

№ 2020

Элионная технология в микро- и наноиндустрии

Ускоренные ионы

Учебное пособие

№ 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра технологии материалов электроники

Элионная технология в микро- и наноиндустрии

Ускоренные ионы

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2012

УДК 621.315
Э46

Рецензент
канд. физ.-мат. наук, доц. *Ю.В. Осипов*

Авторы: Г.Д. Кузнецов, А.Р. Кушхов, А.А. Сергиенко, Н.А. Харламов

Элионная технология в микро- и наноиндустрии : ускоренные ионы : учеб. пособие / Г.Д. Кузнецов, А.Р. Кушхов, А.А. Сергиенко, Н.А. Харламов. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2012. – 128 с.
ISBN 978-5-87623-556-5

В учебном пособии рассматриваются в основном практические результаты по изменению параметров приповерхностных слоев материалов электронной техники ионным внедрением примесей. Приводятся результаты по особенностям распределения внедренной примеси в аморфных и кристаллических материалах и их теоретическое обоснование. Анализируются результаты по легированию приповерхностных слоев с использованием так называемых атомов отдачи при ионном внедрении.

Соответствует программе курса «Элионная технология в микро- и наноиндустрии».

Предназначено для магистров, специализирующихся по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Нанотехнология и микросистемная техника», и может быть полезно обучающимся по направлению «Наноматериалы».

УДК 621.315

ISBN 978-5-87623-556-5

© Г.Д. Кузнецов, А.Р. Кушхов,
А.А. Сергиенко, Н.А. Харламов,
2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1. Общие основы физики взаимодействия ускоренных ионов с твердым телом.....	5
1.1. Энергетика взаимодействия ионов с атомами твердого тела.....	5
1.2. Основные эффекты взаимодействия ионов с твердым телом ...	10
2. Пробеги ионов в твердом теле	13
2.1. Распределение внедренных ионов	13
2.2. Локализация атомов примеси и электрические свойства легированных слоев.....	16
2.3. Распределение внедренных ионов в аморфных мишенях	19
2.4. Распределение внедренных ионов в монокристаллах.....	37
2.5. Ускоренная диффузия	50
3. Структурные дефекты в твердом теле при ионном внедрении.....	57
3.1. Первичные дефекты	57
3.2. Вторичные дефекты.....	61
3.3. Разупорядочение решетки	63
4. Легирование наноразмерных гетероструктур атомами отдачи и ускоренными ионами.....	75
4.1. Моделирование профилей распределения атомов отдачи и бомбардирующих ионов в подложке при воздействии ионных пучков на структуры «пленка – подложка»	76
4.2. Легирование подложки бомбардирующими ионами и атомами отдачи при воздействии ионных пучков на структуры «пленка – подложка».....	79
4.3. Практическое применение ионной имплантации.....	84
Библиографический список	95
Приложение 1. Темы практических занятий и домашних заданий к главе 2.....	96
Приложение 2. Аппроксимирующие полиномы для расчета параметров распределений основных примесей в кремнии.....	127

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка современных перспективных устройств микро- и наноэлектроники, микросистемной техники практически невозможна без использования направленных потоков ускоренных ионов для получения пленочных материалов, многослойных гетерокомпозиций, изделий микромеханики и заданного топологического рисунка.

Настоящее учебное пособие посвящено ускоренным ионам. Данная тема тесно связана с такими курсами, как «Физика взаимодействия частиц и излучений с веществом» и «Ионно-плазменная обработка материалов», успешное освоение которых необходимо для понимания практического применения ускоренных ионов в электронике.

Особенностью настоящего пособия является углубленное рассмотрение проявления эффектов взаимодействия энергетических ионов с твердым телом для микросистемной техники.

Особое внимание уделяется распределению внедренных ионов в твердом теле, легированию наноразмерных гетероструктур атомами отдачи и ускоренными ионами.

В конце каждой главы даются контрольные вопросы для проверки усвоения материала, а в прил. 1 и 2 приводятся темы практических и домашних заданий.

1. ОБЩИЕ ОСНОВЫ ФИЗИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

1.1. Энергетика взаимодействия ионов с атомами твердого тела

Виды энергетических потерь ионов

Наряду с развитием термически активируемых процессов получения и обработки материалов все большее распространение в практике получают нетермически активируемые процессы с использованием ускоренных потоков ионизированных и нейтральных атомных частиц и электронов, электромагнитного и лазерного воздействий, плазмы и ядерных реакций.

В этом случае энергия, необходимая для осуществления процесса, передается ускоренными частицами или излучениями атомам и молекулам твердого тела и окружающей его среды. Дополнительного подвода энергии, например тепла, не требуется.

Наибольший прогресс в технологии получения материалов, прежде всего пленочных, достигнут в результате использования процессов с применением ускоренных ионных потоков. К таким процессам относятся процессы получения пленок ионным распылением твердых тел, химическим разложением соединений в условиях ионного облучения, внедрением ионов в поверхностный слой твердого тела и синтезом новых материалов, различного рода покрытий, ионной имплантацией в полупроводниковые материалы и ряд других.

С развитием электроники, в частности микроэлектроники, широкое применение нашли ионные процессы прецизионного удаления материала с поверхности для создания определенного геометрического рисунка, размеры элементов которого достигают десятых и даже сотых долей микрометра.

Наконец, широко применяются многочисленные методы определения параметров материалов с использованием ионного воздействия на их поверхность, получившие название *ионной спектроскопии и спектрометрии*.

В основе всех ионных процессов получения и обработки материалов лежит энергетическое взаимодействие ионов с атомами и молекулами твердого тела, от которого и зависит возникновение и проявление различных эффектов. Воздействие ионов на поверхность твер-

дого тела обуславливает большое разнообразие процессов. Протекание тех или иных из них в первую очередь обуславливается энергией падающих ионов, механизмом потери их энергии, который определяется энергией и природой взаимодействующих частиц.

Условно различают ионы низкой, средней и высокой энергий. В качестве граничной энергии, разделяющей интервалы, где доминирует тот или иной механизм потерь энергии, принимают энергию, значение которой, выраженное в килоэлектронвольтах (кэВ), равно атомному номеру иона, независимо от вещества, в котором ион движется (рис. 1.1). Этот практический критерий называют *критерием Зейтца*. С определенной долей условности к ионам высокой энергии относятся ионы с энергией более нескольких десятков кэВ, к ионам средней энергии – от нескольких кэВ до нескольких десятков кэВ, к ионам низкой энергии – до нескольких кэВ.

При ионной бомбардировке в качестве первичных частиц могут быть использованы как положительно, так и отрицательно заряженные ионы, а также нейтральные атомы.

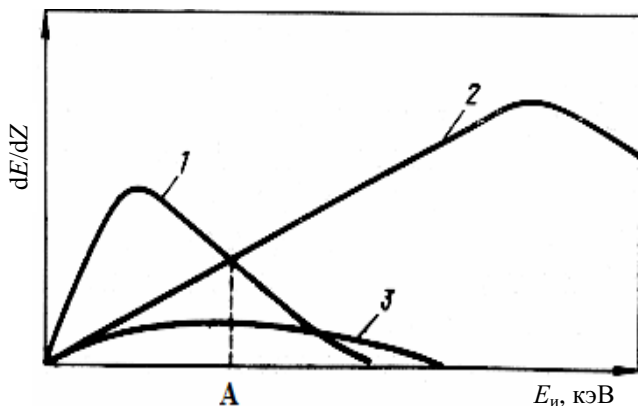


Рис. 1.1. Зависимость энергетических потерь иона dE/dZ от его энергии $E_{и}$: 1 – ядерные потери энергии; 2 – электронные потери; 3 – потеря энергии в результате обмена зарядами между ионом и атомом мишени; значение энергии, определяемое пунктиром, отвечает критерию Зейтца

Наиболее часто используют 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 их количеством по сравнению с нейтральными атомами.

Облучение можно производить не только атомарными, но и молекулярными ионами, если это 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.

Наконец, иногда используют многозарядные ионы, поскольку таким образом при той же ускоряющей разности потенциалов можно получить ионы с энергией, большей однозарядного в i раз (i – кратность заряда иона).

Если учесть, что в качестве бомбардирующих частиц можно использовать ионы практически всех элементов периодической системы Д.И. 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 материал по сравнению, например, с электронными, так как позволяют в более широких пределах изменять свойства составляющих их частиц.

Механизмы возникновения энергетических потерь

При анализе энергетических потерь бомбардирующего поверхность твердого тела иона удобно различать два основных механизма: соударения иона с электронами и соударения иона с ядрами.

Первый механизм состоит в том, что быстрый ион взаимодействует с электронами кристаллической решетки, в результате чего возникают возбуждение и ионизация атомов вещества. Поскольку плотность электронов в веществе мишени высока и такие столкновения многочисленны, этот процесс можно считать непрерывным. По второму механизму взаимодействие происходит между экранированными зарядами ядер первичного иона и атома мишени. Частота таких столкновений ниже, чем в первом случае, поэтому их можно рассматривать как упругие столкновения двух частиц. Взаимодействие ионов высоких энергий хорошо описывается Резерфордским рассеянием, а взаимодействие ионов средних энергий экранированным – Кулоновским рассеянием. При низких энергиях ионов характер взаимодействия становится более сложным.

Кроме перечисленных выше механизмов, вклад в энергетические потери дает обмен зарядами между движущимся ионом и атомом мишени. Этот процесс наиболее эффективен, когда относительная скорость движения иона сравнима с бортовой скоростью движения электрона ($2 \cdot 10^6$ м/с).

Таким образом, полную потерю энергии ионом ($dE_{и}/dZ$) можно представить как сумму трех составляющих – ядерной ($dE_{и}/dZ$)_я электронной ($dE_{и}/dZ$)_э и обменной ($dE_{и}/dZ$)_{об}:

$$\frac{dE_{и}}{dZ} = \left(\frac{dE_{и}}{dZ}\right)_{я} + \left(\frac{dE_{и}}{dZ}\right)_{э} + \left(\frac{dE_{и}}{dZ}\right)_{об}. \quad (1.1)$$

При низких энергиях иона преобладает взаимодействие с ядрами, которое приводит к появлению угловой расходимости ионного пучка. При высоких энергиях более существенными становятся столкновения с электронами (рис. 1.2). В промежуточном диапазоне энергий потери, обусловленные обменом заряда, могут возрастать примерно до 10 % от полных потерь.

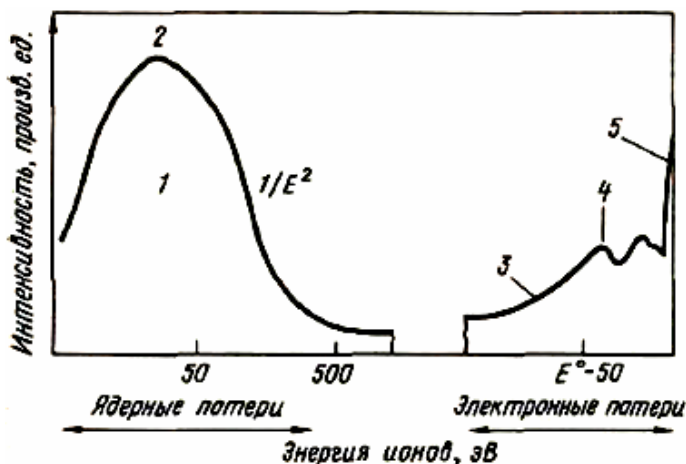


Рис. 1.2. Энергетический спектр рассеянных ионов и атомных частиц:

- 1, 2 – распыленные атомные, в основном нейтральные, частицы;
- 3 – многократно рассеянные атомные частицы мишени; 4 – ионизированные и возбужденные частицы; 5 – обратно-рассеянные ионы

Неупругие взаимодействия с электронами мишени вызывают вторичную электронную эмиссию, характеристическое рентгеновское излучение и испускание световых квантов.

Упругие взаимодействия приводят к смещению атомов в твердом теле, появлению дефектов и удалению атомов с поверхности. Энергетический спектр рассеянных твердотельной мишенью ионов с начальной энергией $E_{и}$ и атомных частиц схематически представлен на рис. 1.2. Широкая низкоэнергетическая (10...50 эВ) полоса соответ-

ствует испусканию нейтральных атомов (распыленные атомы). Относительно узкая высокоэнергетическая полоса, расположенная вблизи энергии первичного иона $E_{и}$ соответствует упруго рассеянным ионам.

Взаимодействие иона с ядрами вещества мишени

Для вычисления потерь (эВ/нм), обусловленных упругим взаимодействием $(dE_{и}/dZ)_{я}$, необходимо знать экранированный ядерный потенциал (потенциал Томаса – Ферми). Однако хорошую приближенную формулу для расчета можно получить, используя для потенциалов взаимодействия простую обратную квадратичную зависимость:

$$\left(\frac{dE_{и}}{dZ}\right)_{я} = 0,278 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \frac{M_1}{M_1 + M_2} N, \quad (1.2)$$

где Z_1, M_1 и Z_2, M_2 – атомные номера и массы первичного иона и атома вещества соответственно; N – плотность атомов или число частиц/нм³.

Расчеты по этой формуле дают для большинства сочетаний ион – атом мишени величину коэффициента энергетических потерь в диапазоне 100...1000 эВ/нм.

Энергия иона $E_{и}$, начальная энергия которого равна $E_{и}^0$, после рассеяния иона на заданный угол θ в любой известной системе определяется законами сохранения энергии и импульса и определяется соотношением

$$E_{и} = \left\{ E_{и}^0 \left[M_1 \cos \theta \pm (M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \right]^2 \right\} / (M_1 + M_2)^2. \quad (1.3)$$

Это выражение справедливо при $M_2 > M_1$ только с положительным знаком, а при $M_2 < M_1$ для обоих знаков, если $\sin \theta \leq M_2/M_1$. Максимальную энергию, которая может быть передана атому мишени при одиночном соударении, определяют из уравнения

$$E_{\max} = \left[4M_1 M_2 / (M_1 + M_2)^2 \right] E_{и}^0, \quad (1.4)$$

приняв $\theta = \pi$.

Если $M_2 > M_1$, при одиночном соударении может происходить обратное рассеяние, тогда как при $M_2 < M_1$ рассеяние обязательно направлено вперед.

Взаимодействие иона с электронами

Если скорость иона превышает скорость электронов на K -оболочке, энергетические потери описываются формулой Бете:

$$(dE_{\text{и}} / dZ) = (4\pi Z_1^2 e^4 / m v_{\text{и}}^2) Z_2 N \ln(2m v_{\text{и}}^2 I), \quad (1.5)$$

где N – плотность атомов среды; m – масса электрона; $v_{\text{и}}$ – скорость движения иона; I – средний потенциал возбуждения атомов тормозящей среды.

При более низких энергиях ионов и больших атомных номерах (Z_1, Z_2) формула Бете несправедлива, так как в ней не учитываются флуктуации заряда, возбуждение колебаний плазмы твердого тела и эффект обмена зарядами. Тогда формула (1.5) принимает вид

$$(dE_{\text{и}} / dZ)_3 = K' E_{\text{и}}^{1/2}, \quad (1.6)$$

где

$$K' = 3,28 \cdot 10^{-3} (Z_1 + Z_2) M_1^{-1/2} N \text{ (эВ}^{1/2} \text{нм}^{-1}\text{)}. \quad (1.7)$$

Учет особенностей замедления тяжелых ионов с более низкой энергией осуществлен в модели Линдхарта, Шарфа и Шиотта (ЛШШ) для аморфных мишеней. В этой модели энергетические потери пропорциональны скорости иона.

Значение коэффициента K' зависит от типа первичного иона и материала мишени.

1.2. Основные эффекты взаимодействия ионов с твердым телом

Выделяют несколько основных разновидностей взаимодействия ионов с твердым телом (рис. 1.3). Падающий ион может обратно рассеиваться атомом или группой атомов бомбардируемого вещества (I). Процесс обратного рассеяния обычно приводит к отклонению траектории движения иона от первоначального направления после столкновения и к обмену энергией между ионом и атомом вещества. Импульс иона может быть достаточно большим, что приводит к смещению поверхностного атома из положения, в котором он слабо связан с кристаллической решеткой материала, в положение, в котором связь оказывается сильнее.

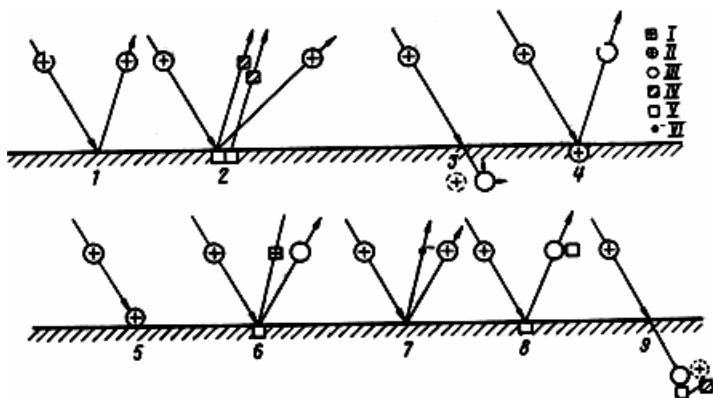


Рис. 1.3. Виды взаимодействий ионов с твердым телом: I, II – положительные ионы; III, IV – нейтральные атомы; V – вакансия; VI – электрон (стрелками показаны направления движения ионов и атомов); 1 – отражение ионов; 2 – распыление ионами (выбивание атомов мишени); 3 – внедрение иона; 4 – перенос заряда; 5 – адсорбция иона; 6 – эмиссия ионов; 7 – эмиссия электронов; 8 – химическое распыление; 9 – дефектообразование

Если соударяющиеся с поверхностью образца ионы передают настолько большой импульс, что полностью освобождают от связей один или несколько атомов, происходит физическое распыление (2). Ионы могут проникать в кристаллическую решетку и захватываться там, израсходовав свою энергию. Этот процесс называется ионным внедрением или ионной имплантацией (3). Бомбардирующие положительные ионы в результате процесса оже-нейтрализации могут приобретать на поверхности электроны и отражаться от нее в виде нейтральных атомов (4). Ионы могут оказаться связанными с поверхностью образца (адсорбированные ионы) (5). Если поверхностные атомы возбуждаются до ионизированного состояния и покидают образец, имеет место вторичная ионная эмиссия (6). В определенных условиях возможно возникновение вторичной электронной эмиссии (7).

В результате химических реакций ионов с поверхностными атомами на поверхности образуются новые химические соединения, причем самый верхний слой атомов может оказаться в газообразном состоянии и испариться (химическое распыление) (8). Ионы с более высокой энергией, двигаясь в объеме твердого тела, вызывают образование различного вида дефектов (9).