

Глава 5. ЭФФЕКТЫ ОБЛУЧЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

5.1. Радиационные методы обработки материалов и изделий.

Под действием излучений различных видов в поверхностных слоях твердых тел происходят различные изменения: фазовые, структурные, физические, механические, химические и т.д. Так, в телах с низкой электропроводностью образовавшиеся в результате ионизации положительные ионы и электроны длительное время обнаруживают себя как дефектные новообразования в структуре. Хорошо известным примером является появление под действием облучения коричневой окраски стекла, что обусловлено образованием электронных центров поглощения света. Ионизованные атомы могут смещаться со своих прежних мест под влиянием электрических сил соседних атомов.

При соударении тяжелых частиц с ядрами последние могут перемещаться на многие межатомные расстояния. Таким образом, в структуре образуются два дефекта: вакансия и межузельный ион, что сказывается на свойствах кристаллических тел. Ядерные соударения - типичный процесс для быстрых нейтронов. Тяжелые ионы также испытывают соударения с ядрами, хотя влияние этих соударений относительно мало по сравнению с влиянием процесса ионизации.

При большом числе актов ядерной реакции могут наблюдаться еще большие изменения в структуре, так как кроме пространственного перемещения часто образуются ядра посторонних для данной структуры элементов. Включение посторонних ядер происходит и при облучении ионами, когда последние останавливаются в конце своего пробега.

Образование дефектов в конструкционных материалах ядерных установок - обычно вредное явление. Например, металлы и сплавы приобретают такие нежелательные свойства, как хрупкость, подверженность коррозии и т. п. Для испытаний материалов, предназначенных для работы в условиях облучения, нередко используют ускорители как источники быстрых нейтронов и ионов.

Однако образование дефектов иногда полезно использовать прежде всего в технологии получения полупроводников. Особенно плодотворной оказалась *имплантация* ионов в целях создания примесной электропроводимости.

Определенные перспективы имеет радиационная обработка металлов и сплавов. Предпосылки к этому следующие. Известно, что важным фактором, определяющим благоприятный комплекс свойств металлов и сплавов, является фазовое состояние. Фазовые превращения, контролируемые диффузией, обычно протекают с заметной скоростью лишь при температурах выше $(0,4 - 0,5) T$, где T - температура плавления по шкале Кельвина. Радиационные дефекты (вакансии и межузельные атомы) становятся подвижными уже при температуре $0,2 T$. Таким образом, при радиационно-усиленной диффузии можно получить фазы, стабильные в интервале температур $(0,2 - 0,5) T$.

В некоторых экспериментальных работах показано, что облучение электронами при очень высоких дозах, измеряемых миллиардами Дж/кг, действительно позволяет изменять механические свойства в полезных целях, например, для увеличения износостойкости рабочих поверхностей инструментов. Так, облучение электронами сплавов железа с молибденом и хромом приводит к росту предела текучести при небольшом снижении предела прочности.

Облучение пучками ионов и плазмы (ионоплазменная обработка) позволяет получать сверх стойкие покрытия металлических поверхностей. Это направление называют *модификацией свойств поверхностей материалов*.

В конечном счете, подавляющая часть энергии, расходуемая заряженными частицами в веществе, переходит в тепло. Возможность высокой концентрации тепловыделения и управления его пространственным распределением вплоть до микроскопических объемов

и поверхностей обусловила большой интерес к такого рода использованию частиц для обработки поверхности твердых тел. Следует отметить, что кроме удаления вещества с поверхности за счет нагрева наблюдается явление ионного выщербливания. Тепловое действие ускоренных пучков с успехом используется при производстве интегральных схем микроэлектроники. Примером может служить получение рисунков электронных схем, микропайка, обезвоживание и очистка поверхностей полупроводников. Другим примером является использование электронного пучка для прохождения твердых горных пород.

Широкое практическое применение нашла *электронная сварка*, которая заслуживает более подробного рассмотрения.

В настоящее время развиваются направления модификации поверхностных свойств материалов с использованием воздействия на них пучками различных видов излучения: лазерного, электронного, рентгеновского, ионного, нейтронного, плазменного. При этом происходят многообразные физические процессы. Основные из них следующие:

- нанесение плёнок и покрытий (в том числе и многослойных);
- изменение топографии (рельефа) поверхности путём тонкого плазменного напыления, полировки, оплавления;
- изменение фазовой структуры поверхностных слоёв а глубину до нескольких десятков микрометров в результате быстрого нагрева концентрированными потоками энергии и, затем, быстрого охлаждения;
- изменение элементного состава поверхностных слоёв и варьирование электрических свойств материалов (легирование кремния, имплантация);
- изменение микроструктуры в результате ударно-волнового воздействия из-за газодинамического разлёта плазмы и пара с поверхности).

Выбор метода модификации определяется конкретными задачами и возможностями их решения. В большинстве своём радиационными технологиями пользуются для получения полупроводников и для улучшения механических, физических и химических свойств поверхностных слоёв материалов и изделий.

5.2. Ионная имплантация.

Один из важнейших способов модификации поверхностных слоёв это ионное внедрение, или *ионная имплантация*. Метод имплантации состоит в том, что на поверхность вещества направляют поток ионов примеси, имеющих высокую энергию. Эти ионы проникают в толщу вещества и затормаживаются в ней, обеспечивая определённое пространственное распределение примеси по глубине проникновения. Ионное внедрение позволяет относительно чётко контролировать и варьировать концентрацию примеси, а также её распределение до глубины основы в пределах нескольких мкм.

Регулируя энергию, можно изменять глубину проникновения имплантируемых ионов и получать, например, p-n- или n-p-переходы на различных расстояниях от поверхности. Метод ионной имплантации нашел промышленное применение при производстве полупроводников и интегральных схем. Наиболее часто в качестве примеси в монокристалл внедряют ионы бора, фосфора, лития, мышьяка. Наиболее важными вопросами являются определение и контроль глубины проникновения ионов в твердое тело и их распределение в нем.

В качестве примера на рис. 5.1 приведены пробеги (сплошные линии) и полуширина гауссова распределения, измеренная на половине высоты его (пунктирные линии), в зависимости от атомного номера имплантируемых ионов и их энергии в качестве параметра. Естественным ограничением приведенных графиков является то обстоятельство, что они рассчитаны для аморфных тел. Если же пучок ионов взаимодействует с кристаллом, где атомы образуют кристаллическую решетку, то

наблюдается каналирование ионов. В одном кристалле могут существовать несколько направлений каналирования.

Эффект каналирования состоит в том, что когда пучок ионов входит в поверхность кристалла под определенным углом к главной оси его, то значительная часть пучка проходит через окна, свободные от атомов решетки. Вследствие этого пучок ионов проникает значительно глубже, чем в аморфное тело.

Остановимся на некоторых качественных соображениях. Пусть ионы падают на кристалл в направлении оси каналирования. Так как сечение пучка ионов всегда больше сечения окна или канала в кристалле, не все падающие ионы будут каналировать. Часть из них, проходя через решетку вблизи атомов кристалла, будет взаимодействовать с ними и отклонится от оси канала.

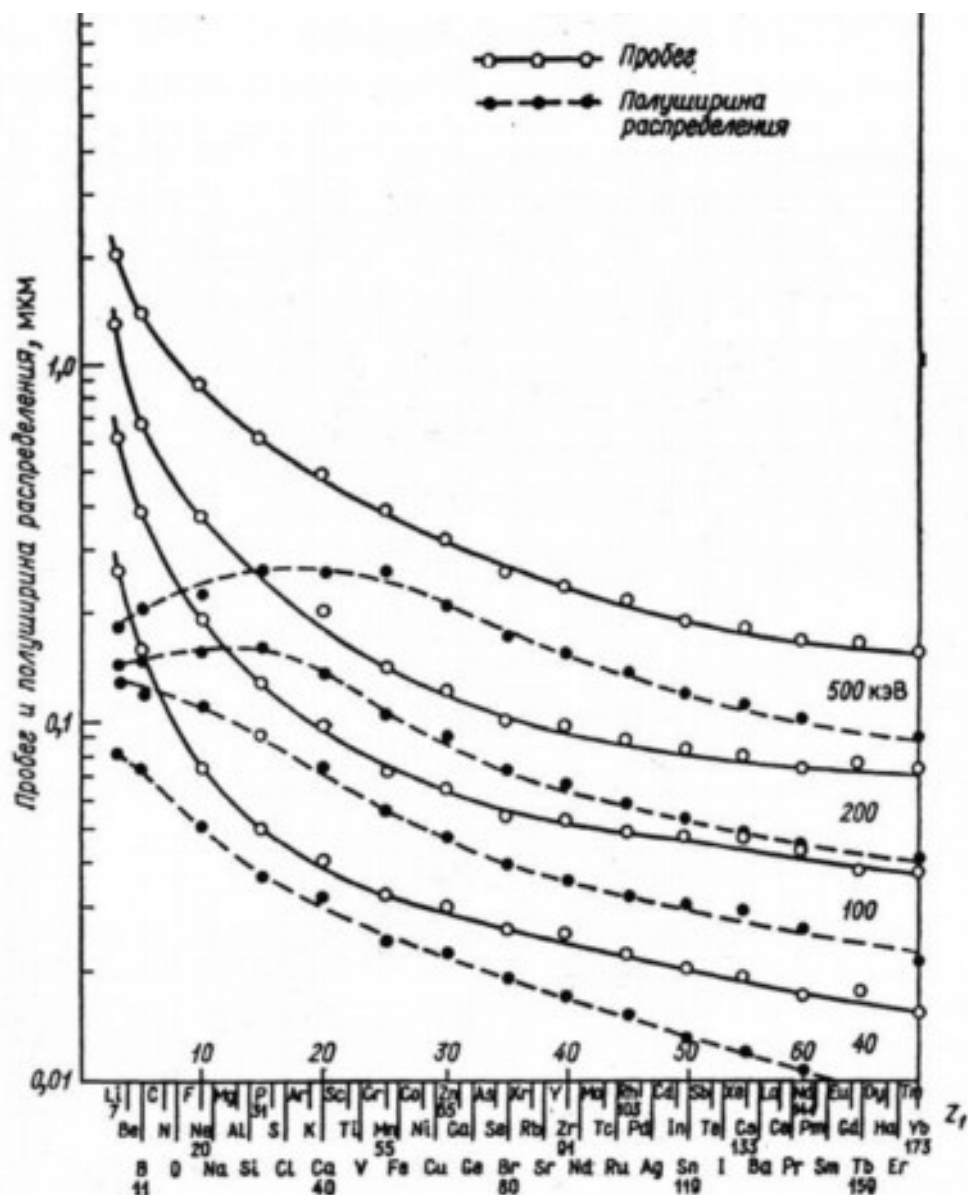


Рис. 5.1. Зависимость пробега и полуширины распределения ионов по глубине от порядкового номера элемента при различных энергиях имплантируемых ионов.

Для этих ионов процесс имплантации будет проходить так же, как и в аморфном теле, в распределении ионов по глубине имплантации появится первый пик. Далее, в результате взаимодействия с электронами каналирующие ионы потеряют энергию, и на большей

глубине появится второй пик. Между двумя пиками, каждый из которых характеризуется гауссовым распределением, имеется относительно плоский участок, обусловленный частицами, постепенно выбывающими из процессов каналирования благодаря накоплению небольших отклонений от оси. Соотношение между амплитудами двух пиков зависит от тепловых колебаний атомов кристалла, дефектов решетки, количества имплантируемых ионов и т. п. В самом деле, с увеличением числа внедренных атомов увеличиваются дефекты решетки, что способствует росту отклонения ионов от оси каналирования. Из этого следует, что эффект каналирования нельзя использовать для увеличения глубины внедрения, если необходимо создать высокую концентрацию имплантируемых ионов. Если угол между осью и направлением движения ионов не превышает некоторого критического значения, то процесс каналирования имеет место, а если этот угол больше критического, то взаимодействие ионов с кристаллом происходит так же, как и с аморфным телом. Критический угол растет с уменьшением энергии и увеличением заряда имплантируемых ионов. Примерное значение критических углов каналирования при имплантации ионов бора, азота, фосфора и мышьяка в кремний составляет от $2,9^\circ$ до $5,9^\circ$ для энергий от 50 до 30 кэВ.

Имплантация ионов сопровождается вредными побочными процессами:

- если доза облучения достаточно велика возникают радиационные повреждения кристаллической решетки, структура облученного участка может стать близкой к аморфной;
- ионы часто останавливаются не в тех местах, где нужно (межузельные ионы).

Обе эти проблемы могут быть частично решены с помощью процедуры *термического отжига* при сравнительно низкой температуре ($500 - 1000^\circ\text{C}$). Суть этого отжига сводится к тому, что тепловая вибрация способна устранять повреждения кристаллической решетки и активизировать внедренные ионы. В процессе восстановления поврежденный слой рекристаллизуется, повторяя структуру расположенных ниже неповрежденных слоев.

Кроме того, в процессе отжига имплантируемые ионы, находящиеся в междузельных положениях, перемещаются в положение замещения. Характерное время отжига составляет порядка 30 мин.

Метод ионной имплантации имеет определенные достоинства по сравнению с существующими классическими методами: термодиффузией, вплавлением и легированием из расплава, которые привели к широкому промышленному применению ионной имплантации, несмотря на сравнительно высокую цену требуемого оборудования. Достоинства метода в некоторых случаях являются принципиальными. К их числу относятся:

- возможность вводить атомы любого элемента в какой угодно материал;
- регулировка концентрации внедряемого элемента в зависимости от глубины проникновения энергией ионов;
- дозировка внедряемого элемента с высокой степенью точности независимо от состояния поверхности и внутренних напряжений;
- высокая скорость процесса и сравнительно низкие температуры, что уменьшает возможность термодиффузии нежелательных примесей;
- высокая чистота получаемых материалов;
- обеспечение резких границ областей примесей за счет хорошей направленности пучка ионов в сочетании с применением фотолитографических масок;
- полная автоматизация процесса и близкая к 100% воспроизводимость создаваемых материалов.

В перспективе улучшение технологии производства ионных пучков (доведение диаметра пучков до 10^{-6} см и управление их перемещением с помощью компьютеров)

появится возможность «рисовать» желаемую схему на подложке и избегать сложных операций изготовления масок и гравирования.

Для изготовления полупроводниковых приборов в настоящее время применяется комбинация традиционных процессов и ионной имплантации. Обычно для имплантации используются ионы с энергиями от 10 до 500 кэВ при энергетическом разбросе в несколько процентов. Возможно применение энергий до 5 МэВ; однако этот вопрос изучен в значительно меньшей степени. Указанным энергиям соответствуют глубины проникновения от 0,01 до 1 мкм, что зависит от типа применяемых ионов и материала подложки. Общее количество атомов, внедряемых при имплантации, лежит в пределах от 10^{11} до 10^{16} на 1 см^2 . Требуемая однородность дозы имплантируемых ионов составляет $\pm 1\%$. Токи ионов уже в 1 мА при 100 кВ создают большие тепловые нагрузки и не могут применяться без развертки пучка.

Обычно также накладывается ограничение на максимальную расходимость пучка: в большинстве случаев она не должна превышать (2 – 4) градуса. Это ограничение тесно связано с эффектом каналирования, и допуск на расходимость пучка может изменяться в зависимости от рода имплантируемых ионов и подложки.

Главными компонентами установки для имплантации ионов являются ионный источник (ИИ), анализатор ионов по массам, ускоряющая система с источником высокого напряжения и системы развертки и фокусировки пучка. Особенность ионного источника в установках для имплантации ионов заключается в необходимости создания потоков ионов самых разнообразных типов. Это могут быть источники однозарядных и многозарядных ионов. Как правило, для каждого типа имплантируемых ионов используется отдельный источник. Поэтому, если производство носит мелкосерийный характер, необходимо предусмотреть возможность быстрой замены источника.

ИИ можно разделить на *плазменные* и с *поверхностной ионизацией*. В плазменных источниках ионы образуются в веществе, находящемся в виде газа или пара в разрядной камере, ионизацией нейтральных атомов или молекул электронами и в процессе ионно-атомных соударений. Для этого используется один из видов электрического разряда. В результате в объеме разрядной камеры создается плазма. Чтобы поддерживать стабильный электрический разряд в плазме, требуется минимальное давление газа или пара в пределах от 10^{-2} до 1 Па. Газ и пара доставляются в разрядную камеру от внешнего источника.

Около 10% элементов являются газами при комнатной температуре и нормальном давлении. Их легко можно доставить в разрядную камеру. Существуют также некоторые газы или жидкости, у которых достаточно высоко давление молекулярных образований. Примерно, 23% элементов являются жидкостями или твердыми телами при комнатной температуре и имеют давление пара порядка 10^{-1} Па при приемлемой температуре (300 -110) °С. Для этих материалов создаются внешние подогреватели для испарения. Элементы, которые не испаряются в атомарной форме, могут испаряться в молекулярной в химическом соединении с другими элементами.

Извлечение ионов с граничной поверхности плазмы осуществляется с помощью системы вытягивающих электродов. Полученный пучок ионов затем формируется системой фокусирующих электродов. Другой механизм образования ионов применяется в источниках с поверхностной ионизацией.

Качество ионного источника оценивается специальными характеристиками, позволяющими сравнивать различные источники между собой. К числу таких характеристик относятся:

- тип ионов, общий ток ионов и его плотность;
- относительное содержание полезных ионов в общем потоке ионов;
- экономичность источника по мощности;
- газовая экономичность (отношение числа выходящих из источника ионов к общему числу атомов рабочего вещества, поступающего в источник).

В настоящее время ИИ позволяют производить пучки однократно ионизованных ионов почти всех элементов таблицы Менделеева с интенсивностями удовлетворяющими требованиям большинства потребителей.

Максимальная плотность тока извлекаемых ионов достигнута в *дуоплазматронах* – порядка 1 А/см². Относительное содержание полезных ионов в общем потоке колеблется от нескольких до почти 100% (для разных типов ИИ). Экономичность по мощности достигает единицы миллиампер на 1 Вт. Газовая экономичность составляет единицы – десятки процентов.

В *дуоплазматронах* (рис. 5.2) разряд осуществляют между подогревным катодом (1) и анодом (3) в продольном магнитном поле. Высокая эффективность достигается за счёт двойного сжатия плазмы. Это достигается путём введения промежуточного электрода (2) и использования сильного неоднородного магнитного поля с магнитной индукцией (0,3 - 1) Тл, прикладываемого между промежуточным электродом (2) и анодом (3).

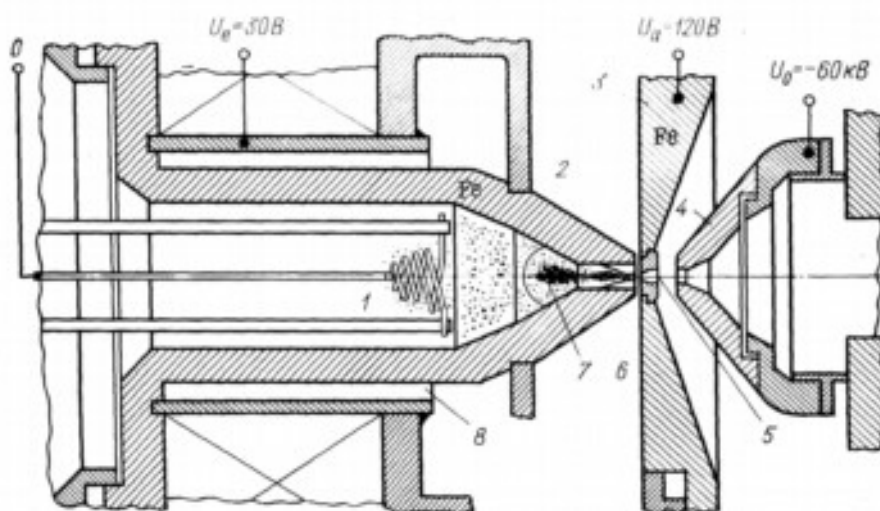


Рис. 5.2. Дуоплазматрон: 1 – катод; 2 – промежуточный электрод; 3 – анод; 4 – экстрактор; 5 – жаропрочная вставка; 6 – плазма сжатая магнитным полем; 7 – плазменный «пузырь»; 8 – водяное охлаждение

Магнитное поле концентрирует плазму вблизи выходного отверстия, обеспечивая плотности порядка 10¹⁴ см⁻³. Источник характеризуется высоким содержанием полезных ионов в потоке (до 80% для водорода) и большой интенсивностью (сотни миллиампер) тока. Эмиттанс пучка составляет несколько десятков мм·мрад.

Источник ионов с осциллирующими электронами, *типа Пеннинга*, показан на рис. 5.3. Ионизация рабочего газа под давлением (10⁻¹ – 10⁻²) Па производится электронами, испускаемыми подогревным катодом или образующимися в самой разрядной камере в схеме с холодным катодом. В разрядной камере создаётся продольное магнитное поле в несколько сотых Тл, которое заставляет электроны, стремящиеся к аноду, двигаться по спиральным траекториям. Это увеличивает количество произведённых ими актов ионизации. Извлечение образованных ионов производится через отверстие в одном из катодных электродов. От такого источника можно получить токи ионов в несколько десятков миллиампер. В источниках типа Пеннинга возможно также производить прямое испарение в разрядную камеру твёрдого вещества при температурах (600 – 1200) °С.

Для создания пучков ионов применяются также *высокочастотные источники*, *источники с использованием катодного распыления* и различные их модификации. Фирмами, производящими оборудование для ионной имплантации, разработаны

специальные типы источников, где ионизация испарённого вещества производится электронными пучками. В промышленных имплантаторах применяются простейшие ускорители трансформаторного типа с выпрямляющими схемами, хотя для исследовательских целей часто используются электростатические ускорители на энергии в несколько мегаэлектронвольт. Во всех ускорителях такого типа, как правило, применяются постоянные во времени пучки ионов, хотя это и не принципиально.

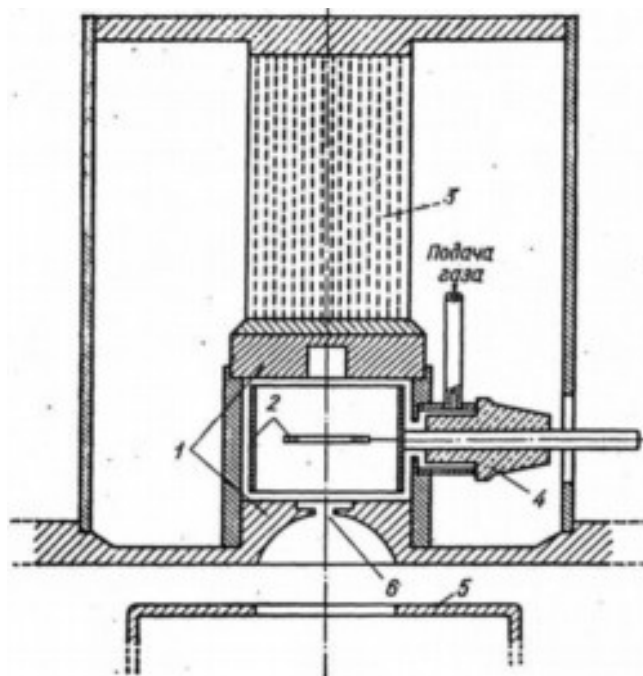


Рис. 5.3. Источник типа Пеннинга: 1 – катоды-плюсовые наконечники; 2 – анод; 3 – постоянный магнит; 4 – изолятор; 5 – извлекающий электрод; 6 – отверстие для выхода электронов.

При имплантации ионов требуется обеспечить определенный угол между направлением имплантируемых ионов и поверхностью образца, а также равномерность облучения образца по площади. Первое требование связано с каналированием ионов: о нём упоминалось выше. Направление кристаллографической оси образца определяется оптическим методом, методом рентгеновской дифракции или обратного рассеяния ионов. Применяются также гониометры, позволяющие устанавливать кристалл с угловой точностью $0,1^\circ$. Равномерность облучения достигается или с помощью дефокусирующих линз, или при помощи развертки пучка на поверхность.

В производственных условиях чаще всего проводится одновременное облучение набора образцов, закрепленных в специальном держателе. Тогда необходимо распределить пучок имплантируемых ионов на большие площади (примерно до 60 см^2). Механическое перемещение таблеток, перпендикулярное направлению пучка ионов, позволяет производить имплантацию ионов с постоянным углом падения пучка по отношению к поверхности. Во время ускорения и транспортировки пучка он производит ионизацию молекул остаточного газа. При механическом перемещении ионы остаточного газа и образовавшиеся в результате их рекомбинации нейтральные атомы и молекулы, создающие загрязнение, равномерно распределяются по площади. Для развертки пучка используется также электростатическая система, состоящая из двух пар последовательно расположенных отклоняющих пластин, к которым приложено пилообразное напряжение.

Скорость облучения таблеток для получения определенного уровня присадки в установках для ионной имплантации зависит от следующих причин: минимального

времени для получения необходимой присадки; интенсивности пучка ионов на мишени; времени, необходимого для загрузки таблеток в вакуумный объем и их выгрузки; времени для установки таблеток внутри объема для облучения.

При частотах развертки от 10 до 1000 Гц и неоднородности дозы ионов около 1% в современных имплантаторах требуется несколько секунд для самого процесса имплантации. Например, для получения уровня присадки в $5 \cdot 10^{13}$ ион/см² в таблетке диаметром около 7,5 см, если ток имплантируемых ионов 50 мкА, достаточно 10 с.

Ионная имплантация используется сейчас при производстве следующих кремниевых полупроводниковых приборов: планарных микродиодов; метрических детекторов ядерных излучений; умножителей электронных потоков; р-і-п-диодов; варикапов со сверхвысокой чувствительностью; ВЧ-биполярных р-п-р- и п-р-п-транзисторов; полупроводниковых резисторов с широким диапазоном сопротивлений; высоковольтных вентилей; фотодиодов и преобразователей солнечной энергии. Метод успешно применяется также при производстве больших интегральных схем для вычислительной техники. Так, при облучении одного кристалла кремния можно получить интегральную схему с памятью, которая в транзисторном исполнении требует применения 19000 транзисторов. Технология создания схем ионной имплантацией применяется также для карманных калькуляторов, электрических наручных часов, мощных выпрямительных схем. К недостаткам метода следует отнести высокую стоимость ускорителя, хотя если рассматривать суммарные капитальные затраты на сооружение линии производства интегральных схем, то доля на сооружение ускорительной установки будет относительно мала.

Примеры использования ионного внедрения в машиностроительные материалы.

Перспективным является также использование технологии ионной имплантации для улучшения механических свойств машиностроительных материалов. Подавляющее количество работ выполнено на сталях. Ряд работ посвящён имплантации в титан и его сплавы.

1. До имплантации материалы из сплавов титана отличаются низкой *износостойкостью*. Внедрение лёгких элементов (N₂, С, инертные газы) в изделия из титана и его сплавов приводит к повышению износостойкости их поверхностей в ~ 100 раз. Причём обнаружено, что эффект повышения износостойкости распространяется на глубину во много раз большую глубины имплантации. Эффект достигается за счёт процесса *радиационно-стимулированной диффузии*. Она заключается в значительном (до порядков) увеличении коэффициентов диффузии составляющих материал компонентов при возникновении в нём радиационных дефектов. Это происходит, например, при энергии ионов $E = 200$ кэВ и потоке ионов $\sim 10^{18}$ ион/см². Радиационно-стимулированная диффузия и локальное повышение температуры в зоне контакта приводят к распространению в глубь образца первоначально введённых ионов.

2. Ионная имплантация может привести к улучшению *антифрикционных свойств* материалов. Это происходит по следующим причинам:

- формирование плёнок мягких окислов на поверхности материалов; они уменьшают трение и предохраняют поверхности контактирующих тел от износа;
- иногда, наоборот, происходит формирование мелкодисперсных высокотвёрдых включений типа карбидов, боридов, нитридов при ионном внедрении. Эти включения обеспечивают высокую несущую способность пятен фактического контакта. Более вязкая матрица (основа) обеспечивает демпфирующие свойства.

3. Ионное внедрение применяется для повышения *коррозионной стойкости* материалов. Это достигается:

- благодаря созданию в поверхностном слое соединений с повышенными физико-химическими характеристиками. (Так, при легировании титана палладием

коррозионная стойкость возрастает в ~ 1000 раз);

- при соответствующем подборе пары «облучаемый материал – легированный ион» и энергии иона можно получить в поверхностном слое аморфную структуру, которая также обладает повышенной коррозионной стойкостью.

Помимо коррозионной стойкости получаемые аморфные слои обладают значительной термической стабильностью. Так, например, система Cu + W не теряет характеристик аморфной структуры даже при $t^\circ = 600\text{ C}^\circ$ в течении 1,5 ч.

4. *Повышение сопротивления усталости.* Ионная имплантация, изменяя структуру поверхностного слоя, влияет также на процесс *зарождения поверхностных трещин* посредством создания благоприятных остаточных напряжений, радиационных дефектов и образования мелкозернистых включений новых фаз. Это препятствует возникновению и развитию трещин.

К недостаткам обсуждаемой технологии можно отнести относительно высокую стоимость процесса. Поэтому ионную имплантацию часто сочетают с другими технологиями обработки. Например, образцы стали 30ХГСНА имели в исходном состоянии предел выносливости ~ 500 МПа. После дробеструйной обработки и легирования ионами азота с энергией 100 кэВ предел выносливости повысился до 850 МПа.

5. 3. Легирование кремния на канале ядерного реактора НИИ ЯФ ТПУ.

Технология нейтронно-трансмутационного легирования (НТЛ) кремния широко используется для создания приборов с минимальным (2 - 3)% разбросом значений удельного электрического сопротивления: мощных тиристоров, приборов с зарядовой связью, СБИСов, фотоприёмников, детекторов излучений. На одном из каналов исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т производится легирование слитков чистого кремния больших размеров 13,5×70 см. Пучок быстрых нейтронов замедляется в бериллиевой сборке и облучает контейнеры с кремнием. Происходит следующая реакция:



При этом меняются электрические свойства Si (удельное сопротивление - ρ) в заданном направлении. Так, для электротехнической промышленности добиваются значений $\rho = (10 - 250)\text{ Ом}\cdot\text{см}$; для производства фотоприёмников $\rho = (10 - 40)\text{ кОм}\cdot\text{см}$.

Распределение концентраций фосфора по слитку повторяет распределение флюенса тепловых нейтронов. При статическом режиме облучения (мишень неподвижна) нельзя получить высокую равномерность легирования из-за большого градиента плотности потока тепловых нейтронов. Неоднородность потока нейтронов по радиусу канала составляет 17%. В связи с этим разработан алгоритм движения контейнеров в канале, позволяющий добиваться усреднённой неоднородности облучения <5 %. Для достижения радиальной равномерности легирования контейнер со слитками при облучении вращают вокруг его оси. Для достижения продольной равномерности контейнеру придают возвратно-поступательное движение вдоль канала реактора. Схема установки приведена на рис. 5.4.

Канал по отношению к активной зоне является касательным и проходит через бериллиевый отражатель, примыкающий к активной зоне. Одновременно облучаются два контейнера, скорость вращения $V = 3\text{ об/мин}$, скорость поступательного движения $V = 270\text{ мм/мин}$. Биологическая защита сделана из тяжёлого бетона. Мощность максимального тепловыделения в слитке $P = 0,037\text{ Вт/см}^3$, расчётная температура нагрева через 30 секунд $T = 450^\circ\text{C}$. Для охлаждения через канал реактора прокачивают воздух с расходом $200\text{ м}^3/\text{ч}$, при этом температура не превышает $T = 110^\circ\text{C}$.

Комплекс НТП включает в себя химический участок подготовки слитков к облучению; печь отжига радиационных дефектов; установки для измерения удельного электрического

сопротивления, времени жизни неосновных носителей заряда, типа проводимости; станок для резки слитков. Технология НТЛ кремния существует в НИИ ЯФ ТПУ с 1984 г. и не имеет аналогов в России. Производительность комплекса составляет около 4500 кг легированного Si в год.

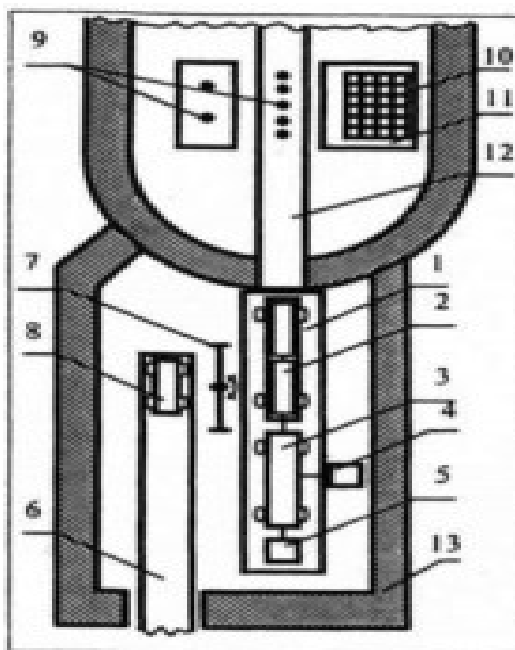


Рис. 5.4. Комплекс НТЛ кремния: 1 – скамейка; 2 – контейнеры на облучателе; 3 – труба-пробка; 4 – привод перемещения облучателя; 5 – привод вращения контейнеров; 6 – транспортный путь; 7 – перегрузочное устройство; 8 – транспортная тележка; 9 – внутриреакторные камеры КтВ-4; 10 – активная зона реактора; 11 – бериллиевый отражатель; 12 – канал реактора ГЭК-4; 13 – биологическая защита.

5.4. Электронная сварка.

Процесс превращения энергии ускоренных частиц при торможении их в веществе в тепловую отличается высокой эффективностью. Так как электронные ускорители значительно более экономичны, чем ионные, во всех случаях для получения теплового эффекта используются исключительно электроны. При энергиях до 100 кэВ более 95% их энергии превращается в тепло. Нагревание электронным пучком применяется для получения чистых металлов переплавкой их в вакууме, для обработки металлов, пайки и сварки. Наибольшее распространение из этих процессов получила сварка.

При электронной сварке ускоренные электроны направляются на свариваемые изделия и разогревают граничные слои. В результате происходит расплавление металла, а затем его остывание с образованием сварного шва. Сварка производится в вакууме или атмосфере инертного газа, что способствует образованию высококачественного шва, недостижимого при применении других методов сварки.

Характерные особенности электронной сварки - получение малой площади нагрева и высокая плотность потока энергии в ней. Так, площадь пятна нагрева может достигать значений порядка 10^{-7} см², при наивысшей плотности потока энергии до 10^8 - 10^9 Вт/см², что сравнимо только с параметрами, получаемыми с помощью лазерного луча. Другие методы сварки не позволяют получить таких значений указанных величин. Так, ацетилено-кислородная сварка позволяет получить наименьшую площадь нагрева в 10^{-2}

см² и наивысшую плотность потока энергии в пятне около $5 \cdot 10^4$ Вт/см², а электрическая дуга – 10^{-3} см² и 10^5 Вт/см² соответственно.

Электронным лучом можно производить сварку разнородных металлов, меди, высокопрочных алюминиевых сплавов, тугоплавких металлов и сталей, можно реализовать самые различные типы сварки соединений в разнообразных условиях. При этом достигаются определенные технологические преимущества, благодаря которым электронная сварка получает все большее применение. Так, осуществление сварки в вакууме позволяет производить сварку тугоплавких и химически активных металлов (вольфрам, молибден, тантал, ниобий, титан и цирконий), исключая насыщение металла атмосферными газами, что обычно приводит к хрупкости швов и снижению коррозионной стойкости. Высокая концентрация энергии в электронном пучке делает возможным достижение полезных специфических результатов. При соединении деталей в микроэлектронике и приборостроении благодаря испарению металлов можно осуществить размерную обработку, причем широко используются системы программного перемещения луча с использованием масок или перемещения по заданному контуру. Обеспечиваются минимальные деформации при сварке готовых изделий из высокопрочных сталей и сплавов на основе титана и алюминия, что исключает последующую механическую и термическую обработку.

Промышленностью выпускаются для сварки электронные пушки, условно разделяемые на низковольтные (ускоряющее напряжение – (20 – 30) кВ, ток электронов от 50 мА до 1 А, диаметр пятна от 0,5 до 2 мм, плотность потока энергии в пятне изделия от 1 до 10 Вт/мм²), промежуточного напряжения ((40-60) кВ, (50 – 500) мА, 0,25 - 0,7 мм, (5 - 30) Вт/мм²) и высоковольтные ((80-150) кВ, (0,3 – 20) мА, (0,01 - 0,1) мм, (30 – 2000) Вт/мм²). Из приведенных данных видно, что с увеличением ускоряющего напряжения существенно уменьшается диаметр пятна на изделии и возрастает мощность на единицу поверхности.

Электронные пушки установок для электронной сварки конструктивно выполняются в трех различных вариантах. В простейшем варианте анодом служит само изделие. Такая система не позволяет получать пучки с высокой плотностью энергии и применяется для соединения металлов толщиной более чем (1 - 2) мм. Применение электростатической фокусировки, для чего используется прикатодный электрод и анод с отверстием на оси для прохождения пучка, находящийся под потенциалом изделия, позволяет улучшить фокусировку. Наилучшие результаты получаются в пушках, где кроме электростатической фокусировки используется фокусировка дополнительными магнитными линзами. В зависимости от фокусировки можно получить различную конфигурацию электронного потока, падающего на свариваемое изделие (расходящийся, параллельный или сходящийся потоки).

Катоды пушек для сварки изготавливаются из вольфрама, торированного вольфрама, тантала и гексаборида лантана.

В ускорителях электронов, применяемых для сварки, катоды пушек изготавливаются из вольфрама, торированного вольфрама, тантала и гексаборида лантана. Наибольшее применение нашли катоды из гексаборида лантана, обеспечивающие хорошую удельную эмиссию около 10 А/см² при рабочей температуре 1600°С и обладающие хорошей стойкостью к воздействию остаточных газов и к ионной бомбардировке. Однако на их работу оказывают влияние пары свариваемых материалов, что приводит к уменьшению эмиссии и к необходимости увеличения рабочей температуры. Более стабильные характеристики имеют танталовые катоды с подогревом электронной бомбардировкой, обладающие сроком службы в несколько сот часов.

Для управления пучком, кроме фокусирующей, применяют также отклоняющие системы. Так как разброс энергии электронов и нестабильности питания магнитных линз приводят к появлению хроматической аберрации, на питание линз и ускоряющее напряжение накладываются определенные ограничения. Обычно стабильность тока

питания магнитных линз должна составлять (0,01 - 0,1)%, а стабильность ускоряющего напряжения - порядка 1%.

Питание электронной пушки осуществляется от высоковольтного трансформатора с выпрямителем и сглаживающими фильтрами. Для прецизионной сварки и размерной обработки применяются устройства для стабилизации напряжения с электронными лампами или (при большой мощности установки) магнитными усилителями. Другая система служит для обеспечения стабильности тока пучка, колебания которого возникают из-за изменения температуры катода или его эмиссионных свойств. Наконец, особое требование - постепенное автоматическое снижение мощности пучка при окончании сварки, так как при мгновенном включении в конце шва образуется кратер, незаполненный металлом.

Приведем в качестве примера основные характеристики низковольтной пушки У-530М для сварки с металлическим катодом, подогреваемым электронной бомбардировкой. Пушка обеспечивает пучок электронов с энергией 30 кэВ и током до 1 А при угле сходимости пучка на изделии около 10^{-6} рад и эффективным радиусом (0,1 - 0,3) мм на расстоянии 1 м при токопрохождении 98% от инжектора до изделия. Пучок может отклоняться от основного направления в пределах $\pm 10^\circ$. Время непрерывной работы не ограничено. Габариты пушки: диаметр 134 мм и высота 312 мм при массе 9,5 кг.

В сварке широко применяется также модуляция тока ускоренного пучка при размерной обработке металлов и при импульсной сварке. Преимущество импульсной сварки - устранение перегревов и образования макропористостей в швах. Обычно применяется частота следования импульсов от 10 до 200 Гц при их длительности 1-50 мс. Легче всего модуляцию производить подачей на управляющий электрод импульсов отрицательного относительно катода напряжения. Аппаратура для производства электронной сварки выпускается серийно и эксплуатируется в промышленности.

Для сварки изделий мелких и средних габаритов используется универсальная аппаратура с мощностью пучка около 10 кВт. Вакуумные камеры таких установок изготавливаются или цилиндрической, или кубической формы объемом около (0,1 - 0,2) м³. Электронная пушка располагается на вакуумной камере, изделия могут фиксироваться внутри нее, а также с помощью специальных механизмов перемещаться в двух направлениях. Пушка в некоторых конструкциях может смещаться относительно изделия и устанавливаться на разных расстояниях от него. Вакуумная камера откачивается с помощью форвакуумных и высоковакуумных насосов. Наибольшее неудобство таких систем заключается в большом времени, затрачиваемом на загрузку камеры изделиями, и последующую откачку. В целях устранения этого неудобства разработаны установки с непрерывной загрузкой изделиями, которые проходят вначале через систему шлюзов, обеспечивающих предварительную откачку.

Для крупногабаритных изделий применяют аппараты с большими размерами вакуумной камеры (например, диаметром 2 и длиной 4 м), снабженные несколькими стационарными инжекторами. Если специальные требования к чистоте атмосферы не предъявляются, то сварка производится в атмосфере воздуха или инертных газов, главным образом, гелия или аргона.

В промышленности развитых стран используются тысячи установок для сварки электронным лучом. Наиболее распространены сварка тугоплавких металлов, таких как, тантал, вольфрам и другие, для изготовления деталей реактивных двигателей самолетов, сопел космических ракет, сварки топливных элементов реакторов и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаренко О. К., Истомина Е. И., Локшин В. Е. Электронно-лучевая сварка. М., Машиностроение, 1966.

2. Соловьев Н. С. – Атомная техника за рубежом, 1974, № 5, с. 42.
3. Намба С. Технология ионного легирования. М., Советское радио, 1974.
4. Флёров Г.Н., Барашенков В.С. Успехи физических наук, т.114, в.2, 1974.
5. Васильев А. А., Грузин П. Л. – Изотопы в СССР, 1975, № 44, с. 30.
6. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М., Энергоатомиздат, 1986.
7. Рябухин Ю. С., Шальнов А. В. Ускоренные пучки и их применение. М., Атомиздат, 1980.
8. Варлачёв В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. Изв. Вузов. ФИЗИКА, №4, 1998, с.210.
9. Рябчиков А.И., Дектярёв С.В., Степанов И.Б. Изв. Вузов. ФИЗИКА, №4, 1998, с.193.
10. <http://www.Kgtu.runnet>.