

1.14. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Цель лекции: ознакомление с опринципами йонной имплантации.

1.14.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА

Начало и середина 70-х годов стали эрой конкуренции различных технологических методов и широкого экспериментирования. В результате метод диффузии был дополнен методом ионного легирования, в котором примесные ионы под действием высокого ускоряющего потенциала ударялись о поверхность кремния и внедрялись в него. Метод появился в середине 60-х годов и в течение следующего десятилетия достиг уровня промышленного производства.

Ионная имплантация или ионное легирование – технология, в основном используемая для внедрения в кристаллическую решетку кремния донорных и акцепторных примесей.

При *ионном легировании* энергия, необходимая для проникновения вглубь кристаллической решетки, сообщается электрическим полем напряжением до нескольких сотен киловольт.

Легирующие примеси предварительно ионизируют, а сами пластины могут находиться при комнатной или чуть повышенной температуре, недостаточной для активации процесса диффузии или перераспределения примеси. Ионы направляют на подложку, на которой предварительно сформирована защитная маска из SiO_2 (рис. 1.14.1).

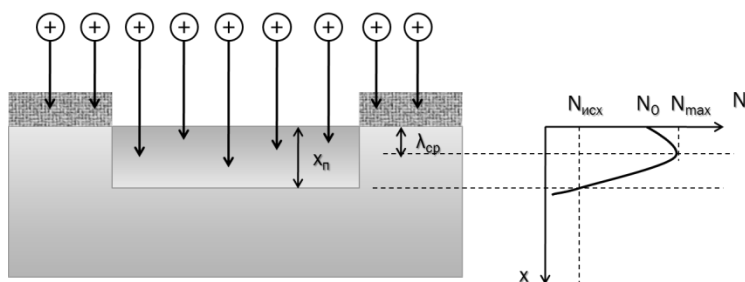


Рис. 1.14.1. Внедрение примеси с помощью ионной имплантации: а – легирование незащищенной маской области; б – профиль распределения внедренной примеси

Защитная маска достаточно толстая, чтобы ионы примеси застредали в ней, поэтому если направлять поток ионов перпендикулярно подложке, размеры легированной области будут точно совпадать с размерами окна в

оксиде (рис. 1.14.1 а). Ионы при вхождении в кремний испытывают многократные столкновения с ядрами и кулоновское взаимодействие с электронами атомов кремния. Это приводит к постепенному торможению ионов вплоть до полной остановки. Путь, пройденный отдельным ионом в кристалле кремния (длина пробега), является величиной случайной и для совокупности ионов, внедрённых в кристалл, оценивается средним значением пробега λ_{cp} . При этом максимальная концентрация примеси будет не на поверхности, как при диффузии, а на глубине λ_{cp} , которая зависит от энергии ионного пучка E и массы ионов.

Легирование может осуществляться либо путем сканирования поверхности пластины остросфокусированным ионным пучком, либо сканированием предварительно маскированной поверхности пластины широким ионным пучком.

При ионном легировании областей стока и истока для МОП-транзисторов происходит одновременное легирование поликремния, используемого в качестве затвора (рис. 1.14.2).



Рис. 1.14.2. Ионная имплантация примеси в области стока и истока для МОП-транзисторов

Метод ионного внедрения (ионной имплантации) позволяет:

- проводить внедрение примеси в более широком диапазоне концентраций, чем это делается диффузией.
- более точно и воспроизводимо дозировать внедряемую примесь за счет контроля ионного тока пучка и времени облучения, чем это позволяет делать диффузия. При этом градиент концентрации примеси в области $p-n$ -перехода существенно больше, чем у диффузионного профиля.
- получать высокую точность глубины залегания $p-n$ -переходов.
- осуществлять процесс при низких температурах, что позволяет сохранить заданный профиль распределения концентрации примеси в структурах и их электрофизические параметры;
- легировать Si и другие полупроводники любыми легирующими примесями в различных количествах вплоть до предельной

растворимости;

- получать ионы примеси высокой чистоты за счет сепарирования магнитным полем;
- осуществлять процесс быстро (за несколько минут) с высокой производительностью при групповой загрузке установки;
- создавать практически любые профили распределения примеси за счет ступенчатого легирования, т. е. изменения энергии и (или) рода легирующего элемента;
- формировать скрытые легированные слои;
- совмещать процесс в единой технологической установке с другими элионными процессами (ионно-плазменным осаждением, ионным травлением и т. д.).

При ионной имплантации отсутствует влияние окружающей среды, так как процесс проводится в вакууме.

Недостатки и ограничения ионной имплантации:

- необходим послеимплантационный отжиг пластин при температуре 700...800 °С для восстановления нарушенной структуры и для перевода примеси в электрически активное состояние;
 - трудно формировать глубокие легированные области, поскольку при постоянной энергии ионов невозможно получить глубоко залегающий переход с одновременным присутствием примеси на поверхности;
 - оборудование ионно-лучевых установок сложное, что обусловлено необходимостью применять высокий вакуум и высокие напряжения, а также устройства препарирования примеси (испарители, ионизаторы, сепараторы);
 - необходимо защищать персонал, работающий с установками ионного легирования, от воздействия рентгеновского излучения;
 - обработка пластин больших диаметров затруднена из-за расфокусировки пучка при больших углах отклонения.
- Ионная имплантация может также использоваться для некоторых других операций:
- имплантация кислорода для структуры «Кремний на изоляторе» (КНИ);
 - бесструктурная имплантация кремния в титановую пленку для лучшего отжига;
 - бесструктурная имплантация германия в кремниевую подложку для контроля профиля.

1.14.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Проникая в кристаллическую решетку полупроводника, ионизированный атом примеси постепенно теряет энергию, что в основном обусловлено взаимодействием с электронами (электронное торможение) и упругим соударением с атомами полупроводника и примеси (ядерное торможение). Во втором случае атом примеси может резко изменить направление движения. Кроме того, при торможении ионов возникает рентгеновское излучение (рис. 1.14.3).

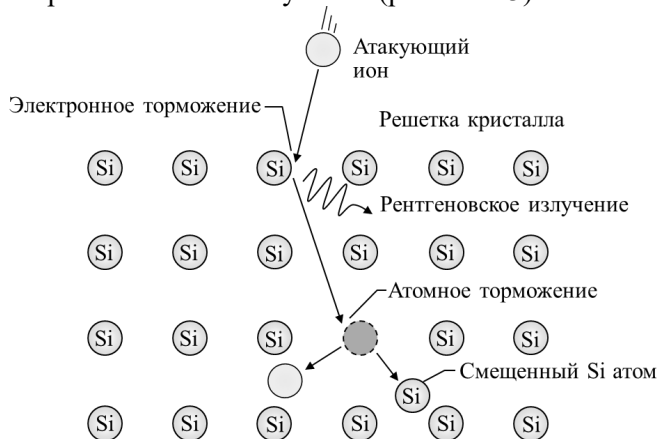


Рис. 1.14.3. Взаимодействие иона с подложкой

Суммарная сила торможения иона определяется по формуле:

$$S_{\Sigma} = S_{\text{я}} + S_e,$$

где $S_{\text{я}}$ – ядерное (атомное) торможение, S_e – электронное торможение. При низкой энергии иона преобладает ядерное торможение, при высокой – электронное торможение.

Совокупная траектория атома примеси вплоть до полного торможения представляет собой ломаную линию (рис. 1.14.4). Практическое значение имеет, однако, проекция этой линии на направление первичного ионного пучка, поскольку она характеризует глубину проникновения атома примеси в кристалл. Так как эта проекция – случайная величина, то ее распределение можно охарактеризовать средней длиной пробега $\lambda_{\text{ср}}$ (математическое ожидание) и средним квадратическим отклонением σ .

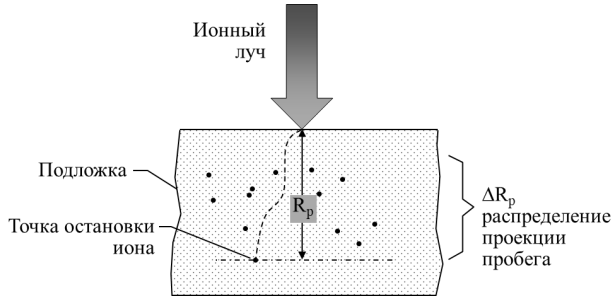


Рис. 1.14.4. Траектория ионов и глубина легирования

С увеличением начальной энергии E средняя длина свободного пробега ионов в кристалле увеличивается; при этом возрастает и дисперсия пробегов. С увеличением массы иона (порядкового номера элемента) увеличивается вероятность столкновения с ядрами материала мишени и длина пробега сокращается.

Распределение примеси по глубине (рис. 1.14.5) подчиняется закону Гаусса:

$$N = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x-\lambda_{\text{ср}}}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2}.$$

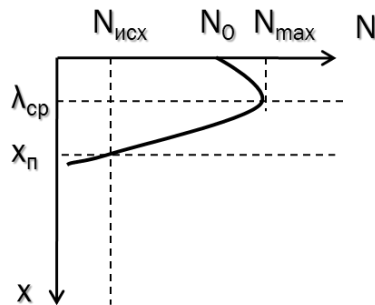


Рис. 1.14.5. Профиль распределения концентрации примеси при ионной имплантации

В результате столкновения с атомом, расположенным в узле кристаллической решетки, ион примеси способен сместить его в междоузлие с образованием дефекта по Френкелю (вакансия и атом в междоузлии). Смещенный атом, в свою очередь, может вызвать каскад смещений, создавая разупорядоченные зоны. Поскольку пороговая энергия смещения атомов в междоузлие составляет ~ 14 эВ, одиночный ион примеси с энергией в несколько десятков килоэлектрон-вольт может создать на своем пути несколько тысяч подобных дефектов. Таким образом, по пути

движения возникают области с нарушенной структурой – кластеры – размером 5–10 нм. При больших дозах легирования кластеры могут смыкаться, образуя обширные аморфные области (рис.1.14.6 а). Такие области в кремнии рекристаллизируются при температурах 600–700°C и выше в области (рис.1.14.6 б). С ростом дозы и массы внедренных ионов температура, необходимая для отжига, возрастает.

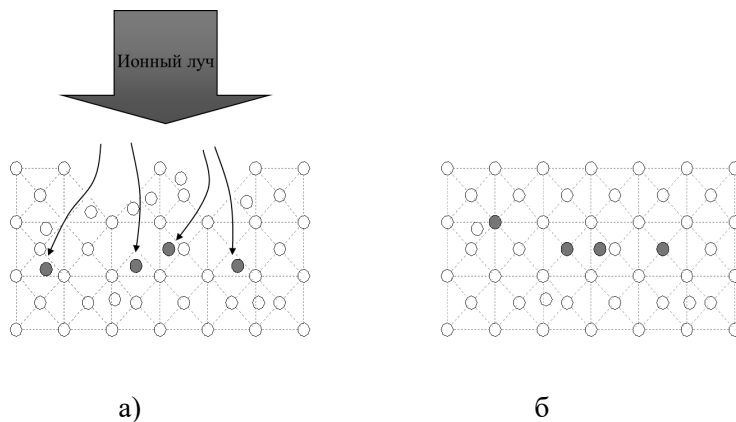


Рис. 1.14.6. Нарушение кристаллической решетки после ионной имплантации (а) и восстановление решетки после отжига (б)

Минимальная доза легирования, при которой возникает аморфный слой, называется *дозой аморфизации*. Она зависит от атомного номера легирующего элемента и возрастает с повышением температуры мишени.

В результате торможения внедренный атом может оказаться либо в узле кристаллической решетки, либо в междоузлии. Вероятность попадания в узел решетки убывает с повышением дозы легирования (степени аморфизации). Соответственно убывает и доля электрически активных атомов примеси.

Переход атомов примеси из междоузлий в вакантные узлы возможен только в процессе упорядочения структуры. С помощью отжига внедренную примесь можно перевести в активное состояние и одновременно осуществить рекристаллизацию материала, повышающую подвижность носителей заряда.

При нагреве пластины повышается энергия как атомов примеси, так и атомов полупроводника, поэтому при отжиге протекают два конкурирующих процесса: диффузия атомов примеси к вакансиям и самодиффузия атомов полупроводника, также завершающаяся заполнением узлов кристаллической решетки. Так как при облучении ионами в кристалле возникают радиационные дефекты, плотность которых высока, то перевод

примеси в активное состояние облегчается. Поэтому время, необходимое для отжига, составляет 15–20 мин, что не приводит к заметному перераспределению внедренной примеси.

При создании субмикронных микросхем чаще используется скоростной термический отжиг (СТО), который длится меньше минуты и делает диффузию примеси минимальной. Нагрев при этом осуществляется или инфракрасными лампами, формируя импульсы с большой скважностью, либо сканированием лазером.

В монокристаллах существуют такие направления, где имеются свободные от атомов каналы, в которых ионы испытывают малое торможение, в результате чего может возникнуть так называемый эффект каналирования (рис. 1.14.7).

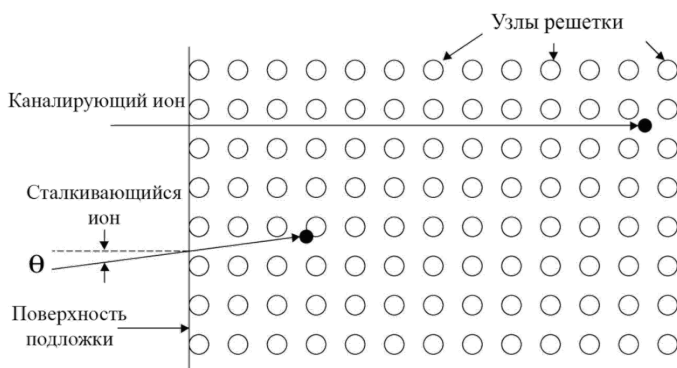


Рис. 1.14.7. Эффект каналирования

При каналировании ион может пройти большое расстояние без столкновений с узлами кристаллической решетки, а потери энергии ионов происходит в основном за счет взаимодействия с электронами. Это обуславливает неконтролируемость профиля распределения примеси. Эффект каналирования полностью исключается при разориентации на 7–8 градусов. Однако и при этом возможно каналирование ионов, возникающее в результате случайных соударений (рис. 1.14.8).

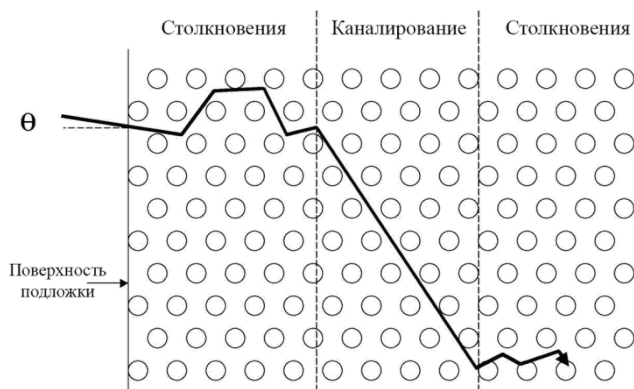


Рис. 1.14.8. Каналирование после соударений

Для сведения каналирования к минимуму подложку при облучении ионами размещают под углом (обычно 7 градусов). Из-за этого при легировании из-за защитной маски возникает теневой эффект, при котором некоторая область кремния, экранируется защитной маской или поликремнием (рис. 1.14.9). Однако во время послеимплантационного отжига примесь перераспределяется из-за диффузии, в результате чего размеры легированной области увеличиваются (рис. 1.14.10).

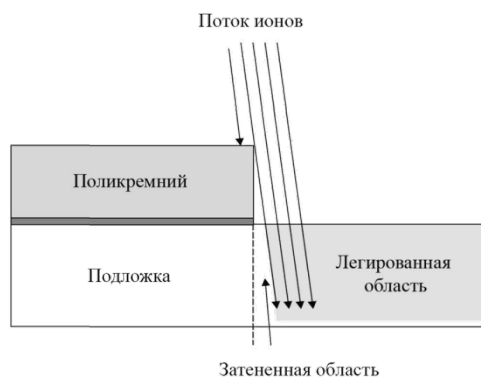


Рис. 1.14.9. Теневой эффект

При энергиях ионов до 200 кэВ средняя глубина внедрения примеси не превышает десятых долей микрометра.

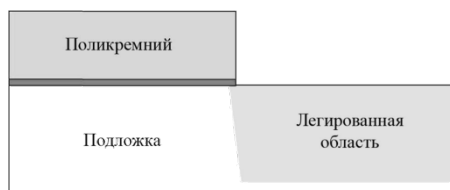


Рис. 1.14.10. Легированная область после отжига

Для получения переходов на глубине в единицы микрометров ионную имплантацию применяют в качестве первого этапа легирования для точного дозирования вводимой примеси. Для разгонки примеси пластины подвергают высокотемпературному нагреву, которым одновременно обеспечивается и отжиг.

1.14.3. ПРОВЕДЕНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Метод ионной имплантации (легирования) состоит в бомбардировке полупроводников пучками ускоренных ионов с энергиями от 10 кэВ до 1 МэВ с целью изменения их свойств и структуры.

При данном методе ускоренные ионы проникают в кристаллическую решетку, преодолевая отталкивающее действие положительных зарядов ядер атомов. Глубина проникновения ионов возрастает с увеличением их энергии. Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях, где они не являются электрически активными. Для перевода их в узлы и восстановления кристаллической структуры полупроводника производят отжиг (нагрев).

В процессе отжига происходят распад и аннигиляция радиационных дефектов, а внедренные примеси занимают вакантные узлы, в результате чего образуется слой с электропроводностью *p*- или *n*-типа.

Метод применяется для образования в приповерхностном слое полупроводника областей с содержанием донорных или акцепторных примесей с целью создания *p-n*-переходов и гетеропереходов, а также низкоомных контактов.

Различают следующие источники:

- с поверхностной термической ионизацией – нагреватель (вольфрамовая лента) на него насыпается соль металла – KJ , $NaCl$, $CaCl_2$, получают ионы Na^+ , K^+ , Li^+ , Cs^+ , Rb^+ , J^- , F^- , Br^- , Cl^- ;
- с ионизацией электронным ударом: электроны создаются термоэмиссией или в газовом разряде, ускоряются электростатическим или высокочастотным полем и направляются

на столкновение с молекулами газа или пара рабочего вещества, ионизируя их;

- высокочастотные – плазма ВЧ-разряда;
- на основе дугового разряда при низких давлениях

Метод обладает следующими возможностями:

1. Возможность вводить (имплантировать) любую примесь, любой элемент Таблицы Менделеева.
2. Возможность легировать любой материал.
3. Возможность вводить примесь в любой концентрации независимо от ее растворимости в материале подложки.
4. Возможность вводить примесь при любой температуре подложки, от гелиевых температур до температуры плавления включительно.
5. Возможность работать с легирующими веществами технической чистоты и даже с их химическими соединениями (тоже любой чистоты).
6. Изотопная чистота легирующего ионного пучка (т.е. возможность легировать не только исключительно данным элементом, но и исключительно данным изотопом этого элемента).
7. Легкость локального легирования (с помощью хотя бы элементарного механического маскирования).
8. Малая толщина легированного слоя (менее микрона).
9. Большие градиенты концентрации примеси по глубине слоя, недостижимые при традиционных методах с неизбежным диффузионным размыванием границы.
10. Легкость контроля и полной автоматизации технологического процесса.
11. Совместимость с планарной технологией микроэлектроники.

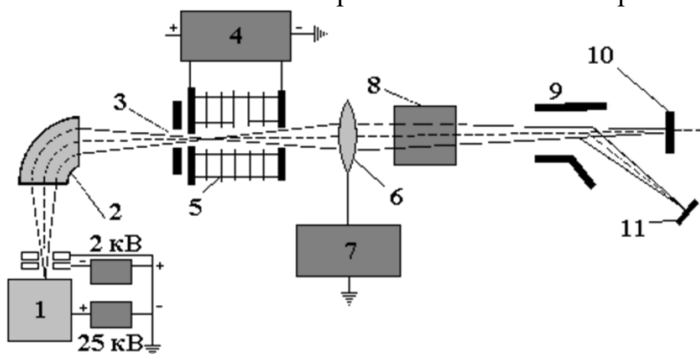


Рис. 1.14.11. Схема установки для ионной имплантации;

1 - источник ионов; 2 - масс-спектрометр; 3 – диафрагма; 4 - источник высокого напряжения; 5 - ускоряющая трубка; 6 – линзы; 7 - источник питания линз; 8 - система отклонения луча по вертикали и система отключения луча; 9 - система отклонения луча по горизонтали; 10 - мишень для поглощения нейтральных частиц; 11 – подложка

В ионном источнике происходит ионизация паров или газа, содержащих атомы примеси. Кроме газов, которые используются в качестве источника внедряемой примеси, в установке используется аргон, применяемый для очистки подложки и камеры, а также для калибровки потока ионов. Для ионизации газов используется высоковольтная установка. Для ускорения ионов и уменьшения их столкновения необходим глубокий вакуум (10^{-5} – 10^{-7} Па). Для его создания используется 2 насоса: турбонасос (механический) и криогенный.

В состав источника ионов (рис. 1.14.12) входит система электродов. Между анодом и катодом происходит электрический заряд. Магнитное поле перпендикулярно электрическому, поэтому электроны движутся по сложным траекториям. Встречая нейтральный атом, электрон выбивает из него вторичный электрон, ионизируя. Вторичные электроны, в свою очередь, ионизируют другие атомы. Сформировавшиеся положительно заряженные ионы экстрагируются из камеры через щель в катоде с помощью экстрагирующего электрода (рис. 1.14.13), который их ускоряет до энергии в 50 кЭв.

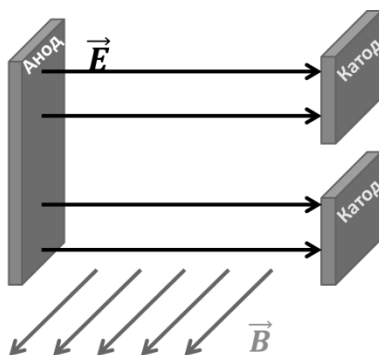


Рис. 1.14.12. Схема источника ионов

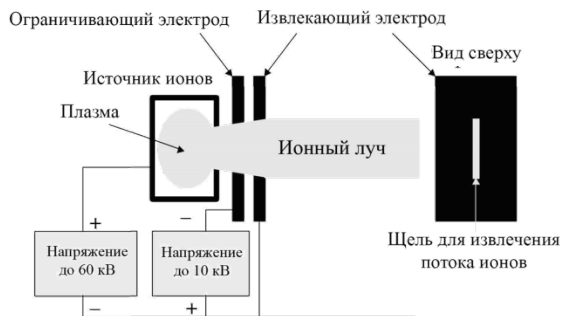


Рис. 1.14.13. Схема экстрагирования ионов из ионной камеры

Высокая энергия необходима для магнитного масс-спектрометра 2, который предназначен для отделения ненужных ионов от легирующих ионов.

Магнитный масс-спектрометр 2 предназначен для отделения ненужных ионов от легирующих ионов. Ионы, проходя через магнитное поле, разделяются в зависимости от соотношения атомарного веса и заряда (рис. 1.14.14).

Пройдя через диафрагму 3, ионы ускоряются в трубке 5. Для этого используются электроды с постоянным напряжением (рис. 1.14.15). На выходе трубке ионы разогнаны до энергии, необходимой для внедрения на заданную глубину. Далее ионный пучок фокусируется электромагнитной линзой 6 и, проходит через отклоняющие системы 8 и 9, попадая на подложку 11. Для поглощения нейтральных атомов, которые не отклоняются отклоняющей системой, существует специальная мишень 10.

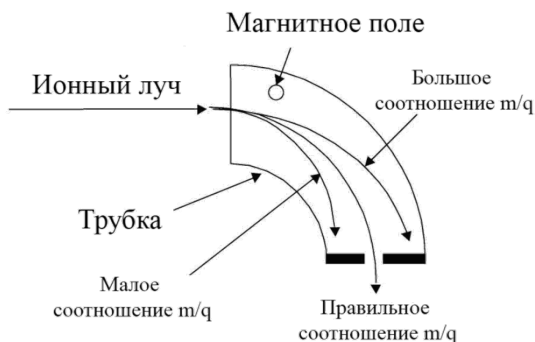


Рис. 1.14.14. Схема работы магнитного масс-спектрометра

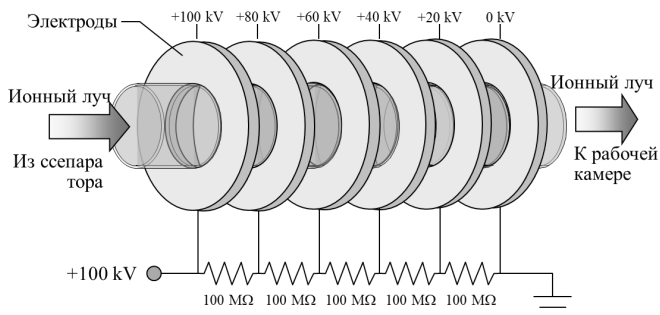


Рис. 1.14.15. Схема ускоряющей трубки

Поток ионов, проходя через диафрагму 3 и ускоряясь в трубке 5, фокусируется электромагнитной линзой 6 и, проходит через отклоняющие

системы 8 и 9, попадая на подложку 11.

Импантированные ионы заряжают подложку положительно, в результате чего возникает эффект зарядки, который может привести к искажению траектории ионов (рис. 1.14.16), что обуславливают неправильное распределение примеси. Кроме того, заряд подложки может привести к образованию дефектов на подложке и пробое оксидной пленки. Для минимизации эффекта зарядки необходимо использовать вторичные электроны (рис. 1.14.17), для чего в установках для ионной имплантации используется система наполнения плазмой (рис. 1.14.18) или электронный «душ» (рис. 1.14.19).

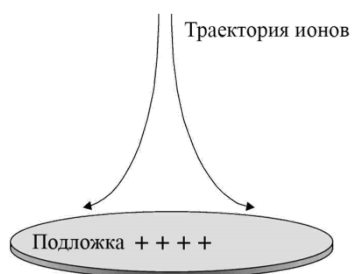


Рис. 1.14.16. Влияние эффекта зарядки на траекторию ионов

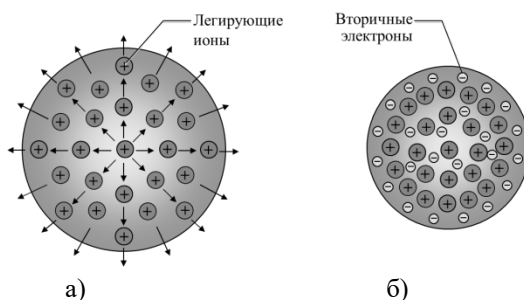


Рис. 1.14.17. Сечение ионного луча:
а – без нейтрализации; б – с нейтрализацией

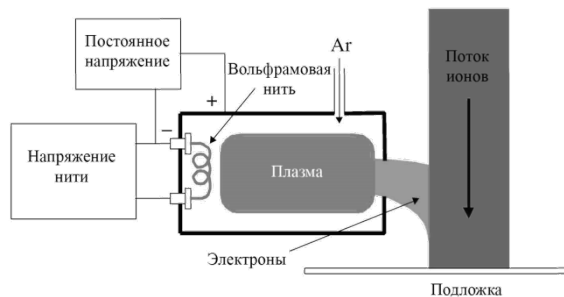


Рис. 1.14.18. Система наполнения плазмой

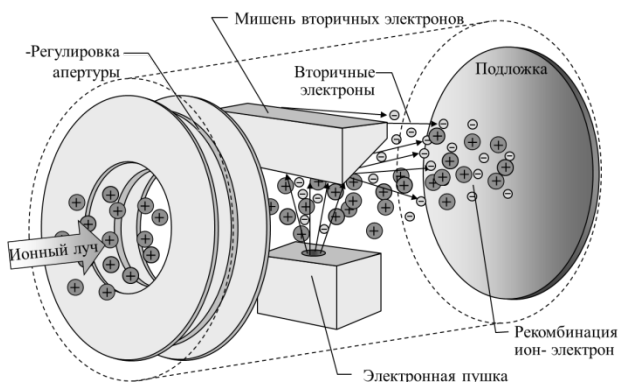


Рис. 1.14.19. Система электронный «душ»

Подложки в установке для ионного легирования располагаются на вращающемся диске (рис. 1.14.20), что обеспечивает механическое сканирование ионного пучка подложками. Отклоняющая же система обеспечивает электростатическое сканирование ионного луча по двум осям (рис. 1.14.21)

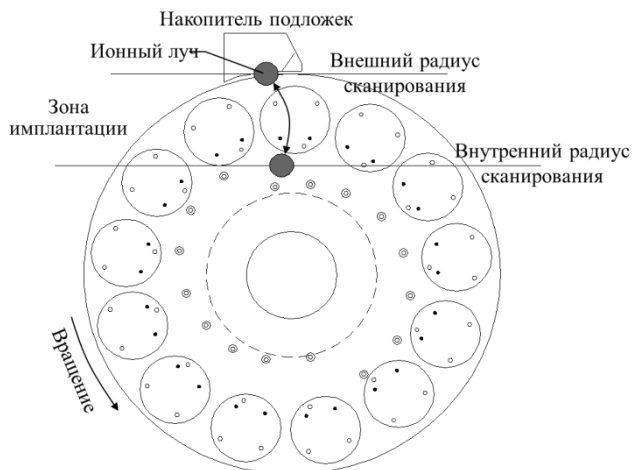


Рис. 1.14.20. Механическое сканирование ионного пучка подложкой

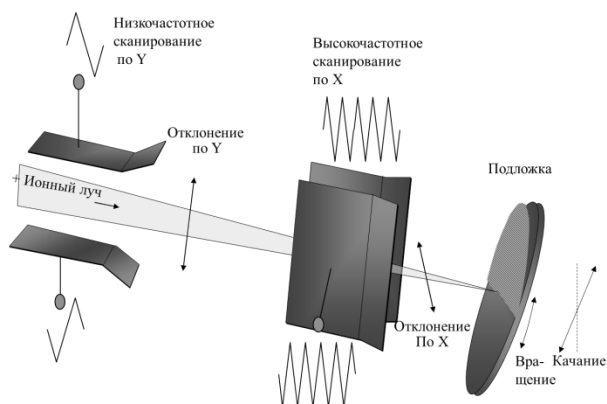


Рис. 1.14.21. Электростатическое сканирование ионного луча

Для остановки потока ионов используется специальное устройство (рис. 1.14.22) – охлаждаемая водой металлическая пластина, которая адсорбирует энергию ионов, забирает тепло и блокирует радиационное излучение. Там же располагается детектор заряда, который используется для калибровки потока, энергии и профиля распределения.

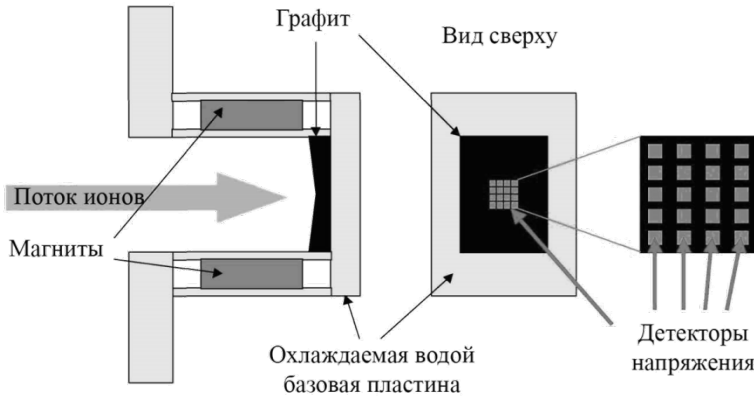


Рис. 1.14.22. Система остановки потока ионов и детектор заряда

Производство ИС ставит перед технологией ионной имплантации такие задачи, как создание диффузионных областей карманов с точным поддержанием поверхностной концентрации и мелкозалегающих областей исток-сток, точная подгонка порогового напряжения и т. п. При этом разрабатываемые имплантационные процессы должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- равномерность легирования по площади пластин;
- воспроизводимость процессов по партиям пластин;
- низкий уровень загрязнения металлическими примесями.

При переходе на субмикронные размеры возникает ряд проблем, связанных с конструктивными ограничениями элементов ИС:

- ограничения плотности упаковки из-за эффекта «защелки» и токов утечки между элементами;
- эффект «короткого канала»;
- формирование сверхтонких стоков-истоков областей;
- проблемы «горячих электронов» (высокая напряженность электрического поля вблизи области стока).

Решение указанных проблем, а также необходимость высокой прецизионности и чистоты процессов требует использования соответствующего *ионно-лучевого оборудования*, отвечающего следующим основным требованиям:

- высокая производительность при обработке пластин диаметром 150–200 мм (в том числе при энергии 3–10 кэВ);
- высокая равномерность и повторяемость набора дозы ($\sigma < 0,5\%$);
- привносимая дефектность $< 0,18 \text{ см}^{-2}$;

- легирование под углом до 60° ;
- легирование с энергией до 500–750 кэВ;
- загрязнение примесями тяжелых металлов $< 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$;
- возможно полная автоматизация.

1.14.4. СОЗДАНИЕ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ КНИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ КИСЛОРОДА

Кроме ионной имплантации легирующих примесей метод может использоваться для создания подложек, используемых для формирования структуры «кремний на изоляторе».

Процесс происходит в 2 этапа:

- имплантирование тяжелого кислорода (рис. 1.14.23 а);
- высокотемпературный отжиг (рис. 1.14.23 б).

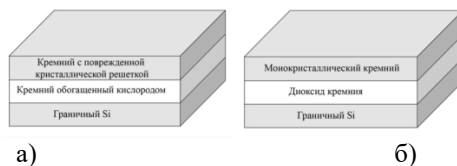


Рис. 1.14.23. Формирование подложки для КНИ ионной имплантацией: а – структура после ионной имплантации кислорода; б – структура после отжига

На первом этапе ионы кислорода разгоняются до высоких энергий и проникают вглубь кремния. Далее происходит высокотемпературный отжиг, во время которого не только происходит окисление кремния на глубине с образованием SiO_2 , но и возвращение кремния к монокристаллической структуре.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ 14

Вопрос 1	Как избежать эффекта каналирования при ионной имплантации?
Ответы:	
1	Повернуть подложку на 7-8 градусов.
2	Уменьшить энергию ионов.
3	Нагреть подложку.
Вопрос 2	Зачем нужен электронный «душ»?
Ответы:	
1	Для нейтрализации положительного заряда подложки.
2	Для уменьшения разброса энергий ионов.
3	Для ускорения ионов.