

Российская академия наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт электрофизики  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (НАПРАВЛЕННОСТЬ: ФИЗИКА  
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ)»

**Б1.В.ОД.1**

Специальность 03.06.01 – «Физика и астрономия»

**Имплантация ускоренных ионов в вещество**

Материалы разработал:

д.ф.-м.н.

Овчинников В.В.

## ИМПЛАНТАЦИЯ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ В ВЕЩЕСТВО

Рассмотрены возможности ионной имплантации как метода воздействия на химический состав, строение и свойства приповерхностных слоев твердых тел. Представлены сведения из истории развития метода. Дан краткий анализ физических процессов, протекающих при ионной бомбардировке кристаллических мишеней. Приведены примеры использования метода ионной имплантации в современных технологиях.

## ВВЕДЕНИЕ

Необратимые изменения структуры и свойств материалов под действием ионизирующих излучений, в том числе под действием потоков заряженных частиц, впервые были обнаружены при исследовании явления естественной радиоактивности. К настоящему времени достаточно подробно изучены как негативные проявления радиационного воздействия, такие как радиационное набухание, ускоренная ползучесть материалов, повреждение и выход из строя электронных схем в условиях интенсивного облучения, так и позитивные – благоприятное влияние на целый ряд свойств материалов при специальном подборе типа, мощности и дозы облучения.

Использование явления радиоактивного распада для получения потоков корпускулярного и электромагнитного излучения, с целью воздействия на свойства материалов, является неудобным по многим вполне понятным причинам. Формирование управляемых пучков заряженных частиц и, в частности, мощных ионных пучков, стало возможным благодаря созданию ускорителей, в специальных устройствах которых атомы или молекулы ионизируются (образуется плазма), а затем ускоряются электростатическим или электромагнитным полем и могут быть использованы для воздействия на материалы. При изменении полярности ускоряющего напряжения получают как пучки ионов, так и электронов.

Процесс воздействия на вещество пучков ускоренных ионов и существующие технологии ионно-лучевой обработки твердых тел называют **ионной имплантацией**, поскольку ускоренные ионы внедряются (или имплантируются) в твердое тело. Используются также термины **ионное легирование**<sup>1</sup>, **ионное внедрение**, **ионно-лучевая модификация** свойств твердых тел.

Наибольшее применение для этой цели получили ионные пучки с энергией ионов в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен килоэлектронвольт (кэВ)<sup>2</sup>. Для этого диапазона энергий разработана достаточно компактная ускорительная техника, в том числе технологические источники ионов с большим ( $10^2$  см<sup>2</sup> и более) сечением пучка.

Впервые ионная имплантация была использована для формирования необходимых параметров р-п-переходов в полупроводниках путем внедрения в их приповерхностные слои разгоняемых на ускорителях примесей р- и п- типа. Пробеги ионов рассматриваемых энергий в твердых телах (а также продольный и поперечный разброс пробегов отдельных ионов) во всех случаях ограничиваются значениями от нескольких сотых долей микрона до

---

<sup>1</sup> Legurung (нем.) - сплав.

<sup>2</sup> 1эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл · 1А =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

нескольких единиц микрон. Это позволило разработать способы изготовления сложных электронных микросхем с недостижимой ранее рекордной плотностью элементов на единицу площади поверхности. Быстрое развитие микроэлектроники обеспечило в свою очередь прорыв в самых различных областях техники.

Несколько позднее было обращено внимание на то, что ионное облучение может положительно влиять на контактно-химические (жаростойкость, коррозионная стойкость), контактно-трибологические (трение, износ), а также некоторые механические (жаропрочность, циклическая прочность) свойства твердых тел. Причем нередко достигается многократный эффект, т.е. повышение уровня свойств в несколько раз. Это особенно актуально, когда возможности традиционных методов по существу исчерпаны и требуемое для практических целей повышение свойств хотя бы на несколько процентов является серьезной проблемой.

Для воздействия на упомянутые свойства конструкционных материалов, главным образом металлов и их сплавов, потребовались более высокие, чем при легировании полупроводников, флюенсы<sup>3</sup> и, соответственно, более высокие плотности тока ионов, для того, чтобы снизить до разумных пределов время имплантации. Переход от флюенсов  $10^{10}$ - $10^{14}$  см<sup>-2</sup> к флюенсам порядка  $10^{16}$ - $10^{18}$  см<sup>-2</sup> потребовал совершенствования ускорительной техники.

В 1967 г. группой российских физиков, Г.А.Месяцем, С.П.Бугаевым, А.М.Искольдским и Д.И.Проскуровским [1] было обнаружено явление взрывной электронной эмиссии. Из формирующейся в результате взрывной эмиссии плотной плазмы при соответствующей полярности напряжения могут быть получены мощные пучки, как ионов, так и электронов. В дальнейшем были разработаны различные типы плазменных источников с высокой плотностью тока электронов и ионов [2].

Использование методов электронно- и ионно-лучевой обработки материалов позволяет формировать поверхностные свойства практически независимо от состояния объема. Последнее приобретает особую актуальность, когда речь идет о работе твердых тел в контакте с другими средами, например: твердое-твердое, твердое-жидкость, твердое-газ, твердое-плазма (или потоки излучений). Физика воздействия пучков заряженных

---

<sup>3</sup> Флюенс (используется также термин доза облучения) – общее число частиц, прошедших через единичную площадку, перпендикулярную направлению потока частиц (размерность – см<sup>-2</sup>). При определении числа внедренных на единицу площади мишени ионов необходимо принимать во внимание неоднородность плотности ионного тока по сечению пучка, перемещение (если оно имеет место) пучка относительно мишени, а также знать угол между осью пучка и нормалью к облучаемой поверхности. При оценке числа внедренных ионов в вещество следует учитывать также эффекты распыления поверхностного слоя ионным пучком (см. раздел 2).

частиц на твердые тела принципиально отличается от всех известных ранее физических процессов.

Современная ускорительная техника позволяет генерировать как непрерывные пучки электронов и ионов, так и пучки, представляющие собой однократные либо периодически повторяющиеся с частотой  $f$  импульсы тока ускоренных частиц длительностью  $\tau$ . Значения энергии  $E$  частиц, плотности тока  $j$  и длительности импульса  $\tau$  могут изменяться на несколько порядков величины в зависимости от типа и режима работы ускорителя. В связи с этим характер воздействия пучков заряженных частиц на вещество может быть совершенно различным. Так, при  $\tau < 10^{-7}$  с существенную роль в формировании свойств облучаемых материалов играют термоупругие волны (возникающие за счет быстрого нагрева и термического расширения поверхностного слоя вещества при облучении пучками частиц с высокой импульсной плотностью тока). При высоких плотностях тока ионов и электронов, порядка нескольких сотен  $\text{А/см}^2$ , достижимых в условиях импульсного облучения, тонкий поверхностный слой облучаемого материала может "мгновенно" испаряться, что в случае ионно-лучевой обработки приводит к отсутствию эффекта легирования. При этом возникающие на поверхности, вследствие взрывного испарения вещества, ударные волны оказывают существенное влияние на строение и свойства облучаемого материала.

Настоящее учебное пособие ставит своей целью дать представление о физических процессах, имеющих место, главным образом, в зоне пробега внедряемых в вещество ионов (а также в ее ближайшей окрестности). Эти процессы в целом хорошо изучены. Имеется достаточно большое количество базирующихся на них практических приложений, ряд из которых будет нами рассмотрен.

Тем не менее, далеко не все явления, связанные с воздействием ионных пучков на материалы, удается объяснить указанными процессами. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что размеры модифицированной зоны (т.е. зоны с измененными свойствами) зачастую в тысячи и даже в десятки тысяч раз превосходят глубину проникновения ионов в вещество. Об этом свидетельствуют результаты измерения микротвердости по глубине облученных ионами материалов, данные об износе деталей машин после их ионно-лучевой обработки и некоторые другие.

В работах, проводимых лабораторией пучковых воздействий Института электрофизики УрО РАН, обнаружены эффекты перестройки кристаллической решетки металлических сплавов при ионной бомбардировке на глубине, в  $10^3$ - $10^4$  раз превышающей глубину проникновения ионов. Превращения наблюдаются в отсутствие сколько-нибудь существенного нагрева

облучаемых материалов.

Природа "эффектов дальнего действия", проявляющихся в изменении структуры и свойств материалов на глубине, многократно превышающей пробеги ускоренных ионов, рассмотрена в обзорах [3-6]. Часть этих данных представлена в разделе 4 настоящего пособия

Предпочтение отдается рассмотрению фундаментальных аспектов воздействия пучков ускоренных ионов на вещество, определяющихся их корпускулярной природой и являющихся общими как для непрерывных, так и для импульсных ионных пучков. Различия, связанные с макроскопическими параметрами ионных пучков (как концентрированных потоков энергии), обуславливающие при высоких плотностях мощности ( $>10^7$  Вт/см<sup>2</sup>) интенсивное гидродинамическое и тепловое воздействие, будут интересовать нас в меньшей степени. Для учета роли этих эффектов могут быть использованы результаты теоретического и экспериментального исследования воздействия на вещество мощных лазеров [7].

## 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА

Подробный исторический обзор первых работ по ионной имплантации (самые первые из них появились в середине этого столетия) дан в книге Г.Риссела и И.Руге (H.Ryssel, I.Ruge) [8].

Впервые было замечено Р.Олом (R.Ohl, 1952) и В.Кассинсом (W.Cussins, 1956), что ионная бомбардировка приводит к изменению свойств полупроводниковых контактов, так что в некоторых случаях удавалось уменьшить обратный ток диода. Первый патент на технику ионной имплантации был получен В.Шокли (W.Shockley) в 1957 году. В этом патенте было отмечено, что после ионной имплантации необходим отжиг материала (выдержка при повышенных температурах) для стимулирования диффузионных процессов с целью "залечивания" радиационных дефектов (на уровне отдельных атомов), снижающих эффект позитивного воздействия на свойства.

С тех пор количество работ по ионной имплантации постоянно увеличивается. Найдены уникальные приложения метода в самых различных областях техники. Так, еще в 1962 г. были созданы первые детекторы ядерных излучений посредством имплантации фосфора в кремний. В Массачусетсе уже в 1963 г. были начаты исследования по созданию солнечных батарей методом ионной имплантации.

Параллельно с развитием экспериментальных исследований в работах Линдхарда, Шарфа и Шиотта (J.Lindhard, M.Scharff, H.E.Schiott) на основе

результатов, полученных ранее Нильсом Бором (N.Bohr), была построена теория распределения пробегов ионов в твердых телах.

Существенный вклад в разработку новых ионно-лучевых технологий внесли такие зарубежные ядерные центры, как лаборатория ядерных исследований Чок-Ривер, Ок-Риджская национальная лаборатория (США), научно-исследовательский атомный центр в Хэруэлле (Великобритания).

Примерно в те же годы исследования в области ионной имплантации были начаты в бывшем СССР, независимо от зарубежных. Последние так же, как и отечественные, долгое время были засекречены. Первоначально исследования проводились в Институте атомной энергии им.И.В.Курчатова (в настоящее время Российский Научный Центр "Курчатовский институт"), Горьковском университете, Ленинградском физико-техническом институте, а также в Новосибирске. Среди российских специалистов у истоков ионно-лучевой технологии стояли такие крупные ученые и инженеры-технологи, как В.М.Гусев, М.И.Гусева, М.М.Бредов, П.В.Павлов, Д.И.Тетельбаум, В.С.Вавилов, Ю.П.Докучаев, В.А.Стружинский, В.А.Симонов, И.А.Аброян, О.Б.Фирсов, Л.С.Смирнов, Н.Н.Герасименко. Принципиально важные научные результаты и технические решения, принадлежащие этим исследователям, широко используются научными лабораториями и промышленными предприятиями как в России, так и за рубежом.

Начиная с 1967 года проведено большое число международных конференций, сначала только по полупроводниковым, а затем и по другим достаточно многочисленным ионно-лучевым технологиям.

Серьезным вниманием ученых пользуются проводимые один раз в два года чередующиеся между собой конференции по фундаментальным и прикладным вопросам ионно-лучевой обработки материалов: Поверхностная модификация металлов ионными пучками (Surface Modification of Metals by Ion Beams – SMMIB) и Ионно-лучевая модификация материалов (Ion Beam Modification of materials – IBMМ). Проводится и целый ряд конференций, посвященных физике генерации пучков заряженных частиц и конкретным достижениям в области создания импульсных и непрерывных источников ионов и электронов с самыми различными параметрами (энергией, плотностью тока, сечением пучка и т.д.).

## 2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕХАНИЗМЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ ПРОБЕГА ИОНОВ И ЕЕ ОКРЕСТОНОСТИ

**Торможение ионов.** Имеется несколько каналов рассеяния энергии при

торможении ускоренных ионов в твердых телах и соответственно несколько независимых механизмов торможения. Основные из них следующие [8]:

1. Неупругие соударения со связанными электронами тормозящего вещества. Потери энергии при таких соударениях обусловлены возбуждением и ионизацией атомов или молекул.

2. Неупругие соударения с ядрами. Они вызывают тормозное рентгеновское излучение, возбуждение ядер и/или ядерные реакции.

3. Упругие соударения со слабо связанными электронами.

4. Упругие соударения с ядрами (атомами). При этом часть кинетической энергии передается атомам мишени.

5. Черенковское излучение (эффект Вавилова-Черенкова).

Потери, обусловленные эффектами 2, 3 и 5, для используемого в ионной имплантации диапазона энергий ионов либо полностью отсутствуют, либо пренебрежимо малы по сравнению с потерями, обусловленными эффектами 1 и 4.

Действительно, энергии имплантируемых ионов, не превышающие нескольких сотен кэВ, недостаточны для преодоления кулоновского потенциала ядер мишени, и следовательно, для их возбуждения, т.е. перевода в квантовые состояния с более высокой энергией, а также для протекания ядерных реакций (в противном случае пришлось бы иметь дело с таким неприятным явлением, как активация мишеней).

В ходе торможения сталкивающиеся частицы, имея эффективный заряд и двигаясь с ускорением, становятся источниками тормозного электромагнитного излучения. Однако оно обуславливает лишь пренебрежимо малую часть потерь кинетической энергии ионов.

Черенковское излучение возбуждается заряженными частицами, которые движутся со скоростью, превышающей фазовую скорость света в среде. Даже для самого легкого иона  $H^+$  соответствующая пороговая энергия составляет около  $10^8$  эВ, а следовательно, в случае ионной имплантации потери на черенковское излучение отсутствуют. Потери энергии в результате упругих столкновений ионов со слабо связанными электронами также крайне малы. Физика процесса та же, что и в случае упругих столкновений с ядрами (атомами) мишени, которые рассматриваются ниже.

С учетом вышесказанного, при описании торможения ионов, имплантируемых в твердое тело, мы будем рассматривать только два эффекта: неупругие соударения с электронами (электронное торможение) и упругие соударения с ядрами (ядерное торможение). Какой из этих эффектов преобладает – зависит от энергии иона, а также от атомного номера и массы иона и атомов мишени.

Первый из них состоит в том, что движущийся ион, сталкиваясь с

атомами или молекулами мишени, способен вызывать их возбуждение и ионизацию, т.е. происходит переход электронов на более высокие энергетические уровни или вырывание одного или нескольких электронов из атома или молекулы.

Второй эффект связан с тем, что налетающий ион, упруго сталкиваясь с атомами мишени, постепенно передает им свою кинетическую энергию и в конце концов останавливается. Этот механизм можно проиллюстрировать на примере столкновения бильярдных шаров. Если движущийся шар испытывает ряд столкновений с первоначально покоящимися шарами, рассеиваясь (т.е. отскакивая от них) под разными углами, то его скорость заметно уменьшится. Покоящиеся же шары станут двигаться и, в свою очередь, будут способны приводить в движение другие шары. Последнее замечание имеет отношение к возникновению каскадов атомных смещений (см. раздел “Образование радиационных дефектов”). При лобовом соударении налетающий и покоящийся шары, имеющие одинаковую массу, обмениваются кинетическими энергиями, т.е. первый остановится, а второй начнет двигаться со скоростью первого. В общем случае энергия  $E_2$ , передаваемая частице мишени с массой  $M_2$  налетающей частицей с энергией  $E_1$  и массой  $M_1$ , определяется соотношением  $E_2 = E_1 A \cos \Phi$ , где  $A = 4M_1 M_2 / (M_1 + M_2)^2$  – коэффициент передачи энергии,  $\Phi$  – угол рассеяния в системе отсчета, связанной с центром масс сталкивающихся частиц.

Для описания торможения ионов в веществе вводят понятия сечений электронного и ядерного торможения  $S_{e,n}$

$$S_{e,n} = -(1/N) (dE/dx)_{e,n}, \quad (1)$$

где  $dE/dx$  – потери энергии на единицу длины пробега иона (вследствие зависимости от энергии ионов эти потери изменяются по глубине мишени в ходе торможения),  $N$  – число атомов мишени в единице объема. Общий характер зависимости электронного и ядерного торможения от энергии показан на рис. 1. Численные значения обозначенных на этом рисунке характерных энергий  $E_1 < E_2 < E_3$  для различных комбинаций ион-мишень содержатся в пределах:  $E_1 = 1 - 10^3$  кэВ,  $E_2 = 10 - 10^4$  кэВ,  $E_3 = 10^3 - 10^6$  кэВ. В области энергий  $E < E_3$  торможение ионов описывается теорией Линдхарда-Шарфа-Шиотта (ЛШШ-теория), а при более высоких – теорией Бете-Блоха (H.Bethe, F.Bloch). При  $E < E_2$  преобладают ядерные потери, а при  $E > E_2$  – электронные.

В предположении о независимости процессов электронного и ядерного торможения ионов можно записать

$$-dE/dx = N [S_e(E) + S_n(E)]. \quad (2)$$

Если зависимости  $S_e(E)$  и  $S_n(E)$  известны, то можно получить оценку средней общей длины пробега иона с начальной энергией  $E$  в аморфном теле

$$R = (1/N) \int_0^E dE / (S_e(E) + S_n(E)). \quad (3)$$

Теория ЛШШ дает для сечения электронного торможения соотношение  $S_e(E) = qE^{1/2}$ , где коэффициент  $q$  определяется значениями атомных масс и зарядов ядер бомбардирующих ионов и атомов мишени. Соотношение для  $S_n(E)$  является более сложным и задает зависимость с максимумом в точке  $E_1$  (рис.1).

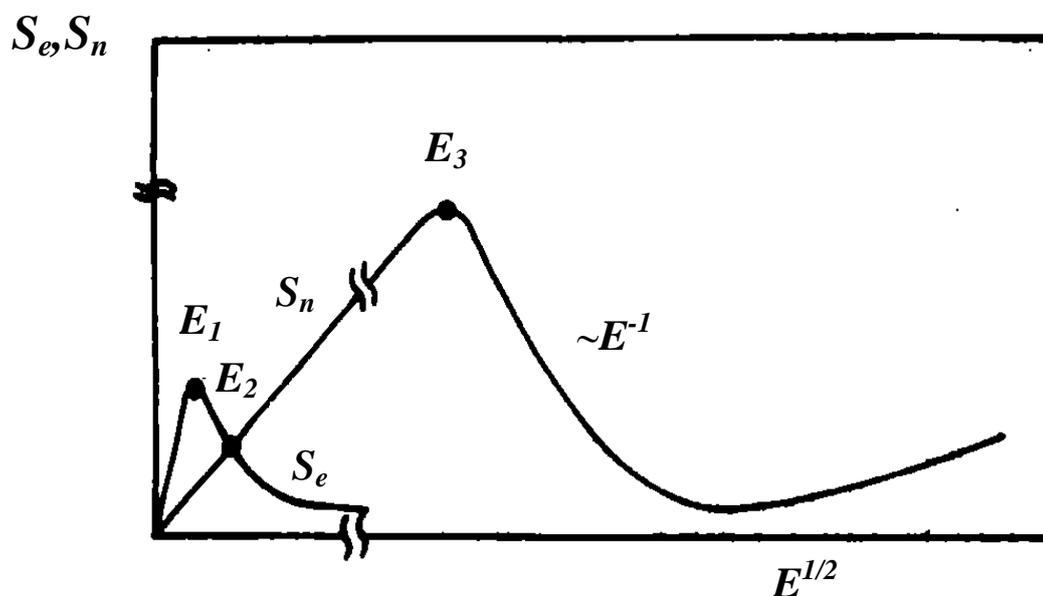


Рис.1. Сечения электронного  $S_e$  и ядерного  $S_n$  торможения ионов как функция их энергии (схема)

**Распределение пробегов. Профили концентрации внедренных ионов.** Согласно теории ЛШШ пробеги ионов по глубине мишени описываются гауссовым распределением  $f(x) = (\sqrt{2\pi} \Delta R_p)^{-1} \exp[-(x - R_p)^2 / (2(\Delta R_p)^2)]$  и характеризуются средним проективным пробегом<sup>4</sup> и стандартным

<sup>4</sup> Средний проективный пробег (проективный пробег) ионов – среднее расстояние на которое проникают в глубину плоской мишени ионы пучка, перпендикулярного ее поверхности

отклонением  $\Delta R_p$ ,  $R_p$  (в дальнейшем для простоты - проективным характеризующим разброс значений пробегов (рис. 2, а). Вероятность того, что пробег иона находится в пределах от  $x$  до  $x+\Delta x$  ( $x$  – расстояние от поверхности мишени) равна произведению  $f(x)\Delta x$ . Значения  $R_p$  и  $\Delta R_p$  согласно теории ЛШШ определяются энергией бомбардирующих ионов, а также соотношением порядковых номеров и атомных масс ионов и атомов мишени.

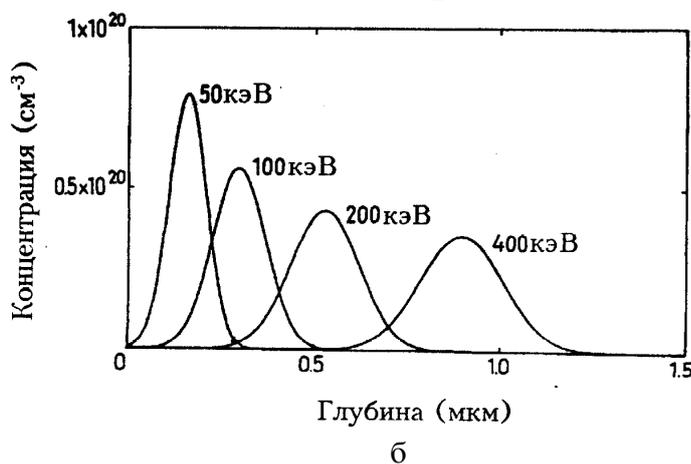
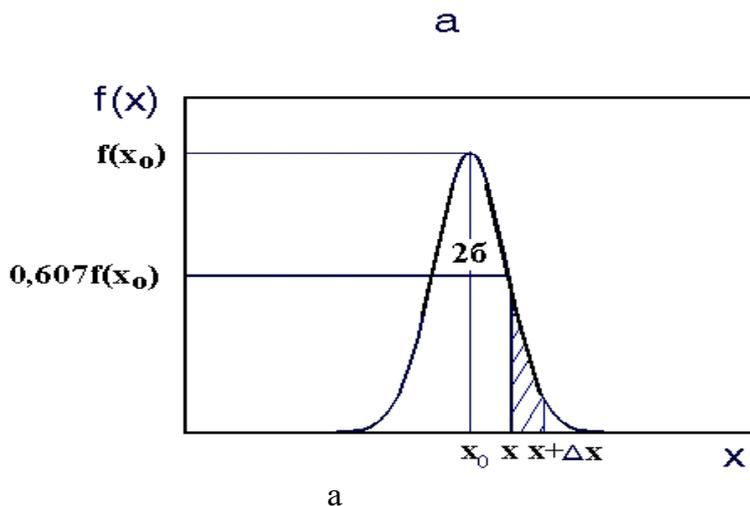


Рис.2. Распределение пробегов ионов: а – функция Гаусса (гауссиан):  $f(x)=1/(\sqrt{2\pi} \sigma) \exp [- (x-x_0)^2 /2 \sigma^2]$ ; при  $x_0=R_p$  и  $\sigma=\Delta R_p$   $f(x)$  описывает предсказываемое теорией ЛШШ распределение имплантированных атомов по

(среднее значение проекции траектории иона на нормаль к облученной поверхности). Используется для характеристики глубины проникновения в вещество ионов фиксированной энергии.

глубине мишени (заштрихованная площадь – вероятность того, что пробег иона заключен в интервале  $x+\Delta x$ ; вся площадь под гауссовской кривой равняется единице);  $b$  – теоретические функции распределения пробегов (концентрационные профили) ионов  $B^+$  в  $Si$ .

Для того чтобы от распределения пробегов перейти к распределению концентрации внедренной примеси  $c(x)$  по глубине мишени достаточно  $f(x)$  умножить на значение флюенса  $c(x) = F f(x)$ ,  $см^{-3}$ . Кривые  $c(x)$  называются профилями концентрации внедренной примеси или концентрационными профилями. На рис. 2,б распределение пробегов представлено как раз в виде профилей концентрации примесей.

Для кристаллических мишеней может наблюдаться заметное отклонение экспериментально наблюдаемых профилей распределения ионов по глубине от расчетных, вследствие рассматриваемых ниже эффектов ионного каналирования, распыления поверхностного слоя падающими ионами и радиационно-усиленной диффузии.

**Образование радиационных дефектов.** Процесс упругого соударения ионов с ядрами (атомами) мишени сопровождается, в зависимости от энергии и массы имплантированных ионов, а также массы атомов мишени, выбиванием большего или меньшего числа атомов из их устойчивых положений в твердом теле. В периодических кристаллах такими устойчивыми положениями являются положения атомов в узлах кристаллической решетки. Выбитые со своих мест атомы при наличии у них достаточной энергии могут, в свою очередь, смещать другие атомы, т.е. вызывать каскад атомных смещений. Это приводит к накоплению вблизи траекторий ионов вакансий и междоузельных атомов (пар Френкеля) и сложных дефектов решетки – кластеров.

Распределение радиационных дефектов в твердых телах в общем случае не совпадает с распределением ионов, поскольку бомбардирующий ион проходит в мишень глубже области, где наблюдается максимальная передача его энергии атомам мишени. Поэтому следует ожидать, что максимум радиационных дефектов расположен ближе к поверхности, чем максимум распределения внедренных ионов.

Первые модели образования дефектов в твердых телах были предложены Кинчином, Пизом, Снайдером, Нейфельдом, Сандерсом (G.H.Kinchin, R.S.Pease, W.S.Snyder, J.Neufeld, J.B.Sanders) и др. Для среднего числа смещенных атомов  $N(E)$  различные теории в пределе  $E \gg E_d$  дают соотношение одного и того же вида  $N(E) = \alpha E / (2E_d)$ , где  $E$  – энергия иона,  $E_d$  – средняя энергия, необходимая для смещения атома из устойчивого положения в решетке,  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий эффективность смещений (с учетом энергетических потерь на электронное торможение). Тяжелые ионы при столкновении могут передать атомам решетки больше энергии, чем легкие. На

рис. 3 показана схема образования радиационных дефектов легкими и тяжелыми ионами.

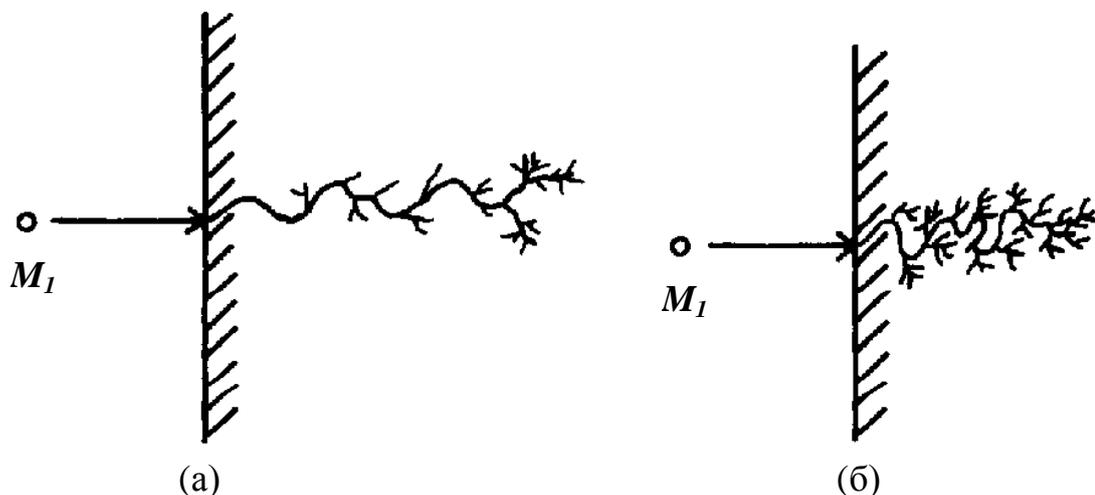


Рис.3. Схема образования радиационных повреждений (развитие каскадов атомных смещений) для (a) легких ионов ( $M_1 < M_2$ ) и (b) тяжелых ( $M_1 > M_2$ )

**Каналирование.** Неожиданным результатом экспериментов, проводимых на кристаллических мишенях, оказалось существование "хвоста" распределения внедренных атомов по глубине мишени (до  $500 \text{ нм}^{/5}$  при имплантации ионов  $^{85}\text{Kr}$  с энергией 40 кэВ в  $\text{Al}$ , что в несколько раз превышает средний проективный пробег ионов). Этот эффект не проявляется для аморфных тел. Моделирование на ЭВМ пробега ионов в кристаллах показало, что примерно одна из  $10^4$  траекторий ионов особенно длинна. На основе результатов эксперимента и численного моделирования было установлено, что такие траектории расположены вдоль наиболее открытых "каналов" между плотно упакованными рядами атомов. Эффект был назван эффектом каналирования. Например, в гранецентрированной кубической (ГЦК) решетке наиболее открытыми являются каналы между плотно упакованными рядами атомов в направлении  $\langle 110 \rangle$  (так обозначается семейство направлений вдоль биссектрис углов  $\text{XOY}$ ,  $\text{XOZ}$ ,  $\text{YOZ}$  при условии, что оси координат совпадают с ребрами элементарной ячейки ГЦК решетки рис. 4).

Как следует из численных расчетов, каналируемой является лишь незначительная часть ионов, которые сразу, или после некоторого количества столкновений с атомами мишени, попадают в соответствующий канал. Для различных направлений каналирования существуют предельные (или критические) углы каналирования, под которыми ион может входить и

двигаться внутри канала. Эти углы не превышают нескольких градусов.

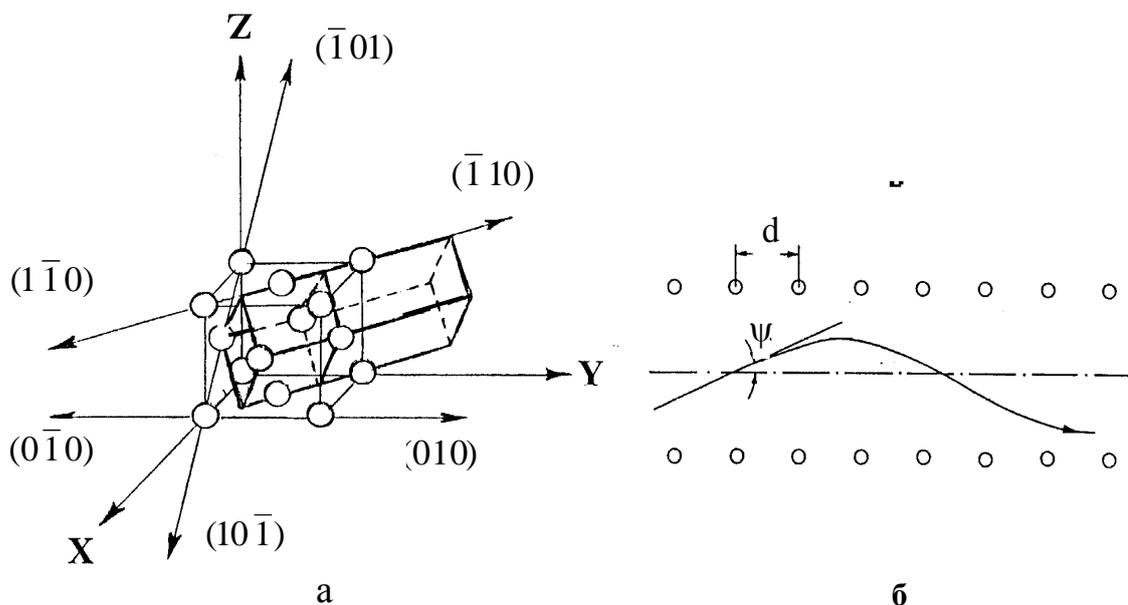


Рис.4. Иллюстрации к эффекту ионного каналирования: а – элементарная ячейка ГЦК решетки (показаны некоторые из двенадцати направлений семейства направлений  $\langle 110 \rangle$  и участок одного из открытых каналов – жирные линии), б – траектория движения атома в канале при  $\Psi < \Psi_c$  ( $\Psi_c$  – критический угол каналирования)

Каналируемый атом отдает свою энергию многим тысячам атомов, не создавая радиационных повреждений. В силу этого каналирование влияет на профили распределения ионов и радиационных дефектов по глубине мишени. Наличие "хвостов" на распределениях внедренных ионов, простирающихся на глубину, в несколько раз превышающую  $R_p$ , иллюстрирует рис. 5.

Открытые каналы постепенно "забиваются" внедряемыми ионами и при флюенсах, превышающих  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ , эффект каналирования исчезает.

**Термические пики.** Расчеты показывают, что за время порядка  $10^{-13}$  -  $10^{-12}$  с каскад атомных столкновений завершается и термализуется (т.е. реализуется максвелловское распределение энергий отдельных атомов в зоне каскада). Оценки характерных значений времени, необходимого для отвода энергии из области каскада как по электронной, так и по ионной подсистеме, составляют в том и другом случае около  $10^{-11}$  с. Это означает, что процесс

эволюции каскада на анализируемой стадии может рассматриваться как квазиadiaбатический, т.е. не сопровождающийся обменом энергией с окружающей средой. В силу этого возможен существенный разогрев каскадных областей с образованием так называемых тепловых или термических пиков (thermal spikes). Температура в области пика может быть оценена из соотношения:  $T = T_0 + E/((4/3\pi r_0^3) N (3/2k))$ , где  $T_0$  – исходная температура кристалла;  $E$  – энергия иона, образующего плотный каскад атомных смещений;  $r_0$  – радиус каскадной области (величина порядка  $\Delta R_p$ );  $N$  – атомная плотность (число атомов в единице объема);  $k$  – постоянная Больцмана. Для высокой температуры теплового пика необходимо сочетание небольшого пробега и высокой энергии имплантируемых ионов.

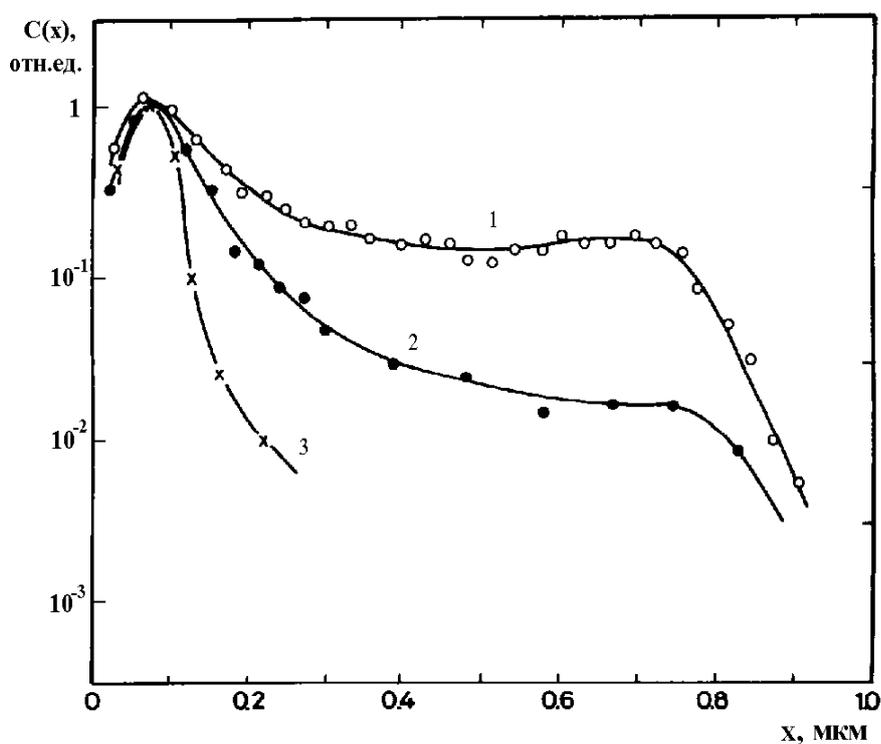


Рис.5. Концентрационные профили ионов  $^{32}P^+$ ,  $E=40$  кэВ, имплантированных в  $Si$  в направлении  $\langle 110 \rangle$  как функция флюенса (1 –  $1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 2 –  $8,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 3 –  $7,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) [8].

При характерных для ионной имплантации энергиях ионов температура в области термических пиков (согласно квазиadiaбатическим оценкам и результатам численного моделирования эволюции атомных каскадов на ЭВМ) может достигать нескольких тысяч градусов. Это дает дополнительный механизм образования дефектов за счет сверхбыстрого разогрева и последующей сверхбыстрой закалки (со скоростью до  $10^{15} \text{ К/с}$ ) прикаскадных областей.

Важным является то, что сверхбыстрый (практически взрывной) разогрев прикаскадных областей при ионной бомбардировке порождает мощные микроударные волны, способные являться спусковым механизмом для нового типа радиационно-индуцированных превращений в метастабильных средах (см. [6,9]).

**Ионное распыление.** В процессе ионной имплантации происходит распыление поверхностного слоя мишени бомбардирующими ионами. Этот эффект необходимо принимать во внимание особенно при высоких флюенсах. Следует учитывать два основных механизма распыления атомов поверхностного слоя: 1) кинетическое (поштучное) распыление, которое происходит за счет передачи при соударениях значительной кинетической энергии атомам мишени (траектория этих атомов может оказаться таковой, что в результате они покинут твердое тело) и 2) термическое распыление, которое обусловлено испарением атомов из области термических пиков, возникающих в непосредственной близости от поверхности. При мощных импульсных воздействиях, как уже отмечалось во введении, может происходить полное испарение поверхностного слоя мишени. В результате эффект ионного легирования будет отсутствовать.

При не очень высоких плотностях ионного тока ионное распыление будет приводить лишь к изменению профиля внедренных ионов. При этом максимум концентрации внедренных ионов будет находиться от поверхности на расстоянии, меньшем расчетного значения  $R_p$ . Концентрация же

внедренных ионов на поверхности будет заметно отличаться от той, которая наблюдалась бы в отсутствие эффекта распыления.

Скорости распыления поверхностных атомов определяются значениями коэффициентов распыления, которые зависят от сорта бомбардирующих поверхность ионов, их энергии, состава и структуры распыляемого материала и, наконец, от сорта самих распыляемых элементов. Коэффициент распыления равен среднему числу атомов данного сорта, распыляемых одним падающим ионом. Вследствие различия коэффициентов распыления ионное распыление приводит к изменению состава поверхностного слоя многокомпонентных мишеней. При длительном распылении на поверхности устанавливается такая концентрация элемента, произведение которой на коэффициент распыления дает объемную концентрацию этого элемента.

**Радиационно-усиленная (radiation-enhanced) диффузия.** Используют также термины радиационно-ускоренная и радиационно-стимулированная диффузия.

Под этим процессом понимают диффузию, которая в отличие от термически стимулированной развивается благодаря наличию радиационного воздействия. Причиной усиления или ускорения диффузии является образование повышенного количества дефектов, в идеальном случае – вакансий, наличие которых значительно повышает коэффициент диффузии, т.к. примеси и собственные атомы вещества диффундируют главным образом по вакансиям. Радиационно-усиленная диффузия может наблюдаться как непосредственно в ходе ионной бомбардировки (при сопутствующем разогреве поверхностных слоев облучаемых мишеней), так и после нее и приводит к размытию профиля внедренных ионов и, следовательно, к некоторому расширению модифицированной поверхностной зоны.

Следует отметить, что скорость диффузии как по вакансиям, так и по междоузлиям зависит от сорта диффундирующего атома. В силу этого, радиационно-стимулированные потоки диффузии различных химических элементов в направлении градиентов концентрации дефектов существенно различны. При нормальном к поверхности мишени падении пучка (и достаточно высокой для перекрытия отдельных каскадов дозе облучения) градиенты концентрации вакансий и междоузельных атомов перпендикулярны к облучаемой поверхности и меняют знак при продвижении от поверхности в глубь мишени. Селективная (избирательная) диффузия наряду с эффектом селективного распыления приводит к изменению состава поверхностного слоя мишеней, состоящих из двух или более химических элементов.

### 3. О СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТАХ И СВОЙСТВАХ КРИСТАЛЛОВ

Для того чтобы в дальнейшем понять причины влияния ионной бомбардировки на свойства кристаллов, сделаем одно необходимое отступление.

В настоящее время существует достаточно глубоко и подробно разработанная теория прочности и пластичности реальных кристаллов, хорошо описывающая их свойства. Согласно выводам этой теории, полностью подтверждаемым экспериментом, эти свойства определяются, с одной стороны, типом кристаллической решетки и характером химической связи между атомами<sup>6</sup> с другой стороны, и, в не меньшей степени, наличием в кристалле различных типов дефектов, количеством этих дефектов, их пространственным распределением и взаимодействием между собой.

Различают точечные (нульмерные) и протяженные (одномерные, двухмерные и трехмерные) дефекты в кристаллах. К точечным или нульмерным относят вакансии (отсутствие атома в узле решетки) и междоузельные атомы. При переходе атома из узла решетки в междоузелье образуется упоминавшаяся выше пара Френкеля (вакансия и междоузельный атом). Образование большого числа пар Френкеля в кристаллах происходит при интенсивных радиационных воздействиях.

Помимо нульмерных или точечных дефектов в реальных кристаллах всегда присутствуют протяженные дефекты, важнейшими из которых являются дислокации [10]. Дислокации (лат. *dislocatio* – смещение) – это дефекты кристаллов, представляющие собой линии вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристаллов правильное расположение плоскостей. Простейшим видом дислокации является краевая дислокация, представляющая собой лишнюю полуплоскость, т.е. плоскость, обрывающуюся внутри кристалла.

Для пластической деформации<sup>7</sup> бездефектного кристалла, в котором отсутствуют дислокации, необходимо осуществить синхронные жесткие сдвиги атомных плоскостей друг относительно друга. Требуемые для этого напряжения определяются теоретическим модулем сдвига  $G$  и обычно составляют несколько десятков ГПа при  $T \ll T_{\text{плав}}$ . Напряжения же, необходимые для деформации реальных кристаллов, на 2-3 порядка меньше

---

<sup>6</sup> Тип решетки и характер химической связи определяются электронным строением атомов вещества, макро- и микрораспределением атомов разного сорта и их динамикой, т.е. температурой.

<sup>7</sup> Деформации, вызывающей, в отличие от упругой, необратимое изменение формы кристалла.

этих значений, что объясняется наличием в них дислокаций. Последние перемещаются при значительно меньших напряжениях в полном согласии теории с экспериментом. При наличии в кристаллах большого количества точечных дефектов и дислокаций движение последних затрудняется, в частности из-за взаимодействия их собственных полей напряжений и пересечения отдельных дислокаций. В результате пластичность материалов понижается. В силу сказанного, максимальными прочностными свойствами обладают практически бездефектные кристаллы, а также кристаллы с очень высоким количеством дефектов.

Увеличение плотности дислокаций и точечных дефектов влияет не только на механические, но и на другие физические свойства кристаллов. Изменяются оптические свойства, повышается электросопротивление (вследствие появления дополнительных центров рассеяния электронов), увеличивается скорость диффузии и т. д.

Ионная бомбардировка, наряду с увеличением плотности точечных дефектов в тонком поверхностном слое материала, может вызывать изменение плотности дислокаций на значительной глубине [11], а также инициировать процессы, сопровождающиеся изменением типа кристаллической структуры мишеней, распространяющиеся от поверхности в объем вещества [6, 9].

#### 4. УСПЕХИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Этот раздел, безусловно, не ставит своей целью дать полный обзор всех приложений метода ионной имплантации, что в настоящее время сделать практически невозможно. Попытаемся лишь на нескольких типичных примерах проиллюстрировать принципиально новые возможности ионной имплантации и некоторые ее преимущества перед традиционными методами.

Итак, облучение ускоренными ионами приводит к образованию большого количества радиационных дефектов в тонком поверхностном слое вещества и вызывает изменение химического состава этого слоя как за счет внедрения ионов (ионное легирование), так и за счет изменения концентрации химических элементов, входящих в состав самих мишеней (если они состоят из двух или более компонентов). Последнее, как отмечалось, происходит вследствие селективного распыления поверхностного слоя бомбардирующими ионами и селективной радиационно-усиленной диффузии. Кроме того, образование радиационных дефектов и изменение химического состава стимулируют протекание вторичных процессов [8], таких как образование новых кристаллических фаз, формирование аморфных слоев, микропор и т.д.

Это приводит к изменению физических свойств материалов. Необходимо учитывать также роль высоких статических напряжений, возникающих при внедрении примеси, а также роль динамических послекасадных процессов, приводящих, к образованию и распространению микроударных волн (см. [6,9,12]), что существенно повышает глубину воздействия на строение и свойства материалов.

Ионная имплантация как способ поверхностной обработки материалов имеет следующие преимущества перед традиционными методами:

1) любой химический элемент может быть введен в любое вещество, даже если он абсолютно не растворим в нем в равновесных условиях;

2) глубина проникновения и концентрация внедряемой примеси строго контролируются;

3) низкая температура процесса (по сравнению с обычным сплавлением или легированием из расплава);

4) возможность формирования на поверхности высокодефектных неравновесных структур с необычными свойствами (в частности, возможно получение аморфного состояния);

5) высокая экологическая чистота технологического процесса, легко воспринимаемого промышленностью (процесс осуществляется в вакууме, отсутствуют вредные химические выбросы, наведенная радиоактивность; стенки камер современных имплантеров полностью поглощают относительно слабо интенсивное тормозное рентгеновское излучение);

6) отсутствие изменения размеров обрабатываемых деталей (в связи с этим ионную имплантацию можно использовать для финишной обработки изделий, иногда ее называют суперфинишной).

К недостаткам метода следует отнести:

1) малую толщину модифицируемого слоя;

2) наличие геометрической тени (т.к. ионы распространяются прямолинейно) и, следовательно, невозможность обработки скрытых поверхностей.

Последний недостаток в значительной степени преодолевается путем использования специально разработанных методов имплантации из плазмы, в которую помещаются изделия сложной формы.

Для увеличения толщины модифицируемой зоны производят совмещение ионной имплантации с другими процессами, например, используют ионно-лучевое перемешивание элементов, нанесенных заранее на поверхность мишени в виде тонких пленок. Этот метод носит название метода ионного перемешивания (Ion Mixing). Другим методом является осаждение на мишень химических элементов непосредственно в ходе имплантации путем распыления или термического испарения в вакууме (для этого используют

дополнительные

ионные и электронные источники). Такой совмещенный процесс, при котором ионный пучок перемешивает осаждающиеся на поверхность мишени элементы, называют ионно-ассистированным осаждением (Ion Beam Assisted Deposition). При этом происходит образование увеличенного по протяженности легированного слоя при очень высокой адгезии (сцеплении этого слоя с поверхностью мишени). Тем не менее, увеличение глубины воздействия на свойства материалов остается одной из основных проблем ионной имплантации. Совмещение ионно-лучевой обработки с другими методами позволяет несколько увеличить толщину модифицируемого слоя, но за счет существенного усложнения и удорожания процесса.

В связи с последним замечанием особую актуальность приобретают интенсивно исследуемые в последнее время эффекты дальнего действия при ионной бомбардировке [3-6,9,12], позволяющие существенно увеличить глубину модифицируемой зоны, что особенно важно для разработки методов модификации поверхностных свойств конструкционных материалов.

### **Применение ионной имплантации в полупроводниковых технологиях**

Первым промышленным применением метода ионной имплантации явилось ее включение в технологический процесс изготовления МОП-транзисторов (со структурой типа металл-оксид-полупроводник) [8]. Эта область применения ионной имплантации и в настоящее время является одной из основных.

До привлечения ионно-лучевой технологии существовала следующая проблема. Скорость переключения МОП-транзисторов, полученных по диффузионной технологии (т.е. путем диффузионного введения примесей), ограничена паразитной емкостью, возникающей из-за перекрытия областей истока и стока затвором (рис.6,а). Вследствие неточностей совмещения масок и боковой диффузии (т.е. диффузии за край маски) это перекрытие не удастся снизить до уровня менее 1 мкм. Ионная имплантация позволяет простым способом добиться более высокой точности. Электрод затвора при этом используют в качестве маски для имплантации (рис.6,б). Области истока и стока формируются диффузией до имплантации таким образом, что они несколько удалены от затвора. Совмещение производится путем имплантации ионов бора. Области истока и стока в результате расширяются до границы затвора.

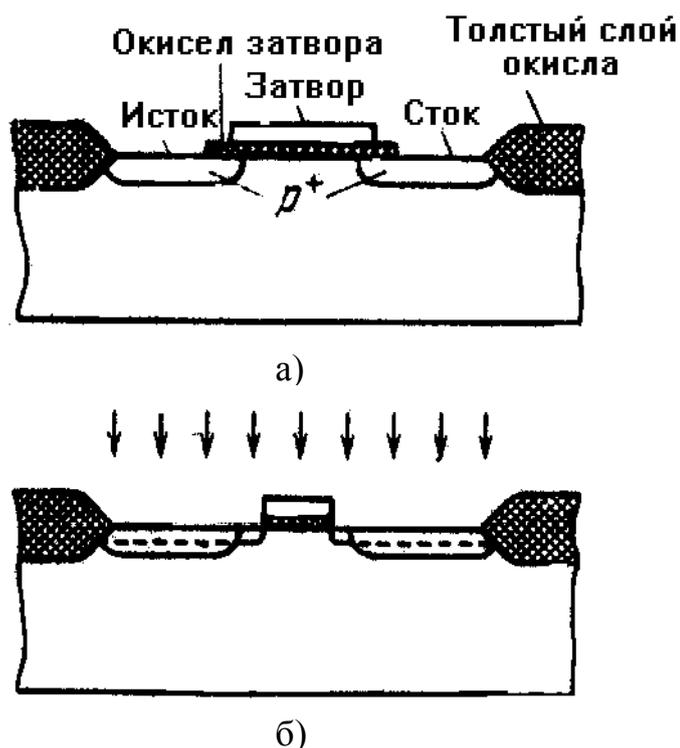


Рис.6. Схема МОП-транзистора: обычное сильное перекрытие стока затвором (а); совмещение стока и затвора (б) с помощью ионной имплантации

Микроэлектронные схемы на основе МОП транзисторов, обладающие экстремально низким потреблением энергии и высокой плотностью упаковки, широко используются, в частности, в электронных часах и запоминающих устройствах большой емкости. Большая часть схем электронных часов в настоящее время выполняется с использованием МОП-технологии.

Другим применением ионной имплантации в микроэлектронике является получение микрорезисторов с очень высоким значением электросопротивления, на 2-3 порядка более высоким, чем у резисторов, изготавливаемых диффузионным методом, при существенно меньшем разбросе свойств. Ионно-легированные резисторы обладают, кроме того, повышенной линейностью и низким уровнем шумов.

Одной из самых ранних областей применения ионной технологии является изготовление солнечных батарей, которые до сих пор применялись в основном лишь на космических аппаратах. Преимущества этого метода перед диффузионным были продемонстрированы еще в 1966 году В.М.Гусевым и др., а также В.Дж.Кингом (W.J.King) и др. Производительность отечественных установок серий ИЛУ уже тогда достигала  $0.5 \text{ м}^2$  за 100 мин. Средний К.П.Д. фотоэлектронных преобразователей (ФЭП) достигал 13.0 % по сравнению 10.5 % у диффузионных. Кроме того, ток короткого замыкания у ионно-

легированных ФЭП был на 15-18% выше, чем у диффузионных.

Можно предположить, что в рамках международного сотрудничества по программе получения энергии методами, отвечающими требованиям охраны окружающей среды, использование солнечных элементов со временем приобретет более широкие масштабы. Тогда ионная имплантация, безусловно, займет ведущее место в их изготовлении в качестве наиболее механизированного и автоматизированного метода для производства крупных партий приборов.

Существует ряд заслуживающих серьезного внимания приложений ионно-лучевой технологии, которые, к сожалению, не нашли пока широкого промышленного применения, хотя имеются готовые для внедрения лабораторные разработки. В ряде случаев это обусловлено тем, что имплантационная технология существенно опережает средний технологический уровень современного производства. Для совмещения ионной имплантации с существующими технологиями зачастую требуются дополнительные технические решения. Кроме того, ускорители, рассчитанные на большие токи, которые необходимы, например, для изготовления биполярных транзисторов, все еще достаточно дороги.

**Модификация свойств металлов, сплавов и композиционных материалов** на их основе – еще одна важная область применения ионной имплантации [3-6].

Как уже отмечалось, методом ионной имплантации удается положительно влиять на самые различные свойства конструкционных материалов, такие как коррозионная стойкость, жаростойкость, коэффициент трения, сопротивление износу, усталостная прочность. Причем речь идет об улучшении свойств спецматериалов, уже являющихся в максимальной степени коррозионно-стойкими, жаростойкими, износостойкими и т.д. Тем не менее, применение ионной имплантации во многих случаях позволяет улучшать указанные свойства, и не на несколько процентов, что само по себе является сложной задачей, а на несколько десятков процентов и даже в несколько раз.

Приведем некоторые примеры. Применение ионной имплантации с целью увеличения ресурса работы материалобрабатывающего инструмента дает, согласно многочисленным публикациям, в среднем следующие результаты: высечные и вырубные штампы (из штамповых сталей) – увеличение срока работы от 2 до 30 раз; твердосплавные пластины для резцов – в 2-3 раза; ножи обрезающие (сталь ШХ15), бойки (углеродистая сталь) – до 10 раз; фрезы, метчики, сверла, иглы швейные, челноки, петлители, нитепротягиватели (сталь Р6М5) – в 2-4 раза; пробойники и пуансоны (WC+Co) – в 4-6 раз; фильеры для волочения проволоки (WC+Co) – в 3-5 раз; шарнирное соединение бедрового протеза (Ti +6%Al+4%V) – в 100 раз (в лабораторных

испытаниях).

Последний результат позволил решить важную медицинскую проблему, поскольку без использования ионной имплантации не удавалось увеличить срок службы подобных протезов свыше 5-10 лет. Операция же по вживлению искусственного сустава является в некоторых случаях единственной возможностью оказания помощи больному.

Метод ионной имплантации представляет собой уникальный способ управления реакционной способностью поверхности путем изменения ее химического состава, структуры и концентрации радиационных дефектов. Установлено, что для повышения сопротивления коррозии наиболее эффективной оказывается имплантация элементов, традиционно используемых для пассивации поверхности, а также элементов, способствующих образованию вблизи поверхности сильно разупорядоченной аморфной структуры. Так как аморфные слои характеризуются полным отсутствием межзеренных (межкристаллитных) границ, аморфизация способствует образованию однородной пассивирующей пленки.

Сопротивление окислению классической нержавеющей стали (08X18H10T) существенно повышается при имплантации ионов  $\text{Mo}^+$ ,  $\text{W}^+$ ,  $\text{Cr}^+$ ,  $\text{Al}^+$ , а также  $\text{C}^+$  и  $\text{P}^+$ . Фосфор является наиболее сильным аморфизирующим элементом. Высоко эффективной оказывается комбинированная имплантация различными ионами. При соответствующем подборе сорта внедряемых ионов и режимов имплантации скорость окисления поверхности  $s = s / t$  (где  $s$  – толщина окисленного слоя,  $t$  – время окисления) коррозионно-стойких сплавов на основе Fe, Ni и Ti может быть уменьшена на несколько десятков процентов, а в некоторых случаях даже многократно.

Ионная имплантация позволяет значительно улучшить сопротивление окислению, а также механические свойства изделий из жаропрочных материалов на основе никеля и титана, используемых для изготовления газотурбинных двигателей (ГТД). Усталостная прочность повышается на 10-70 %; сопротивление горячей солевой коррозии – в 2-5 раз; сопротивление пылевой эрозии – в 1.5-3 раза; жаростойкость – в 2-3 раза; циклическая долговечность – в 4-8 раз.

Импламентируя ионы в поверхность металлов, удается воздействовать на их термоэмиссионные свойства. В результате подбора сорта ионов и дозы в поверхностных слоях могут быть получены электроположительные слои с низкой работой выхода, характеризующиеся высокой удельной термоэлектронной эмиссией. Так, имплантация ионов  $\text{V}^+$  и  $\text{La}^+$  в тантал повышает его термоэмиссионную способность при 1600 °С примерно на порядок. Улучшение термоэмиссионных свойств катодов определяет возможности увеличения эффективности электрофизических приборов

(мощных ускорителей, лазеров и других устройств), применяемых в различных областях современной науки и техники.

Метод ионной имплантации может быть применен для повышения стойкости материалов к воздействию различных видов излучения. Среди проблем, возникающих в связи с выбором конструкционных материалов для термоядерного реактора (ТЯР), одной из главных является проблема стойкости материала первой стенки ТЯР по отношению к распылению быстрыми атомами изотопов водорода, а также блистерингу (образованию вакансионных микропор), вследствие внедрения высокоэнергетичных ионов  $\text{He}^+$  и атомов водорода в поверхностные слои. В настоящее время в качестве наиболее перспективного материала первой стенки рассматриваются железо-хромоникелевые нержавеющие стали. Эрозия поверхности первой стенки ТЯР может лимитировать ресурс работы реактора, а попадание продуктов эрозии в плазму приводит к увеличению ее излучательных потерь, ухудшая энергобаланс реактора. М.И.Гусевой и сотрудниками показано (см. [5]), что в результате имплантации ионов  $\text{C}^+$ ,  $\text{B}^+$ ,  $\text{Mn}^+$ ,  $\text{Ni}^+$  достигается значительное снижение блистеринговой эрозии нержавеющей стали. Этот результат объясняется взаимодействием вакансий с внедряемыми атомами.

Ионное облучение оказывает существенное влияние на электрические и магнитные свойства металлических сплавов. Это касается не только субмикронных и микронных пленок, толщина которых сравнима с проективным пробегом ионов, но и образцов субмиллиметровой толщины [6,9,12]. При облучении ионами  $\text{Ar}^+$  образцов толщиной 0.1 мм высокоомного сплава железо-палладий-золото, используемого для изготовления прецизионных проволочных резисторов и потенциометров, прирост электросопротивления составлял при различных условиях облучения от 30 до 60 %. Был получен практически нулевой термический коэффициент электросопротивления [9], чего не удается достичь с использованием обычных методов обработки. Изменение резистивных свойств обусловлено перестройкой атомной структуры сплава на глубине, существенно превышающей проективный пробег ионов. Процесс протекает при аномально низких температурах, при которых обычные диффузионные перестройки не реализуются

**Модификация свойств диэлектрических материалов** — также интенсивно развивающаяся область применения ионной имплантации. Достаточно упомянуть об имплантационной технологии изготовления ЗУ (запоминающих устройств) с высокой плотностью хранения цифровой информации на основе магнитных феррит-гранатов, работах по улучшению свойств световодов (снижение потерь, получение необходимых параметров ответвителей световых сетей), а также модификации различных свойств

керамических и полимерных материалов, применяемых в приборостроении, биологии, медицине и т. д. Развиваются работы по модификации оптического спектра стекол, что позволяет получать стекла разнообразного цвета, достигая сколь угодно тонких оттенков цветов.

**Моделирование воздействия нейтронного облучения.** Применяя ионные пучки, которые более доступны по сравнению с нейтронными и не приводят к активации материалов, удастся моделировать и изучать процессы, протекающие при нейтронном облучении. В частности, удастся исследовать склонность различных веществ к радиационному набуханию, что необходимо для разработки современных реакторных материалов. Метод ионной имплантации позволяет в течение непродолжительного времени получать высокое число радиационных смещений (в расчете на атом вещества), для достижения которого потребовались бы длительные, иногда продолжительностью несколько лет, натурные реакторные испытания.

### **Заключение**

Ионная имплантация, несомненно, может быть отнесена к разряду высоких технологий. Действительно, некоторые современные технологические приемы (и отдельные процессы) могли бы быть использованы, если не в древние, то, во всяком случае, в средние века, при наличии чертежей необходимого для этого оборудования и рецептов его использования на основе потребления тех или иных природных веществ. Метод ионной имплантации, возникший как результат развития ускорительной техники, безусловно, мог быть реализован только на определенном уровне развития цивилизации. Он позволил обеспечить существенный прогресс в различных областях технологии. Учитывая интенсивное развитие научных и технических приложений ионной имплантации, можно предположить, что еще многие необычные применения этого метода будут найдены в будущем.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Укажите диапазон энергий ионов, обычно используемых для ионной имплантации (кэВ).
2. Каков типичный диапазон флюенсов применяемых для модификации свойств конструкционных материалов на основе металлов и сплавов ( $\text{см}^{-2}$ )?
3. Назовите основные каналы (механизмы) потерь энергии при торможении ускоренных ионов в веществе.

4. Какие потери энергии («электронные» или «ядерные») преобладают при торможении тяжелых низкоэнергетических ионов с энергией  $E = 5 \cdot 10^4$  эВ.

5. Какие потери преобладают при торможении тяжелых высокоэнергетических ионов ( $>10^8$  эВ)?

6. Оцените максимальную температуру в области термического пика для иона Cu с энергией 50 кэВ, имплантируемого в Cu при среднем радиусе пика  $\sim 5$  нм и атомной плотности  $\sim 10^{23}$  см<sup>-3</sup>.

7. Приведите примеры использования ионной имплантации для модификации свойств изделий из полупроводниковых материалов.

8. Для модификации каких свойств металлов и сплавов применяется ионная имплантация?

9. Укажите причины, вызывающие изменение структуры и свойств материалов при их облучении ускоренными ионами.

10. Какие открытия и технические достижения сделали возможным использование ионной имплантации в технологических процессах.

11. Изменяет ли ионно-лучевая модификация размер обрабатываемых изделий и если «да», то оценить на сколько.

12. Почему ионно-лучевую обработку называют суперфинишной?

13. Является ли ионная имплантация экологически чистым процессом? Сравните ее с гальваническим нанесением покрытий. Укажите преимущества.

14. Приведите пример бытовых приборов, содержащих элементы, изготовленные с применением ионной имплантации.

15. Оцените время облучения изделия ионами азота при плотности тока ионного пучка 10 и 100 мкА/см<sup>2</sup> для различных значений флюенса  $10^{16}$ ,  $10^{17}$  и  $10^{18}$  см<sup>-2</sup>.

16. Оцените, сколько процентов от скорости света в вакууме составляет скорость ионов азота  ${}^{14}_7N^+$  с энергией 20 и 200 кэВ.

17. Получите оценку давления в области термического пика при имплантации Cu в Cu, если энергия ионов меди составляет 20 кэВ, а средний радиус каскада - 5 нм. Атомную плотность принять равной  $10^{23}$  см<sup>-3</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронно-оптическое наблюдение инициирования и развития импульсного пробоя короткого вакуумного промежутка. / Бугаев С.П., Искольдский А.М., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.// Журн. Техн. Физики. 1967. т. 37, N 12. 2206-2208.
2. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером. /Под ред.

- Щанина П.М., Екатеринбург: Наука, 1993.
3. Аброян И.А. Физические основы внедрения и изменения свойств поверхности. //Изв.АН.Сер. Физическая. 1996, т.60, №7, 62-81.
  4. Мартыненко Ю.В. Эффекты дальнего действия при ионной имплантации. //Итоги науки и техники. Сер. Пучки зар. частиц и тв. тела. - М.: ВИНТИ. 1993. т.7. 82-109.
  5. Гусева М.И. Ионная имплантация в неполупроводниковые материалы. //Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. - М.: ВИНТИ. 1989. т. 5. 5-54.
  6. Овчинников В.В. Мессбауэровская спектроскопия ионно-легированных металлов и сплавов. //Изв. АН. Сер. Металлы, 1996, № 6, с. 104-129
  7. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. /Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михайлеску И.Н. - М.: Наука, 1988.
  8. Риссел Х., Руге И.: Ионная имплантация. Пер с англ. /Под. ред. Гусевой М.И.- М.: Наука, 1983.
  9. Ovchinnikov V.V., Chernoborodov V.I., Ignatenko Yu.G. Change of Electrical Properties of Alloys and Excitation of Low Temperature Atom Mobility by Ion Bombardment. Nuclear Instruments and methods in Physics Research. 1995, В 103, 313 -317.
  10. Орлов А.И. Дислокации. Физический энциклопедический словарь. /Гл. ред. Прохоров А.М.- М.: Советская энциклопедия, 1984. - 944 с.
  11. Дислокационные структуры поверхностных слоев чистых металлов после ионной имплантации. Диденко А.Н., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. и др./Поверхность. Физика, химия, механика. 1989. №3. 120-131.
  12. Goloborodsky B.Yu, Ovchinnikov V.V., Semionkin V.A. Long-Range Effects in the FePd<sub>2</sub>Au Alloy under Ion Bombardment. Fusion Technology, v.39, 2001, 1217-1228.