



# Глава 1

## ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Метод ионной имплантации основан на внедрении (имплантации) в твердое тело ускоренных в электростатическом поле ионизированных атомов и молекул. При этом возможны любые комбинации «ион — мишень». Энергия ионов может изменяться от нескольких сотен электронвольт до гигаэлектронвольт (т.е. миллиардов электронвольт). Глубина внедрения ионов зависит от энергии, массы ионов и атомов твердого тела, а также от плотности материала мишени. Так, средний пробег ионов фосфора с энергией 10 кэВ в кремнии составляет примерно 14 нм, а ионов бора с энергией 1 МэВ — около 1756 нм. Ионная бомбардировка позволяет изменять практически все свойства приповерхностной области твердого тела: электрофизические, механические (прочность, твердость, коэффициент трения, износостойкость), коррозионные, каталитические, оптические, эмиссионные.

В настоящее время ионная имплантация стала одним из основных методов введения примесей в полупроводниковые кристаллы. Ранее самыми распространенными способами были эпитаксия (введение примесей в процессе выращивания кристалла), диффузия и сплавление. Эпитаксия позволяет наращивать на исходный кристалл слои с заданной концентрацией примесей. Диффузионный метод основан на диффузии примесных атомов с поверхностного слоя в полупроводник. Наконец, при сплавлении прилегающий к поверхности слой полупроводника расплавляют и в процессе последующей рекристаллизации (затвердевания) обогащают примесными атомами.

В отличие от этих способов введения примеси в кристаллы метод ионной имплантации не зависит прежде всего от пределов химической растворимости, а также от температуры в процессе имплантации и концентрации материала примеси на поверхности полупроводника. Так как имплантация — процесс термодинамически неравновесный, с его помощью можно создавать соединения и сплавы, которые принципиально нельзя получать традиционными методами,

а также достигать концентраций внедренной примеси, существенно превышающих предел растворимости данной примеси в веществе мишени. Естественно, что при благоприятных условиях внедренные атомы также могут вступать в химические связи с атомами твердого тела. Это возможно как в процессе облучения, так и при последующей технологической обработке.

Концентрация внедренных атомов примеси имеет некоторое распределение по глубине, которое в общем случае приближенно можно описать гауссовым (нормальным) распределением со средним проецированным пробегом  $R_p$  и стандартным отклонением  $\Delta R_p$ .

Метод ионной имплантации имеет ряд преимуществ, важных как с технологической точки зрения, так и с точки зрения проектирования и создания новых типов электронных приборов и интегральных схем (ИС):

- сокращение длительности процесса введения примеси в  $10^2$ – $10^4$  раз, однородность распределения по поверхности и воспроизводимость параметров;
- возможность точного контроля количества вводимых атомов примеси простым интегрированием тока ионов на мишень, что особенно важно при низких концентрациях (например, сдвиг порогового напряжения в МОП-транзисторах);
- высокая чистота процесса, поскольку в ускорителях ионы разделяются по массам с помощью масс-сепараторов;
- низкая температура процесса;
- простота методов маскирования участков на поверхности кристалла, которые следует или не следует легировать, путем применения толстых оксидных, нитридных, металлических или фоторезистивных слоев;
- возможность легирования через тонкие пассивирующие слои (например,  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Si}_3\text{N}_4$ );
- малая глубина внедрения ионов (обычно менее нескольких микрон, а иногда до десятков и единиц нанометров), что дает возможность легирования тонких приповерхностных слоев с очень крутым градиентом концентрации примеси (например, для СБИС с субмикронными или нанометровыми размерами элементов, лавинно-пролетных диодов и др.);
- возможность создания профиля распределения имплантированных атомов любой заданной формы с помощью многоступенчатой имплантации посредством изменения ускоряющего напряжения (полиэнергетическая имплантация);

- возможность изготовления особо миниатюрных приборов (субмикронная и нанометровая технология), обладающих низкими паразитными емкостями, благодаря незначительному боковому рассеянию.

К достоинствам метода следует отнести также универсальность, легкость управления ионными пучками с помощью ЭВМ, т.е. возможность полной автоматизации, а также, как отмечалось, возможность создания неравновесных метастабильных систем, совместимость с процессами планарной технологии.

В практике применения ионных пучков диапазон доз ионов на единицу площади (ион/см<sup>2</sup>) зависит от изменяемого свойства твердого тела и обычно охватывает область от 10<sup>11</sup> до 10<sup>18</sup> ион/см<sup>2</sup>. Методы регистрации ионного тока на мишень часто дают информацию об интенсивности пучка в мкКл/см<sup>2</sup> или ион/см<sup>2</sup> · с. Связь между этими единицами характеризуется соотношением 1 мкКл/см<sup>2</sup> = 6 · 10<sup>12</sup> ион/см<sup>2</sup> · с. Для того чтобы определить интегральный поток ионов на поверхность образца  $D$  (ион/см<sup>2</sup>) (часто говорят просто «флюенс»), необходимо интенсивность пучка  $j$  умножить на время облучения  $t$ :

$$D = jt. \quad (1.1)$$

Первым и наиболее существенным недостатком ионного внедрения является нарушение кристаллической структуры полупроводника, или металла (диэлектрика), — появление дефектов в результате первичных соударений ионов с атомами мишени или вторичных соударений уже смещенных из узлов кристаллической решетки быстрых атомов с другими атомами матрицы. Эти дефекты структуры вызывают изменение электрофизических свойств полупроводников; кроме того, большинство имплантированных атомов занимают нерегулярные положения в решетке и поэтому электрически не активны. Для устранения образовавшихся нарушений, а также перевода имплантированных атомов в электрически активные положения в решетке (активации атомов примеси) необходимо проведение соответствующих термообработок ионно-легированных образцов. Это может быть равновесный отжиг в печах либо неравновесный (быстрый) фотонный, электронный или лазерный отжиг. Отжиг имплантированного кремния производится при низких (400–600 °С) или высоких (800–1200 °С) температурах. При термической обработке выше 1000 °С одновременно с отжигом происходит разгонка внедренных атомов примеси.

При низкотемпературном отжиге сохраняются значительные нарушения, но их миграция невелика. Так как ближе к поверхности подложки находится наибольшее количество дефектов, а не легирующих атомов, их влияние на электрон-дырочный (т.е. *p-n*) переход незначительно. Поэтому низкотемпературным отжигом устраняются в основном нарушения вблизи перехода, что обеспечивает его высокое качество. Низкотемпературный отжиг применяют в тех случаях, когда слои металлизации, а также элементы полупроводниковых приборов и ИС не выдерживают высоких температур.

При высокотемпературном отжиге большая часть нарушений восстанавливается, но остающиеся, как правило, велики и влияние их при создании приборов и ИС следует учитывать.

При температуре выше 1000 °С одновременно с разгонкой внедренных атомов примеси иногда увеличивается количество дефектов и наблюдается их распространение за пределы имплантированной области. Это означает, что даже высокотемпературный отжиг не гарантирует полного устранения нарушений кристаллической решетки.

При ионной обработке МОП-структур на границе раздела «кремний — диоксид кремния» образуется фиксированный положительный заряд и возникают быстрые поверхностные состояния. С увеличением дозы облучения эти явления усиливаются, а затем происходит насыщение. Фиксированный положительный заряд устраняется отжигом при 150–500 °С или обработкой ультрафиолетовым излучением. Быстрые поверхностные состояния снимаются обработкой подложек в атмосфере азота при температуре 400–500 °С.

Ко второму недостатку метода ионной имплантации следует отнести небольшую глубину легирования, что критично для создания ряда электронных приборов, например силовых диодов и транзисторов. Повышением ускоряющего напряжения до нескольких мегаэлектронвольт или десятков мегаэлектронвольт можно увеличить глубину проникновения внедряемых атомов, однако такие установки оказываются очень дорогостоящими. Стоимость их исчисляется миллионами долларов США. Следует отметить также, что высокоэнергетической имплантации сопутствует формирование сложных дефектов структуры, которые не отжигаются вплоть до температур, близких к температуре плавления данного материала.

К третьему ограничению метода имплантации можно отнести такие эффекты, появляющиеся в процессе или после имплантации,

как каналирование ионов и радиационно-ускоренная диффузия внедренных атомов. Эти эффекты делают почти невозможным строгое теоретическое предсказание концентрационного профиля. Чаше всего они проявляются в более глубоком проникновении имплантированных атомов и в более сложной, чем гауссова, форме распределения внедренных атомов по глубине мишени.

Поэтому важнейшими проблемами метода ионной имплантации являются отжиг радиационных дефектов, повышение электрической активации вводимых атомов, определение формы распределения концентрации имплантированных примесей, а также исследование влияния процесса имплантации на такие важные характеристики исходного материала, как подвижность и время жизни носителей тока (заряда).

Ионная имплантация в настоящее время широко используется не только в области технологии полупроводниковых приборов и ИС. Благодаря созданию сильноточных имплантеров стало возможным не только легирование полупроводников (дозы облучения обычно менее  $5 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>), но и применение ионной имплантации для модификации химических, механических и оптических свойств твердых тел. При больших дозах внедрения ( $D \geq 5 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>), достигающих  $n \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, становится возможным превращение поверхностного слоя в другое химическое соединение, например образование карбида кремния при имплантации углерода в кремний или ионов кремния в алмаз.

Широкое развитие в последние годы получило новое направление радиационной физики твердого тела — ионная металлургия. Ионные пучки в этом случае используются для управления такими важными для практики свойствами, как механические, коррозионные, сверхпроводящие, каталитические. Например, в лаборатории НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ путем полиэнергетической ионной имплантации азота в подложку из бора созданы слои сверхтвердого материала — кубического нитрида бора (боразона). Твердость приповерхностной области подложки в этом случае изменялась приблизительно в 100 раз и была близкой к твердости алмаза. Другой возможной областью применения ионной имплантации является изготовление световодов путем внедрения ионов в кварц, кремний или арсенид галлия, создание доменных структур на магнитоактивных материалах, т.е. создание систем с магнитной записью информации, и др.

## 1.1. Оборудование для ионного внедрения

Установки ионной имплантации бывают малых и средних доз, а также больших доз с интенсивными ионными пучками, высокоэнергетические. Токи ионного пучка установок малых и средних доз составляют от единиц микроампер до 500–800 мкА, установок больших доз (сильноточных) — от 1 до 200 мА. Оба типа установок работают чаще всего в области энергий от 200 эВ до 200 кэВ. Максимальная энергия высокоэнергетических установок может превышать 1 МэВ.

Установки ионной имплантации (рис. 1.1) обычно состоят из источника ионов, магнитного масс-сепаратора, систем ускорения и сканирования пучка, приемной камеры и вакуумной системы. Отличаются они в основном потенциалом приемной камеры относительно земли и взаимным расположением приемной камеры, масс-сепаратора и источника ионов.

Установки имплантации малых и средних доз (рис. 1.1, *а*), энергия ионов в которых не превышает 200 кэВ, а приемная камера находится под потенциалом земли, используются наиболее широко. Так как магнитная сепарация ионов осуществляется до ускорения, их энергия в сепараторе низка, что оказывает существенное влияние на габариты установки (малые магниты, маломощные источники питания электромагнитного сепаратора и ускорительной системы).

Установку с разделением ионов по массам после ускорения (рис. 1.1, *б*) обычно используют для исследовательских целей. При высокой разрешающей способности магнитного сепаратора и минимальном количестве потребляемой электроэнергии высокого напряжения в установке ускоряется весь пучок ионов, возрастает ток нагрузки высоковольтного источника питания, а также увеличивается вторичная электронная эмиссия, что повышает опасность облучения рентгеновскими лучами.

Сильноточная установка (рис. 1.1, *в*) имеет простую систему управления и питания источника ионов и электромагнита, а также небольшое количество устройств, работающих при высоком напряжении. Недостатки ее — трудный доступ к приемной камере, высокий потенциал на ней и сложность автоматизации загрузки-выгрузки обрабатываемых подложек.

Высокоэнергетическая установка (рис. 1.1, *г*) позволяет, приложив высокий потенциал к приемной камере, получить высокую

энергию ионов (500 кэВ и выше). В этом случае возникает сильное рентгеновское излучение. Большую энергию (1–2 МэВ и более) проще получать, используя источник многозарядных ионов.

В установке больших доз (рис. 1.1, д) источник ионов находится под высоким напряжением. Полное ускорение происходит в системе первичного формирования пучка, что позволяет полностью автоматизировать все режимы работы.

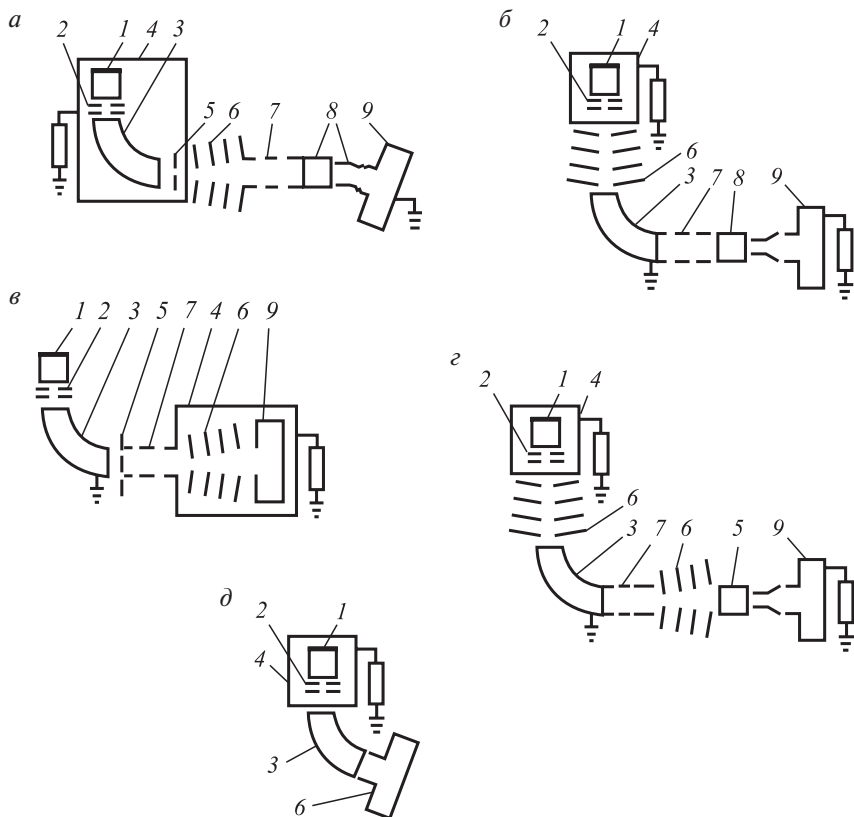


Рис. 1.1. Компоновки установок ионной имплантации:

*а* – малых и средних доз; *б* – с разделением ионов по массам после ускорения; *в* – сильноточных; *г* – высокоэнергетических; *д* – больших доз; 1 – источник ионов; 2 – система вытягивания и первичного формирования пучка; 3 – магнитный масс-сепаратор; 4 – высоковольтный модуль; 5 – регулируемая диафрагма; 6 – система ускорения; 7 – фокусирующая линза; 8 – пластины электростатического сканирования; 9 – приемная камера



Источник ионов предназначен для возбуждения атомов рабочего вещества до энергии, как минимум большей потенциала его ионизации, в результате чего получают пучок положительно заряженных ионов. Поскольку для ионизации используется электрический разряд, все источники ионов имеют одинаковые элементы:

- разрядную или ионизационную камеру (обычно несущая конструкция источника);
- анод для создания электрического поля внутри разрядной камеры;
- источник электронов (термокатод или холодный катод), служащий для эмиттирования в зону разряда необходимого количества ускоренных электронов;
- магнитную систему для повышения эффективности ионизации и плотности плазмы в зоне экстракции (извлечения) ионов;
- экстрагирующий электрод и электроды первичной фокусировки пучка, предназначенные для извлечения ионов из зоны плазмы и первичного ускорения пучка ионов;
- системы подачи (испарения) рабочего вещества и источников питания (анода, экстрактора, катода и электромагнитов).

Наиболее широко используют источники ионов с термокатадами прямого или косвенного накала (рис. 1.2, *а–в*) и меньше — с холодным катодом (рис. 1.2, *г*).

Источники ионов с термокатодом выполняют в двух вариантах: с экстракцией ионов вдоль оси разрядной камеры через отверстие круглой формы (рис. 1.2, *а, в*) и перпендикулярно оси разрядной камеры через отверстие прямоугольной формы (радиальная экстракция) (рис. 1.2, *б*).

Источники с холодным катодом имеют два катода *б* и *в* и расположенный между ними полый анод *з* в виде цилиндра, внутри которого локализуется плазма *г*.

В качестве рабочего вещества в разрядную камеру источника ионов подают такие газы, как водород, гелий, аргон, азот или газообразные соединения  $\text{BF}_3$ ,  $\text{PH}_3$  и  $\text{AsFe}_3$ . При использовании твердых веществ, температура парообразования которых не превышает  $1000^\circ\text{C}$  (олово, галлий, сурьма), их предварительно нагревают и создают пары, которые подают в источник ионов через натекатель, регулируя скорость испарения изменением температуры. Твердые вещества, температура парообразования которых превышает  $1000^\circ\text{C}$ , сначала распыляют в атмосфере аргона или ксенона пучком ионов этих газов, а затем ионизируют в плазме этого газа.

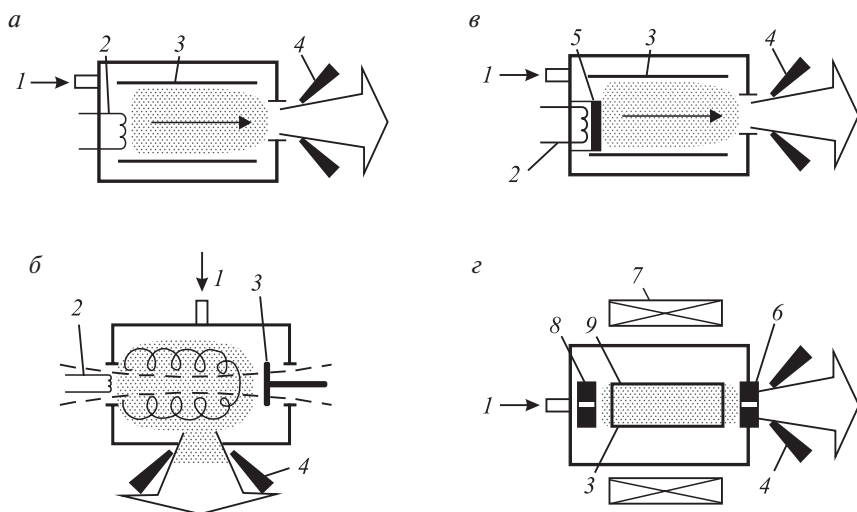


Рис. 1.2. Источники ионов с термокатодом (а, б), с катодами прямого и косвенного нагрева (в) и с холодным катодом (г):

1 – подача газа; 2, 5, 6, 8 – катоды; 3 – анод; 4 – экстрактор; 7 – электромагнит; 9 – плазма

Масс-сепаратор служит для выделения из общего ионного пучка ионов необходимой массы и заряда. Сепараторами являются секторные электромагниты, которые кроме того удаляют нейтральные атомы и молекулы и компенсируют пространственный заряд сильно-точного пучка. Наиболее широко используют секторные электромагниты с углом поворота на  $60$  и  $90^\circ$  и неоднородным магнитным полем. Такие электромагниты обладают лучшей дисперсией по массе, чем электромагниты, имеющие однородное поле, а также позволяют фокусировать пучок ионов в двух плоскостях и изменять его фокусное расстояние.

Фокусируют пучки независимо от массы ионов электростатическими квадрупольными или трехэлектродными линзами.

Система ускорения и формирования пучка наиболее часто представляет собой так называемую ускорительную трубку, состоящую из кольцевых стеклянных или керамических изоляторов и металлических электродов, спаянных, склеенных или стянутых между собой. Эта система может также выполняться в виде двух- или трехэлектродных линз для создания одно- или двухзачорного ускорения.

К двухэлектродным линзам прикладывают пучок ионов и ускоряющее его напряжение, а к трехэлектродным подают к третьему электроду изменяющееся напряжение, способствующее поддержанию постоянного фокусного расстояния при так же изменяющемся конечном напряжении.

Системы сканирования ионного пучка обеспечивают равномерное облучение ионами всей поверхности мишени в приемной камере. Сканирование может быть электростатическим, электромагнитным, механическим или комбинированным. Для повышения производительности установки необходимо выбрать оптимальную систему сканирования, которая зависит от времени имплантации.

Для уменьшения времени облучения ионами можно увеличить ток пучка, что ограничивается влиянием пространственного заряда и температуры нагрева мишени. Установлено, что при токе более 500 мкА пучок под действием собственного пространственного заряда в области, свободной от влияния электростатических полей, начинает расширяться.

В электростатических системах сканирования увеличение сечения пучка ионов требует увеличения напряжения, прикладываемого к пластинам сканирования. Электростатическое сканирование используют в слаботочных установках с индивидуальной обработкой подложек. Ионный пучок перемещается в плоскостях  $x$  и  $y$  с частотой от 100 до 500 и от 1000 до 4000 Гц соответственно, что создает равномерность легирования. Недостаток электростатического сканирования – необходимость увеличения общей длины установки для обеспечения однородности легирования больших по диаметру пластин.

Различные системы механического и комбинированного сканирования, применяемые в установках для групповой обработки подложек, изображены на рис. 1.3.

Механическая система сканирования, показанная на рис. 1.3, *а*, представляет собой колесо с закрепленными на нем полупроводниковыми подложками, совершающее возвратно-поступательное со скоростью  $v$  и вращательное с угловой скоростью  $\omega$  движение относительно пучка ионов. При такой системе получают постоянный угол имплантации. Недостаток системы – сложность перемещения колеса.

Механическая система сканирования, изображенная на рис. 1.3, *б*, перемещает подложки, расположенные на конвейере, движущемся

по овальной траектории, в горизонтальной и вертикальной (вверх-вниз) плоскостях относительно пучка ионов. Эта система обеспечивает постоянный угол имплантации и скорость движения подложек. Недостатки ее – низкая скорость сканирования по вертикали, сложность конструкции и необходимость использовать устройство, работающее в условиях вакуума, что ухудшает вакуум.

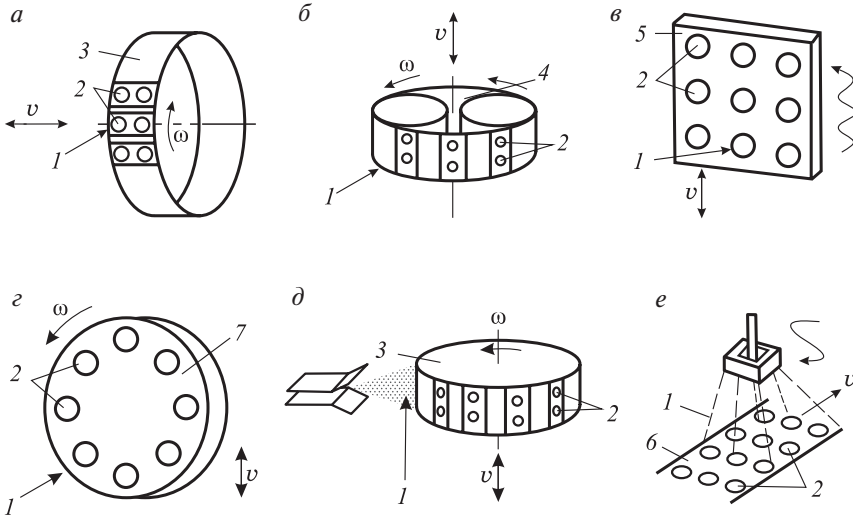


Рис. 1.3. Системы механического (а–с) и комбинированного (д, е) сканирования: 1 – пучок ионов; 2 – полупроводниковые подложки; 3 – колесо; 4 – конвейер; 5 – основание; 6 – лента; 7 – диск

Механическая система, приведенная на рис. 1.3, в, представляет собой плоское основание с закрепленными на нем полупроводниковыми подложками и совершает возвратно-поступательное движение сверху вниз и справа налево, что не обеспечивает необходимой скорости перемещения подложек и снижает производительность установки. В механической системе сканирования, широко применяемой в сильноточных установках (рис. 1.3, д), по периферии быстровращающегося диска, одновременно линейно перемещаемого с небольшой скоростью, по радиусу расположены подложки. Однородность легирования получают, изменяя плотность пучка или скорость линейного перемещения диска при сохранении его частоты вращения.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ</b> . . . . .	3
1.1. Оборудование для ионного внедрения . . . . .	8
1.2. Системы автоматизированного управления установками ионной имплантации . . . . .	15
<b>ГЛАВА 2. ЛАГРАНЖИАН ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ</b> . . . . .	19
2.1. Приведенная масса . . . . .	20
<b>ГЛАВА 3. КЛАССИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ИОНА В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ</b> . . . . .	22
<b>ГЛАВА 4. ПОТЕНЦИАЛЫ ИОННО-АТОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ</b>	26
<b>ГЛАВА 5. СЕЧЕНИЯ РАССЕЙЯНИЯ</b> . . . . .	32
5.1. Сечение упругого торможения . . . . .	34
<b>ГЛАВА 6. СЕЧЕНИЕ НЕУПРУГОГО ТОРМОЖЕНИЯ</b> . . . . .	37
<b>ГЛАВА 7. ПРОБЕГИ ИОНОВ. ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ И ВЫДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ</b> . . . . .	41
<b>ГЛАВА 8. МЕТОД МОМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ</b> . . . . .	45
8.1. Высокоэнергетическая ионная имплантация . . . . .	54
8.1.1. Пространственное распределение внедренных атомов и первичных радиационных дефектов при МэВ-й имплантации . . . . .	57
8.1.2. Пространственное распределение внедренных атомов и радиационного повреждения при $E \geq 1$ МэВ/а.е.м. . . . .	60
8.1.3. Особенности дефектообразования в кремнии при высокоэнергетической ионной имплантации. . . . .	64
8.1.4. Формирование однородно-легированных толстых слоев . . . . .	70
8.1.5. Создание скрытых изолирующих и проводящих слоев на глубине кристалла. . . . .	74
8.1.5.1. Создание вертикальной изоляции в кремнии и скрытых проводящих слоев . . . . .	75
8.1.5.2. Создание горизонтальной изоляции на $A^3B^5$ -полупроводниках . . . . .	89

8.1.5.3. «Smart-cut»-процесс формирования КНИ-структур. . . . .	92
8.1.5.4. Ионная имплантация для создания наночастиц и квантовых точек . . . . .	98
8.1.5.5. Процессы трекообразования при облучении твердых тел ионами высоких энергий. Применение трековой технологии . . . .	104
<b>ГЛАВА 9. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБЕГОВ ИОНОВ В ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>ГЛАВА 10. ИМПЛАНТАЦИЯ АТОМАМИ ОТДАЧИ . . . . .</b>	<b>124</b>
<b>ГЛАВА 11. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ И РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ЧЕРЕЗ ОКНА В МАСКЕ</b>	<b>127</b>
<b>ГЛАВА 12. ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА КАНАЛИРОВАНИЯ НА ПРОБЕГИ ИОНОВ. . . . .</b>	<b>133</b>
<b>ГЛАВА 13. ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ПРИМЕСЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСАХ ОБЛУЧЕНИЯ .</b>	<b>141</b>
13.1. Формулы для расчета коэффициента распыления. . . . .	145
13.2. Диффузионное перераспределение примеси. . . . .	148
<b>ГЛАВА 14. КАСКАДЫ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ . . . . .</b>	<b>153</b>
<b>ГЛАВА 15. СООТНОШЕНИЕ КАСКАДНОЙ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА. . . . .</b>	<b>157</b>
<b>ГЛАВА 16. ТИПЫ ИОННО-РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ . . . . .</b>	<b>160</b>
<b>ГЛАВА 17. НАКОПЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ И АМОРФИЗАЦИЯ . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>ГЛАВА 18. РАВНОВЕСНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ. ТВЕРДОФАЗНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ АМОРФНЫХ СЛОЕВ . . . . .</b>	<b>168</b>
<b>ГЛАВА 19. БЫСТРАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ. . . . .</b>	<b>175</b>
<b>ГЛАВА 20. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ . . . . .</b>	<b>178</b>
<b>ГЛАВА 21. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕДРЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ ПРИ БТО С РАСПЛАВЛЕНИЕМ СЛОЯ И БЕЗ НЕГО . . . . .</b>	<b>183</b>
	245

<b>ГЛАВА 22. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ.</b> . . . . .	187
22.1. Выбор метода постимплантационных измерений . . . . .	187
22.2. Травление <i>p-n</i> -переходов . . . . .	193
22.3. Определение типа проводимости . . . . .	195
22.4. Методы, основанные на измерении поверхностного сопротивления . . . . .	197
22.5. Определение времени жизни неосновных носителей заряда . . . . .	214
22.6. Анализ имплантационных слоев с помощью легких высокоэнергетических ионов . . . . .	215
22.6.1. Обратное резерфордовское рассеяние . . . . .	217
22.6.2. Каналирование и местоположение атомов в кристаллической решетке. . . . .	220
22.6.3. Характеристическое рентгеновское излучение . . . . .	225
22.6.4. Метод ядерных реакций . . . . .	229
22.7. Масс-спектроскопия вторичных ионов . . . . .	233
22.8. Рентгеноструктурный и фазовый анализ . . . . .	235
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> . . . . .	241
<b>РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.</b> . . . . .	243