпадает. Поверхность мишени, расположенная между системами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы. Локализация плазмы в прикатодном пространстве позволила получить значительно большую плотность ионного тока при меньших рабочих давлениях, и, соответственно, обеспечить высокие скорости распыления.

Магнетронные устройства относятся к низковольтным системам ионного распыления. Напряжение источника питания постоянного тока не превышает 1000 - 1500 В. При подаче отрицательного потенциала на катод, между электродами возбуждается аномальный тлеющий разряд в среде аргона. Наличие магнитной ловушки обеспечивает при одних и тех же давлениях газа возникновение разряда при более низких напряжениях по сравнению с диодными системами. Напряжение разряда составляет 300 - 700 В.

Магнетрон может работать в диапазонах давления рабочего газа от 10^{-2} до 1 Па и выше. Давление газа и индукция магнитного поля оказывают значительные влияния на характеристики разряда. Понижение давления обуславливает повышение рабочих напряжений. В то же время для каждой магнетронной системы существует некоторый интервал значений,

обычно 10^{-1} – 1 Па, в котором колебание давления не оказывает существенного влияния на изменение параметров разряда. Воздействие магнитного поля аналогично действию газовой среды. Поэтому низкие рабочие давления в магнетронах обеспечивают увеличение индукции магнитного поля, величина которой у поверхности катода составляет 0,03 - 0,1 Тл. Повышение удельной мощности способствует стабилизации разряда в области низких давлений.

Преимущества метода:

- высокая скорость распыления при низких рабочих напряжениях (600 - 800 В) и при небольших давлениях рабочего газа ($5 \cdot 10^{-1}$ - 10 Па),
- отсутствие перегрева подложки,
- малая степень загрязнения пленок ,
- возможность получения равномерных по толщине пленок на большей площади подложек.

Несколько десятилетий исследований процессов магнетронного распыления позволили создать множество конструкций, но большей популярностью пользуются планарные прототипы на магнитомягком основании подложки.

Особый ферромагнитный сплав намагничивается и переходит в нейтральное состояние практически одновременно с инициированием и отключением магнитов. Параллельно создается разность потенциалов за счет подачи на катод напряжения до 1000 В. Периферические магниты относительно заряженного катода располагаются таким образом, чтобы силовые линии закручивали в спираль ионный факел от мишени. Это позволяет за счет многочисленных столкновений с молекулами заполняющего газа ступенчато ионизировать напыляемые ионы, исключая из технологического процесса стадию ориентирования подложки. Использование дополнительной ионизации определяет прямую зависимость параметров конденсации от силы тока и давления активной среды. Добиться прецизионного закручивания ионного факела можно лишь при постоянстве магнитных и силовых линий. Кроме того, важным параметром является стабильность плазмы, которая зависит от

электрического разряда. Таким образом, к источникам тока предъявляются чрезвычайно высокие требования к минимизации колебания выходных характеристик (погрешность не может превышать 2 %). Давление рабочей среды (как правило, инертные смеси) обычно изменяется в пределах $\pm 5\%$. Давление влияет на оптико-электрические показатели некоторых материалов. Кроме того, состав поверхностного напыленного слоя сильно зависит от химической чистоты активной среды и мишени. Таким образом, магнетронные установки требуют наличия сложных турбомолекулярных насосов непрерывного действия.

При всех положительных моментах магнетронное распыление с постоянным током не позволяет напылять оксиды с большой скоростью. Повышение производительности приводит к сильному окислению самой мишени, что сразу же делает невозможным ее использование. В этих случаях используется модифицированная технология с использованием высокочастотного тока, который препятствует изменению стехиометрического состава напыляемого материала.

В отличие от других способов нанесения тонкопленочных покрытий способ магнетронного распыления позволяет достаточно тонко регулировать толщину металлического слоя, а значит и его сопротивление, что очень важно при создании структур с определенной проводимостью.

Метод магнетронного распыления позволяет получать тонкие пленки высокого качества с рекордными физическими характеристиками (толщина, пористость, адгезия и пр.), а также проводить послойный синтез новых структур (структурный дизайн), «собирая» пленку буквально на уровне атомных плоскостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лучевые и плазменные технологии относятся к наукоемким технологиям, позволяющим осуществлять обработку материалов и формировать структуры на наноразмерном уровне и по этому признаку могут быть отнесены к нанотехнологиям.

Реализация таких технологий требует высококвалифицированных кадров, хорошо ориентирующихся в вопросах физики и химии плазменных и лучевых процессов в объеме и на поверхности и умеющих разрабатывать и прогнозировать технологические процессы лучевой и плазменной обработки самых различных материалов – металлов, полупроводников, диэлектриков, полимеров.

Учебная литература, посвященная лучевым и плазменным процессам и технологиям, практически отсутствует. В восьмидесятые годы XX века опубликован ряд монографий, в которых рассматривались основы плазменных лучевых технологий и намечены перспективы их дальнейшего использования в электронике. К сожалению, эти книги были изданы сравнительно небольшим тиражом, в настоящее время стали библиографической редкостью. В последние годы появился ряд зарубежных монографий, обобщающих последние достижения в области плазменной и лучевой обработки материалов, но они не переведены на русский язык и недоступны для широкого круга специалистов, работающих в данной области.

Предлагаемое учебное пособие призвано, в определенной мере, восполнить этот пробел.

Систематизированное рассмотрение физико-химических основ процессов плазменных и лучевых технологий, типовых установок, конкретных технологических процессов и примеров их реализации облегчит понимание и восприятие материала лекций по дисциплине «Основы лучевых и плазменных технологий», читаемых студентам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вейко, В.П. Лазерная микрообработка [Текст]: опорный конспект лекций / В.П. Вейко. - СПб.: СПбУ ИТМО, 2005. - 110 с.
2. Голишников, А.А. Плазменные технологии в нанoeлектронике [Текст]: учеб. пособие / А.А. Голишников, М.Г. Путря. - М.: МИЭТ, 2011. - 172 с.
3. Готра, З.Ю. Технология микроэлектронных устройств [Текст]: справочник / З.Ю. Готра. - М.: Радио и связь, 1991. - 528 с.
4. Ефремов, А.М. Вакуумно-плазменные процессы и технологии [Текст]: учеб. пособие / А.М. Ефремов, В.И. Светцов, В.В. Рыбкин. - Иваново, 2006. - 260 с.
5. Курносов, А.И. Технология производства полупроводниковых приборов [Текст]: учеб. пособие / А.И. Курносов, В.В. Юдин. - М.: Высш. шк., 1986. - 368 с.
6. Малышева, И.А. Технология производства интегральных микросхем [Текст]: учебник / И.А. Малышева. - М.: Радио и связь, 1991. - 344 с.
7. Рилей, Д. А. Мир микро- и нанoeлектроники: учебное пособие по современным технологиям в производстве микросистем [Текст]: в 2-х кн. / А. Д. Рилей. - Курск: Экспромт, 2009.
8. Светцов, В.И. Корпускулярно-фотонные процессы и технологии [Текст]: учеб. пособие / В.И. Светцов, С.А. Смирнов. - Иваново, 2002. - 192 с.
9. Сушков, А.Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы [Текст]: учеб. пособие / А.Д. Сушков. - СПб: Лань, 2004. - 464 с.
10. Технология СБИС [Текст]: в 2-х кн.; пер. с англ. / под ред. С. Зи.- М.: Мир, 1986.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Физические основы плазменной технологии	11
1.1. Плазма. Основные понятия и характеристики	11
1.2. Элементарные процессы в плазме	16
1.3. Газовые среды и химические реакции в плазме	21
1.4. Особенности газового разряда при низком давлении	24
1.5. Средства и способы устойчивого поддержания плазмы	26
1.6. Типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал	29
2. Процессы и технологии плазменной обработки	31
2.1. Место плазменных процессов в технологии микроэлектроники	31
2.2. Классификация плазменных технологических процессов по механизму воздействия на обрабатываемую поверхность	33
2.3. Технологические требования и параметры, характеризующие процесс травления	36
2.4. Рабочие газы для плазменного травления	38
2.5. Плазмохимическая обработка	42
2.5.1. Плазменное травление (ПТ)	42
2.5.2. Радикальное травление (РТ)	47
2.6. Ионная обработка	51
2.6.1. Ионно-плазменное травление (ИПТ)	51
2.6.2. Ионно-лучевое травление (ИЛТ)	57
2.7. Ионно-химическое (реактивное ионное) травление	63
2.7.1. Реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ)	63
2.7.2. Реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ)	66

2.8. Радиационно-стимулированное травление (РСТ)	69
2.8.1. Фотонно-стимулированное травление	72
2.8.2. Электронно-стимулированное травление	75
2.8.3. Ионно-стимулированное травление	76
3. Физические основы лазерных технологий	79
3.1. Физические принципы создания лазерного излучения	79
3.2. Устройство и принципы работы лазеров	83
3.2.1. Рабочее вещество	84
3.2.2. Создание инверсии	84
3.2.3. Условия самовозбуждения и насыщения усиления	85
3.2.4. Оптические резонаторы	86
3.2.5. Импульсная генерация, модуляция добротности и синхронизация мод	90
3.3. Свойства лазерного излучения	93
3.4. Типы лазеров	96
3.4.1. Твердотельные лазеры	96
3.4.2. Газовые лазеры	102
3.4.3. Полупроводниковые лазеры	114
3.4.4. Лазеры на красителях	115
4. Процессы и технологии лазерной обработки	117
4.1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом	117
4.2. Лазерные технологические установки	119
4.3. Термическая обработка и закалка	121
4.4. Лазерная пайка	123
4.5. Лазерная сварка	126
4.6. Лазерная резка	129
4.7. Прошивка отверстий	130
4.8. Размерная обработка материалов и получение пленок	132
4.9. Лазерные микротехнологии	133

4.10. Лазерное осаждение тонких плёнок	139
5. Физические основы электронно-лучевых технологий	141
5.1. Процессы, происходящие при бомбардировке вещества электронами, и возможности их использования в технологии	141
5.2. Движение ускоренных электронов в твердом теле	147
5.3. Взаимодействие ускоренных электронов с твердым телом	149
6. Процессы и технологии электронно-лучевой обработки	156
6.1. Общая характеристика и особенности электронно-лучевых технологий	156
6.2. Электронно-лучевые установки	158
6.2.1. Общие принципы построения электронно-лучевых установок	158
6.2.2. Источники электронов	159
6.2.3. Электронные пушки	161
6.2.4. Система обеспечения вакуума	163
6.2.5. Система сканирования	164
6.3. Термические электронные процессы и технологии	165
6.3.1. Электронно-лучевое испарение материалов (ЭЛИ)	166
6.3.2. Обработка несфокусированным пучком	172
6.3.3. Сварка электронным пучком	177
6.3.4. Термическая размерная электронно-лучевая обработка	181
6.4. Нетермические электронные процессы и технологии	184
6.4.1. Реакции, индуцированные радикалами	185
6.4.2. Электронно-стимулированное травление	188
6.4.3. Электронно-лучевая литография	189
7. Физические основы ионно-лучевых технологий	196
7.1. Движение ускоренных ионов в веществе	196

7.2. Пробеги ионов в твердом теле и их распределение	198
7.3. Взаимодействие ионов с монокристаллами. Каналирование	201
7.4. Образование радиационных дефектов при ионной бомбардировке. Отжиг радиационных дефектов	203
7.5. Изменение электрических свойств твердых тел при ионной бомбардировке	204
8. Ионно-лучевые процессы и технологии	205
8.1. Ионно-лучевые установки	205
8.1.1. Источники ионов	207
8.1.2. Система вытягивания и ускорения ионов	217
8.1.3. Система сепарации ионов	217
8.1.4. Системы фокусировки и сканирования	219
8.1.5. Вакуумные системы, приемные камеры, устройства контроля	221
8.2. Ионное легирование материалов	222
8.2.1. Особенности технологии ионного легирования	222
8.2.2. Установки для ионного легирования	227
8.2.3. Технология ионного легирования	227
8.3. Ионно-лучевая литография	230
8.4. Модификация твердого тела при ионной бомбардировке	236
8.4.1. Структурные превращения при ионной бомбардировке	236
8.4.2. Ионный синтез. Ионная металлургия. Ионная эпитаксия	239
8.5. Ионное распыление материалов	243
8.5.1. Ионное травление	245
8.5.2. Ионно-лучевые методы осаждения покрытий	250
8.5.3. Ионно-плазменное распыление	256
Заключение	271
Библиографический список	272

Учебное издание

Свистова Тамара Витальевна

ЛУЧЕВЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В авторской редакции

Подписано к изданию 14.11.2016.
Объем данных 2,26 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14