

А.Ф. Вяткин

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНЫХ,
ЭЛЕКТРОННЫХ
И ИОННЫХ ПУЧКОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Часть 3

**Взаимодействие
ионных пучков с поверхностью твердых тел**

Курс лекций



Кафедра физического материаловедения

А.Ф. Вяткин

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНЫХ,
ЭЛЕКТРОННЫХ
И ИОННЫХ ПУЧКОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Часть 3

**Взаимодействие
ионных пучков с поверхностью твердых тел**

Курс лекций
для студентов специальностей
5401, 0709, и 0710

Рекомендовано редакционно-издательским
советом института в качестве учебного пособия

УДК 539.211:621 378.826

В99

В99 *Вяткин А.Ф.* Взаимодействие лазерных, электронных и ионных пучков с поверхностью твердых тел: Ч.3. Взаимодействие ионных пучков с поверхностью твердых тел: Курс лекций. – М.: МИСиС, 2001. – 138 с.

В курсе лекций рассматриваются физические процессы, сопровождающие взаимодействие ионных пучков с твердыми телами. Решаются задачи определения пробега ионов в твердых телах и их распределение. Подробно рассматриваются процессы обратного рассеяния ионов, ионной имплантации, распыления твердых тел ионной бомбардировкой. Детально описываются процессы каналирования ионов в монокристаллических твердых телах и использование этого явления для анализа структуры поверхностных слоев монокристаллов.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 5401, 0709, и 0710

© Московский государственный
институт стали и сплавов
(Технологический университет)
(МИСиС), 2001

ВЯТКИН Анатолий Федорович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНЫХ,
ЭЛЕКТРОННЫХ
И ИОННЫХ ПУЧКОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Часть 3

**Взаимодействие ионных пучков
с поверхностью твердых тел**

Курс лекций

для студентов специальностей 5401, 0709, и 0710

Рецензент д-р хим. наук, проф. М.И Астахов
Редактор Л.В Иванкова

	Объем 138 стр.	Тираж 25 экз.
Заказ 943	Цена «С»	Регистрационный № 432

Московский государственный институт стали и сплавов,
119991, Москва, Ленинский пр-т, 4
Отпечатано в типографии издательства «Учеба» МИСиС,
117419, Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. Основные процессы, происходящие при бомбардировке вещества ионами, и возможности их использования в технологии	4
Глава 2. Движение ускоренных ионов в веществе. Торможение и рассеяние ионов.....	16
Глава 3. Пробег ионов в твердом теле и их распределение.....	35
Глава 4. Образование радиационных дефектов при облучении ионами	50
4.1. Типы дефектов. Генерация дефектов	50
4.2. Вторичные процессы при образовании дефектов.....	60
Глава 5. Обратное рассеяние ионов	71
5.1. Физические основы метода.....	71
5.2. Применение метода обратного рассеяния ионов	77
Глава 6. Каналирование ионов	79
6.1. Общие сведения	79
6.2. Взаимодействие ионных пучков с поверхностью кристаллов ..	81
6.3. Каналирование ионов в кристалле.....	87
6.3.1. Модель постоянного потенциала.....	88
6.3.2. Эффект блокировки	90
6.3.3. Применение метода каналирования для определения местоположения примеси в кристалле.....	92
6.3.4. Деканалирование.....	93
6.3.5. Введение дефектов анализирующим пучком	97
Глава 7. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой.....	98
7.1. Классификация различных типов распыления.....	98
7.1.1. Предварительные сведения	98
7.1.2. Распыление за счет прямого выбивания.....	101
7.1.3. Распыление за счет электронного возбуждения	103
7.2. Сведения из теории атомных столкновений	105
7.3. Распыление за счет линейных каскадов столкновений.....	117
7.4. Десорбция под действием ионной бомбардировки	126
7.5. Имплантация и перемешивание под действием ионной бомбардировки.....	127
7.6. Распыление многокомпонентных мишеней.....	128
Литература	137

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ВЕЩЕСТВА ИОНАМИ, И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрим кратко, какие процессы могут происходить при воздействии на вещество ускоренных ионов и какие возможности эти процессы открывают в области технологии для направленного изменения свойств твердого тела и их контроля.

При ионной бомбардировке в качестве первичных частиц могут быть использованы как положительные, так и отрицательные ионы, а также нейтральные атомы. Наиболее часто используются ионы, несущие положительный заряд, из-за большей простоты их получения по сравнению с отрицательными ионами и большей простоты ускорения, управления их движением и контроля за количеством по сравнению с нейтральными атомами. Облучение может производиться не только атомарными, но и молекулярными ионами, если это почему-либо целесообразно. Если кинетическая энергия ионов много больше энергии связи атомных частиц в молекулярном ионе, то в большинстве случаев можно считать такие частицы распространяющимися в твердом теле независимо. Нетрудно показать, что энергия каждого из отделившихся атомов E_k равна энергии исходного молекулярного иона E_Σ , умноженной на отношение масс соответствующего атома M_k и молекулы $\sum_k M_k$. Действительно, $E_\Sigma = \sum_k M_k V_1^2 / 2$, откуда $V_1^2 = 2E_\Sigma / \sum_k M_k$. Теперь, если допустить, что в процессе диссоциации скорость не изменяется, то

$$E_k = M_k V_1^2 / 2 = E_\Sigma M_k / \sum_k M_k.$$

Наконец, иногда используют многозарядные ионы, поскольку таким образом при той же ускоряющей разности потенциалов можно полу-

чить ионы с энергией, большей однозарядного потенциала в i раз (i – кратность заряда иона).

Если учесть, что в качестве бомбардирующих частиц можно использовать ионы практически всех элементов таблицы Менделеева, а также молекулярные ионы и частицы в разных зарядовых состояниях, то можно полагать, что ионные пучки являются потенциально более гибким средством воздействия на обрабатываемый или изучаемый материал по сравнению с электронными, так как позволяют в более широких пределах изменять свойства составляющих их частиц.

Двигаясь от ионной пушки к облучаемому образцу, ионы могут взаимодействовать с молекулами и атомами паров и газов, содержащихся в вакуумном объеме, поскольку давление в установке не равно нулю. При этом, как и в случае электронных пучков, первичные частицы могут рассеиваться и терять энергию. Если данные процессы существенны, то пучок теряет моноэнергетичность и направленность, а в объеме появляются чужеродные ионы. Чтобы этого не происходило, длины свободных пробегов ионов, которые обратны произведению концентрации атомов паров и газов на сечение соответствующего взаимодействия, должны быть много больше, чем путь, проходимый ионами. Значения сечений рассеяния ионов и возбуждения ими электронов при энергиях порядка единиц–десятков килоэлектронвольт составляют $10^{-16} \dots 10^{-17} \text{ см}^2$. В этом случае при длине пути ионов в пределах 1 м вакуум в установке должен быть лучше 10^{-2} Па.

Кроме таких эффектов, возможен еще эффект перезарядки ионов. Он сводится к тому, что движущийся ион захватывает электрон у атома, с которым взаимодействует, и продолжает движение уже в нейтральном состоянии. Если в дальнейшем ионный пучок с помощью электростатических отклоняющих пластин будет развернут в растр для однородного облучения достаточно большой поверхности, то возможно существенное нарушение однородности в месте, куда попадают нейтрализовавшиеся ионы, поскольку электрическое поле на них не действует. Так, например, при развертке ионного пучка диаметром 1 см на площадь $10 \times 10 \text{ см}^2$ и нейтрализации около 1% от всех ионов реальные значения дозы в центральной области растра, куда попадает неотклонившийся пучок нейтрализовавшихся частиц, в два раза превышают дозу на остальных его участках. Сечения перезарядки ионов могут достигать значений приблизительно 10^{-15} см^2 , и

нейтрализация около 1% пучка будет происходить при длине его пути в пределах 1 м уже при вакууме примерно 10^{-3} Па. Следовательно, для устранения заметного влияния перезарядки ионов в подобных случаях требуется либо существенно улучшать вакуум, либо выбирать такую геометрию установки, чтобы можно было предотвратить попадание перезарядившихся ионов на облучаемую поверхность, либо осуществлять не электрическую развертку луча, а механическое сканирование образца. Заметим, что эффект перезарядки находит и полезное применение. С его помощью можно создавать пучки нейтральных ускоренных атомов, например, для ионного травления диэлектриков. При этом пучок ионов, ускоренных для необходимой энергии, пропускают через специальную камеру, заполненную газом при относительно высоком давлении, а затем с помощью отклоняющихся пластин удаляют из пучка ионы, оставшиеся в заряженном состоянии.

На рис. 1.1 схематично показано, что происходит в твердом теле при бомбардировке его ионами

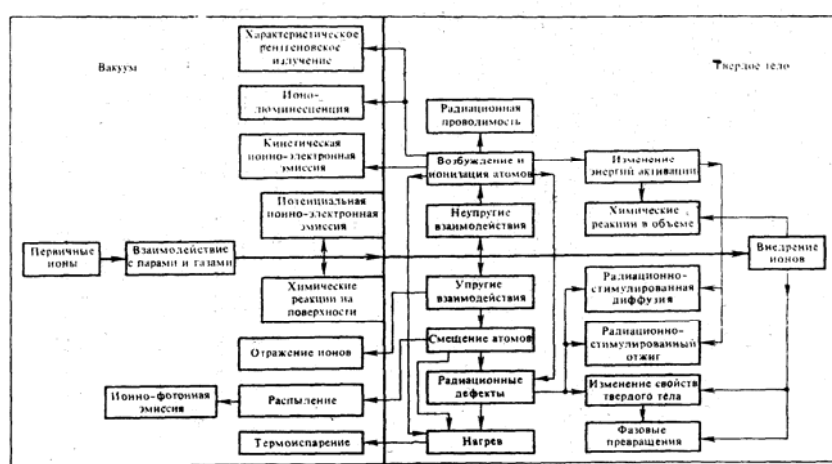


Рис. 1.1. Основные процессы, происходящие при взаимодействии ускоренных ионов с веществом

Система ион – твердое тело обычно обладает запасом потенциальной энергии. Это связано с тем, что электроны в одной части такой системы (например, в твердом теле) энергетически находятся выше, чем свободные уровни в другой части (ионе). При сближении иона с поверхностью на расстоянии порядка атомных становится

возможным переход из твердого тела на нижележащие уровни иона. Высвободившаяся энергия может безызлучательным образом передаться другому электрону твердого тела в результате оже-процесса. Если второй электрон окажется на уровень выше вакуумного и направление его импульса будет благоприятным, то он выйдет в вакуум, и будет наблюдаться эмиссия электронов, называемая потенциальной ионно-электронной. Очевидно, энергетические спектры выходящих в вакуум электронов содержат информацию о плотности распределения энергетических состояний валентных электронов твердого тела в приповерхностных слоях образцов. Разработана методика извлечения такой информации из этих энергетических спектров. Данный метод исследования электронной структуры приповерхностных слоев твердых тел получил название ионно-нейтрализационной спектроскопии.

Если на поверхности твердого тела адсорбированы атомы и молекулы, то, как и в случае электронного облучения, под действием ионной бомбардировки на поверхности могут протекать химические реакции. Этот процесс идет из-за возбуждения электронных состояний атомов и молекул, возникновения свободных химических связей, разрушения адсорбированных соединений.

Проникнув внутрь твердого тела и двигаясь в нем, ионы теряют энергию и рассеиваются. При этом, как и электроны, ионы испытывают два различных типа соударений – упругие и неупругие.

Упругими (ядерными) соударениями называются такие, при которых энергия передается атомам твердого тела. Процесс торможения, связанный с упругими соударениями, имеет дискретный характер. В среднем в каждом таком соударении ион передает атому достаточно большую энергию, так как в отличие от упругих соударений электронов и атомов массы взаимодействующих частиц имеют один порядок. Упругие соударения ионов с атомами сопровождаются также сильным рассеянием первичной частицы.

Неупругими (электронными) являются соударения, в которых энергия иона передается электронам. При каждом соударении передается относительно малая энергия, и торможение в этом случае можно рассматривать как квазинепрерывный процесс.

Неупругие потери не сопровождаются заметным рассеянием первичных ионов, так как слишком велика разница масс взаимодействующих частиц. Каждый из двух типов соударений приводит к ряду явлений, возникающих в твердом теле при облучении его ионами.

Рассмотрим эффекты, обусловленные неупругими соударениями и соответственно неупругими потерями энергии.

Возбуждение электронов – это появление электронов на более высоких, ранее свободных энергетических уровнях и одновременно образование электронных вакансий на заполненных в условиях термодинамического равновесия более низких уровнях. В полупроводниках и диэлектриках в результате неупругих потерь энергии происходит генерация термически неравновесных носителей заряда – свободных электронов и дырок. Соответственно для полупроводников и диэлектриков, как и при электронном облучении, может наблюдаться увеличение их проводимости, т.е. явление радиационной проводимости под действием ионов. В общем случае кинетика и стационарное значение радиационной проводимости определяются эффективностью и распределением по глубине генерируемых носителей, а также параметрами, определяющими их рекомбинацию: коэффициентом диффузии, сечениями захвата на уровни прилипания и рекомбинации, скоростью поверхностной рекомбинации и др. Измеряя радиационную проводимость, можно получить сведения о всех этих величинах. Однако для технологических целей такой метод не является удобным из-за образования радиационных дефектов, которое сопровождает генерацию носителей. Радиационные дефекты даже при небольшом их количестве могут существенным образом менять набор энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводников и диэлектриков, значения подвижностей и, соответственно, коэффициенты диффузии носителей заряда.

Если в результате возбуждения ионами и последующих переходов между энергетическими уровнями часть электронов, находящихся в приповерхностном слое толщиной, равной глубине выхода (~ 1 нм), оказывается на уровнях выше вакуумного и, кроме того, если они имеют благоприятные направления импульсов, то такие электроны могут преодолеть потенциальный барьер на границе твердое тело – вакуум и выйти наружу. Таким образом, будет наблюдаться эмиссия электронов, возникающих в результате неупругих потерь ионами кинетической энергии. Это явление получило название кинетической ионно-электронной эмиссии. С точки зрения технологии, а именно, для измерения примесного состава и характера химических связей в образце, наибольший интерес представляют особенности, наблюдаемые в распределениях по энергиям электронов, выходящих в вакуум в результате такой эмиссии. Появление пиков в этих спек-

трах связано с существованием электронов, не испытавших при выходе потерь энергии и получивших энергию в результате оже-процессов при заполнении низких свободных уровней высележащими электронами. Аналогично тому, как это делается при электронной оже-спектроскопии, изменение высоты и энергетического положения этих пиков можно использовать для получения информации при ионной оже-спектроскопии. В определенных условиях ионная оже-спектроскопия может успешно конкурировать с электронной или дополнять ее.

При релаксации возбуждения электронной подсистемы твердого тела, вызванного неупругими соударениями атомных частиц, энергия может выделяться также и в виде квантов излучения. В этом случае будет наблюдаться свечение, называемое ионнолюминесценцией. Как и для катодолюминесценции, в зависимости от взаимного расположения уровней, между которыми происходит переход, длина волны этого свечения может лежать в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях. При образовании глубоких электронных вакансий, как это имеет место, например, при облучении быстрыми протонами, можно наблюдать и характеристическое рентгеновское излучение. Спектр излучения в области больших длин волн несет информацию о зонной структуре исследуемого объекта, положении примесных уровней и уровней дефектов, об их концентрациях, об экситонных состояниях фононов и др. Регистрируя спектры характеристического рентгеновского излучения, можно получать сведения об элементном составе мишени.

Попутно отметим, что при проникновении ионов в твердое тело, как и в случае электронной бомбардировки, возникают другие виды излучения, непосредственно не связанные с электронным торможением. Это переходное и тормозное излучения. Эти виды излучения имеют заметную интенсивность только при больших скоростях заряженных частиц, т.е. при энергиях значительно больших, чем в случае электронной бомбардировки, так как массы ионов на несколько порядков больше массы электрона.

Изменение зарядового состояния примесных атомов, дефектов кристаллической решетки и собственных атомов твердого тела в результате прямой ионизации или захвата неравновесных носителей может повлиять на их взаимодействие с окружающей решеткой. Это в свою очередь приведет к изменению энергий активации ряда процессов. Так могут, по-видимому, увеличиваться или уменьшаться

коэффициенты диффузии примесей или дефектов. Заметим, что этот эффект увеличения диффузии примеси при заданной температуре в результате воздействия какого-либо вида излучения (в нашем случае – ионов) называется радиационно-стимулированной диффузией. Возможно также изменение скорости распада (отжига) сложных дефектов, возникших в результате объединения нескольких точечных. В частности, дефекты, являющиеся устойчивыми при температуре облучения, могут исчезать в результате снижения энергии активации их отжига или в результате передачи им энергии от возбужденной электронной подсистемы, т.е. неупругие соударения будут приводить при определенных условиях к радиационно-стимулированному отжигу дефектов. Напротив, в результате неупругих соударений в некоторых случаях возможно смещение из равновесных положений атомов решетки и образование радиационных дефектов. Наконец, перечисленные причины могут привести к тому, что начнутся химические реакции в облучаемом объеме, невозможные в равновесных условиях при данной температуре. Естественно, что все рассмотренные эффекты имеют прикладное значение и могут быть использованы или, по крайней мере, должны учитываться при разработке и проведении соответствующих технологических операций.

Обратимся теперь к процессам, которые происходят в твердом теле из-за упругих соударений ионов с атомами вещества. Как уже говорилось, упругие взаимодействия могут приводить к существенному изменению направления движения первичной частицы. При этом, в частности, ион может вновь выйти в вакуум, т.е. произойдет отражение ионов от твердого тела. Такой ион может сохранить свое зарядовое состояние, а может изменить его, превратившись, например, в нейтральную частицу. В большинстве случаев, когда энергия первичного иона во много раз превосходит энергию связи атомов в твердом теле, соударения иона с атомами можно рассматривать как парные. Это значит, что энергия и импульс перераспределяются между ионом и атомом так, как будто последний свободен, т.е. не связан с решеткой. Энергия иона, рассеянного на заданный угол в парном столкновении, если его масса меньше массы рассеивающего атома, однозначно определяется их массами и начальной энергией. Если проводить измерения распределения по энергиям ионов, отраженных в определенном направлении в результате однократного рассеяния, то можно определить элементный состав зондируемого объекта. Метод обратного рассеяния медленных ионов позволяет опре-

делить сорт атомов, находящихся на поверхности, а метод обратного рассеяния быстрых ионов – распределение атомов различных сортов по глубине.

Атомы вещества, получая в результате упругих соударений энергию от первичного иона, смещаются из положения равновесия. Если энергия такого атома оказывается больше энергии связи его в узле кристаллической решетки, то он покинет этот узел. В результате образуется свободный узел – вакансия и атом в междоузлии, т.е. упругие взаимодействия приводят к нарушению кристаллической структуры, или, другими словами, к образованию радиационных дефектов. Простейшие дефекты, двигаясь по кристаллу, могут объединяться между собой и с примесями в более сложные комплексы дефектов или, наоборот, исчезать на различных стоках, или рекомбинировать между собой. Сложные дефекты могут возникать и непосредственно в процессе взаимодействия иона с твердым телом, если происходит практически одновременное смещение большого числа атомов в малой области кристалла, т.е. при больших упругих потерях энергии на единицу длины траектории иона.

Генерация радиационных дефектов в результате упругих соударений иона – весьма эффективный процесс и в отличие от образования радиационных дефектов при неупругих соударениях, где это возможно только для некоторых достаточно “экзотичных” случаев, протекает всегда, когда есть упругие потери и атомам передается энергия порядка 10 эВ. Конечно, не всегда образующиеся дефекты устойчивы при температуре облучения и хранения образца, поэтому не во всех случаях их можно обнаружить после бомбардировки ионами. Однако, если нарушения некоторых типов будут сохраняться, то их наличие существенно изменит различные свойства твердого тела: электрические, магнитные, оптические, химические, механические. Из-за образования дефектов возможны и фазовые переходы, типичным примером которых является переход полупроводниковых образцов под воздействием ионной бомбардировки из кристаллического в аморфное состояние.

Наличие подвижных точечных дефектов с концентрациями, существенно превышающими равновесие, изменяет характеристики диффузии примесей и, в частности, может приводить к радиационно-стимулированной диффузии. Взаимодействуя со сложными комплексами, точечные дефекты могут ускорять их отжиг и, например, восстанавливать кристалличность аморфных слоев при