

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Д. А. Котов, Ю. А. Родионов

**БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь
по образованию в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования по специальностям
«Микро- и наноэлектронные технологии и системы»
и «Квантовые информационные системы»*

Минск БГУИР 2011

УДК 621.382.8 (076)
ББК 32.844.1я73
К73

Рецензенты:
профессор кафедры «Микро- и нанотехнологии»
Белорусского национального технического университета В. А. Сычик;
ректор Минского государственного высшего
радиотехнического колледжа, профессор Н. А. Цырельчук

Котов, Д. А.
К73 Базовые технологические процессы изготовления интегральных схем и микроэлектромеханических систем. Лаб. практикум : учеб.-метод. пособие / Д. А. Котов, Ю. А. Родионов. – Минск : БГУИР, 2011. – 44 с.
ISBN 978-985-488-425-7.

В пособии рассматриваются четыре технологических процесса: химическое травление; высокотемпературная диффузия; ионное легирование; микролитография. В конце пособия приводится перечень контрольных вопросов и литература.

УДК 621.382.8(076)
ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-488-425-7

© Ю. А. Родионов, Д. А. Котов, 2011
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Требования техники безопасности при выполнении базовых технологических процессов.....	6
2. Базовые технологические процессы изготовления ИС и МЭМС.....	6
2.1. Химическое травление кремния.....	6
2.2. Технологический процесс высокотемпературной диффузии.....	11
2.3. Технологический процесс ионного легирования.....	19
2.4. Технологический процесс микролитографии	28
2.5. Технологический процесс металлизации	38
3. Контрольные вопросы.....	42
Литература	44

Библиотека БГУИР

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многообразие классов, типов и номиналов интегральных схем, дискретных полупроводниковых приборов и микроэлектромеханических систем, набор основных технологических приемов их изготовления известен и сводится к операциям создания эпитаксиальных, легированных, металлических, диэлектрических слоев и операции микрогравировки (микролитографии) этих слоев. Операции химической подготовки перед созданием технологического слоя и химическим травлением в настоящее время в микроэлектронике относятся не к вспомогательным, а к основным (базовым), поскольку в длинной цепочке технологического процесса они составляют большой объем и во многом определяют выход годных изделий.

В современной микро- и наноэлектронике основным полупроводниковым материалом остается кремний. Поэтому в инженерной терминологии словосочетание «кремниевая технология» становится общеупотребительным. Именно поэтому при изучении теоретического курса ограничиваются изучением газофазной эпитаксии кремния.

Как известно, при создании диэлектрических слоев максимальное внимание уделяется оксиду и нитриду кремния. Для получения легированных слоев используется термодиффузия (редко) и ионное легирование (наиболее распространенный процесс). В качестве металлизации используется медь и слои алюминия с различными добавками. Литография технологического слоя осуществляется либо жидкостным химическим процессом (старый и до сих пор востребованный процесс при технологических размерах элемента более 0,35 мкм), либо сухим плазмохимическим травлением.

Поэтому в данном лабораторном практикуме основное внимание уделено химическому травлению, диффузии, ионной имплантации и микролитографии.

Цель лабораторного практикума:

– получить представление о базовых технологических процессах изготовления кремниевых ИС, активных и пассивных элементов мощных и СВЧ дискретных полупроводниковых устройств, микроэлектромеханических систем (МЭМС);

– изучить основные теоретические положения физико-химических процессов на поверхности и в объеме твердого тела; основные параметры и характеристики технологических процессов; контрольно-измерительные операции;

– приобрести практические навыки в инженерных расчетах режимов технологических операций;

– научиться устанавливать зависимости между параметрами технологического процесса и электрофизическими характеристиками полученных слоев и структур.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

1. Получить у преподавателя задание на выполнение лабораторной работы. Изучить требования по технике безопасности (раздел 1).
2. Ознакомиться с заданным базовым технологическим процессом. Изучить последовательность операций и особенности данного процесса в интерактивной программе.
3. Приступить к выполнению расчетной части работы — расчету параметров технологического процесса.
4. После определения параметров технологического процесса оценить их с точки зрения возможностей технологического оборудования и требований серийного производства.
5. Предоставить преподавателю результаты работы и обосновать их достоверность.
6. Для защиты работы подготовить рекомендации по построению технологического процесса.

1. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по охране труда и технике безопасности в технологической лаборатории и изучившие порядок работы с электрооборудованием и химическими растворами, используемыми для химической обработки технологических слоев.

Перед включением приборов в сеть необходимо проверить наличие заземления. Заземление приборов и устройств проводит лаборант.

Категорически запрещается вскрывать защитные кожухи на приборах и прикасаться к токоведущим проводам и клеммам.

2. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИС И МЭМС

2.1. Химическое травление кремния

Процесс травления (растворение поверхностного слоя кремния с дальнейшим удалением продуктов реакции) состоит из нескольких этапов: реагент должен приблизиться к поверхности пластины, адсорбироваться на ней, вступить с кремнием в химическое взаимодействие. Образовавшимся продуктам реакции необходимо в свою очередь десорбироваться с поверхности, а затем перейти в объем раствора.

Время травления является суммой времен протекания каждого из этих этапов. Причем если какой-либо этап оказывается наиболее длительным, то он будет определять время процесса травления. Доставка молекул из объема травителя к поверхности пластины – диффузионный процесс, скорость которого определяется выражением

$$V_{\text{д}} = k_{\text{д}}(C - C'),$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент диффузии молекул травителя (определяется вязкостью, температурой и скоростью перемешивания травителя).

В первый момент, когда концентрация травителя везде одинакова, скорость травления (реакции растворения) кремния максимальна и равна

$$V_{\text{р}} = k_{\text{р}}C \exp(-E / kT),$$

где $k_{\text{р}}$ – константа скорости химической реакции растворения (определяется свойствами материала, подвергающегося травлению); E – энергия активации процесса травления; k – постоянная Больцмана; T – температура, в градусах К.

Через некоторый промежуток времени скорость диффузии реагента к поверхности и скорость химической реакции становятся одинаковыми:

$$k_d(C - C') = k_p C \exp(-E / kT).$$

Тогда скорость травления v можно определить следующим образом:

$$v = \frac{k_d k_p \exp(-E/kT)}{k_d + k_p \exp(-E/kT)} C.$$

Характер травления кремния зависит от того, какая из стадий травления является самой медленной: диффузия реагента к поверхности или химическая реакция. Скорости каждой из этих стадий определяются величинами единичных скоростей диффузии k_d или химической реакции $k_p \exp(-E/kT)$.

Если $k_d \gg k_p \exp(-E/kT)$, то

$$v = k_p C \exp(-E/kT). \quad (2.1)$$

Скорость травления определяется скоростью химической реакции и зависит от энергии активации травления. Следовательно, травление в первый момент будет селективным. Такой процесс используется для выявления структурных дефектов на поверхности полупроводника, кристаллографической ориентации поверхности.

Если $k_d \ll k_p \exp(-E/kT)$, то

$$v \cong k_d C.$$

Скорость травления в этом случае мало зависит от энергии активации и определяется лишь диффузионными процессами. Травление будет полирующим. Полировка происходит следующим образом. Если на поверхности пластины имеется рельеф, то после образования у поверхности обедненного травителем слоя оказывается, что его толщина около выступов несколько меньше, чем его средняя толщина, поэтому к выступам реагент подходит быстрее и происходит их сглаживание.

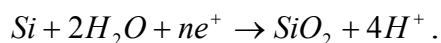
Две теории саморастворения кремния

Кремний является довольно инертным материалом, что объясняется наличием окисной пленки на его поверхности. Поэтому в состав травителя для кремния вводят плавиковую кислоту, растворяющую окисел. Для объяснения саморастворения кремния существуют две теории: химическая и электрохимическая.

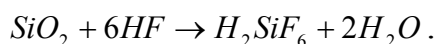
Простейшее объяснение процесса травления дает химическая теория: травитель должен содержать два компонента – окислитель, которым обычно

является азотная кислота, и растворитель окисла, которым служит плавиковая кислота. Электрохимическая теория предполагает, что поверхность полупроводника является энергетически неоднородной, в результате чего на ней могут возникать пространственно разделенные участки микрокатодов и микроанодов.

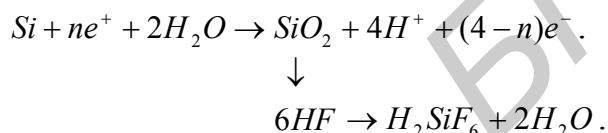
На анодных участках протекает следующая реакция:



Образовавшийся окисел переводится в растворимый комплекс с помощью плавиковой кислоты:



Суммарная реакция может быть записана так:



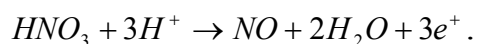
Основными катодными реакциями на кремнии являются выделение водорода и восстановление молекул окислителей. При катодных реакциях могут создаваться гидриды кремния.

Реакция восстановления окислителей, например, азотной кислоты, протекает гораздо легче, чем реакция выделения водорода. Процесс может идти с захватом электрона из зоны проводимости или валентной зоны, что равносильно инжекции дырок на поверхности кремния.

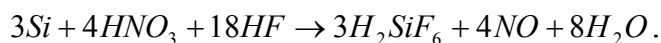
Восстановление азотной кислоты происходит с участием двух электронов и образованием азотистой кислоты:



или с участием трех электронов (восстановление до окиси азота):



В последнем случае при восстановлении одной молекулы кислоты выделяются три дырки, что приводит к увеличению скорости растворения кремния. Суммарная реакция травления для этого случая имеет вид



Влияние примесей

При использовании полирующего травителя присутствие различных примесей и загрязнений на поверхности полупроводника может существенно изменить не только скорость, но и характер травления. Большинство неактивных газов (азот, аргон и др.) легко удаляется с поверхности. В отличие от них кислород обладает очень высокой теплотой адсорбции (220 ккал/моль), которая уменьшается в четыре раза, после того как на поверхности кремния образуется монослой окисла. Образовавшийся окисел маскирует кремний от воздействия травителя. Поэтому в присутствии ионов, способствующих растворению окисла (например, ионов фтора) скорость травления растет.

Примеси, содержащиеся в объеме полупроводника при их сравнительно невысокой концентрации (менее 10^{18} см⁻³), оказывают пренебрежимо малое влияние на скорость химического взаимодействия травителя с кремнием. При большой концентрации примесей скорость химической реакции может возрастать из-за увеличения концентрации в поверхностном слое полупроводника структурных дефектов, возникающих при введении примесей. Скорость травления на участках с различным типом проводимости может оказаться разной. В результате на поверхности полупроводника возникают ступеньки, полосы, бугорки.

Дефекты структуры полупроводника

Если полупроводник содержит большое количество структурных дефектов, особенно дислокаций, то в области выхода дислокации на поверхность полупроводника может образоваться ямка травления. Дислокация характеризуется избыточной упругой энергией деформации, что облегчает растворение вдоль дислокации. Энергия активации растворения кремния уменьшается в этом месте на величину, равную энергии деформации, приходящейся на один атом. Введение большой концентрации примеси способствует увеличению плотности дислокаций. Сегрегация (выделение) примесей на дислокации также приводит к увеличению скорости травления.

Ориентация поверхности полупроводника

Процессы селективного (избирательного) травления, определяемые скоростью химической реакции, существенно зависят от кристаллографической ориентации полупроводника. Это связано с тем, что процессы адсорбции и комплексообразования определяются числом связей, удерживающих атомы на поверхности, направлением этих связей и расстоянием между атомами. Наибольшая скорость травления в кислотных травителях наблюдается на плоскости, параллельной (110). Наиболее медленно травится плоскость (111). Вероятно, это связано с различием адсорбции ионов фтора на этих кристаллографических плоскостях. Так, например, можно подобрать компо-

ненты травителя таким образом, что скорости травления плоскостей (100) и (111) будут различаться в 50 раз.

Концентрация компонентов травителя

В полупроводниковой промышленности при жидкостном травлении материалов используются водные растворы реактивов следующих концентраций, % :

плавиковая кислота HF – 49 – 51;

азотная кислота HNO_3 – 70;

перекись водорода H_2O_2 – 30;

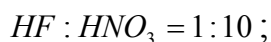
соляная кислота HCl – 36;

серная кислота H_2SO_4 – 90;

уксусная кислота CH_3COOH – ледяная (безводная).

Скорость процесса травления можно регулировать, вводя различные добавки. Замедлителем (ингибитором) реакции является ледяная уксусная кислота, ускорителем (катализатором) служит элементарный бром. Уксусная кислота, введенная в травитель, уменьшает диэлектрическую постоянную раствора и тем самым подавляет диссоциацию азотной кислоты на ионы. Кроме того, она сама диссоциирует с выделением большого количества ионов H^+ . В результате катодные реакции замедляются. При введении в раствор ускорителя нескольких капель брома, который адсорбируется на поверхности кремния, в первый момент реакция травления замедляется. Затем он захватывает электрон из кремния и становится отрицательно заряженным ионом Br^- . Отдавая электрон азотной кислоте и переходя в раствор в виде нейтрального иона, бром ускоряет диссоциацию азотной кислоты и способствует протеканию катодных реакций. При этом возрастает количество дырок в кремнии и травление ускоряется.

На разных этапах технологического процесса могут использоваться полирующие травители с разным соотношением компонентов. Для полировки пластин можно применять травители следующих составов:



После длительного хранения перед проведением последующих операций пластины освежают в разбавленной плавиковой кислоте для удаления неконтролируемых окислов на поверхности кремния. Применяется ряд составов травителей на основе азотной и плавиковой кислот. При изменении концентрации компонентов травителя существенно меняются его свойства – травитель может стать селективным. Один из широко известных селективных травителей – травитель Деша – имеет следующий состав:



С помощью этого травителя можно выявить кристаллографические плоскости, дислокации.

Температура раствора

Скорость химической реакции экспоненциально зависит от температуры. Травление полупроводника идет с большим выделением тепла. Возможная неравномерность травления может привести к неоднородному разогреву пластин и растравливанию в местах с наиболее высокой температурой.

Скорость травления линейно возрастает с увеличением скорости перемешивания раствора. При слишком медленном перемешивании толщина обедненного слоя может стать очень большой и травление замедлится. Напротив, при большой скорости перемешивания обедненный слой может не успевать образовываться у поверхности пластин или «срываться» с поверхности потоком жидкости, что приводит к селективному растравливанию поверхности.

2.2. Технологический процесс высокотемпературной диффузии

Термодиффузия – способ создания легированных слоев, в настоящее время практически не использующийся в технологии интегральных схем. Однако он широко востребован в техпроцессах создания мощных диодов, транзисторов, солнечных элементов и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Кроме этого, один из вариантов отжига имплантированных слоев современных интегральных схем является чисто диффузионным процессом.

Механизмы диффузии

Основными механизмами перемещения атомов по кристаллу могут быть (рис. 2): *a* – прямой обмен атомов местами; *b* – кольцевой обмен; *в* – перемещение по междоузлиям; *г* – эстафетная диффузия; *д* – перемещение по вакансиям; *е* – диссоциативное перемещение; а также миграция по протяженным дефектам (дислокациям, дефектам упаковки, границам зерен).

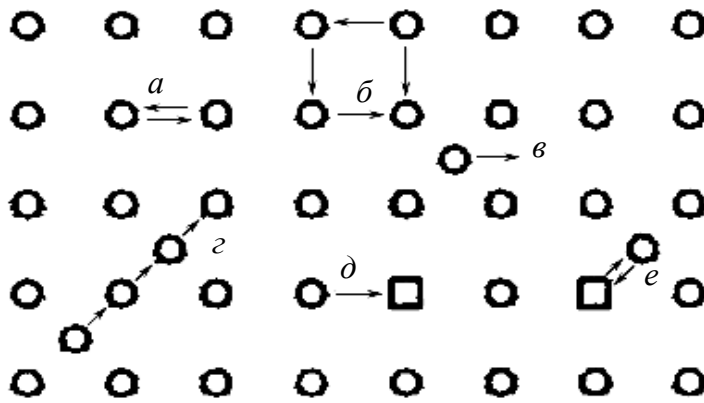


Рис. 2.1. Схема возможных механизмов диффузии атомов в кристаллах

В любом процессе диффузии, как правило, имеют место все перечисленные механизмы движения атомов. Однако вероятность этих процессов в кристалле различна. Для диффузии атомов примеси в полупроводнике наиболее существенны перемещения по междоузлиям и вакансиям.

При комнатной температуре равновесная концентрация вакансий в кремнии составляет $10^7 - 10^8 \text{ см}^{-3}$. Однако с повышением температуры до 1000°C она возрастает до $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Диффузия по вакансиям. Коэффициент диффузии

Скорость движения атомов в кристалле можно определить как $v = \delta / \tau$, где δ – ближайшее расстояние между двумя положениями равновесия (двумя узлами или междоузлиями); τ – время нахождения частицы в одном из положений равновесия:

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta E / kT), \quad (2.2)$$

где τ_0 – постоянная, равная по порядку величины периоду собственных колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-13} \text{ с}$; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Величина $\Delta E = U + W$ называется энергией активации процесса диффузии. Распределение атомов по энергии в кристалле подчиняется статистике Максвелла – Больцмана. По аналогии с кинетической теорией газов можно ввести коэффициент диффузии в кристалле:

$$D = \frac{1}{6} v \delta$$

или с учетом предыдущей формулы:

$$D = \frac{\delta^2}{6\tau_0} (-\Delta E / kT), \quad (2.3)$$

тогда

$$D = D_0 \exp(\Delta E / kT) (\text{см}^2 / \text{с}). \quad (2.4)$$

Величина $\delta^2 / 6\tau_0 = D_0$ – коэффициент диффузии при бесконечно большой температуре. Коэффициент диффузии характеризует скорость, с которой система возвращается в положение равновесия.

Используя уравнение (2.4), можно рассчитать коэффициенты диффузии основных примесей в кремнии.

Распределение примесей при диффузии

Если примесь вводится в приповерхностную область кристалла, то создается градиент концентрации и возникает направленный поток частиц, стремящийся выровнять концентрацию. Этот процесс описывается первым законом Фика:

$$j = -D \nabla N, \quad (2.5)$$

где j – плотность потока атомов; D – коэффициент диффузии; ∇ – оператор (градиент) диффузии; N – концентрация атомов. Знак «минус» означает, что поток направлен в сторону уменьшения концентрации.

Для одномерного случая поток примеси будет пропорционален градиенту концентрации:

$$j = -D \frac{\partial N}{\partial x}. \quad (2.6)$$

Из этого выражения можно получить следующее уравнение:

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2}. \quad (2.7)$$

Это уравнение называется вторым законом Фика.

Процесс диффузии обычно проводится в два этапа. На первом этапе легирования в тонкий приповерхностный слой полупроводника вводится необходимое количество примеси, обеспечивающее на втором этапе заданное сопротивление и толщину легированного слоя. Двухэтапная диффузия

позволяет лучше управлять процессом и обеспечивать нужное для практики распределение примеси.

Двум этапам диффузионного процесса соответствуют два решения закона Фика при различных граничных условиях:

– на первом этапе рассматривается диффузия с постоянной поверхностной концентрацией или диффузия из бесконечного источника примеси (концентрация примеси над поверхностью полупроводника постоянна);

– на втором этапе рассматривается диффузия из ограниченного источника примеси (примесь находится только в приповерхностном слое и на поверхности полупроводника).

В первом случае примесь поступает непрерывно через поверхность кристалла ($x = 0$) из внешнего источника («загонка» примеси), во втором – количество примеси ограничено, поверхность кристалла для примеси непроницаема и по мере движения примеси вглубь кристалла источник обедняется («разгонка» примеси).

Загонка примеси

Целью первого этапа диффузии является введение в полупроводник точно контролируемого количества примеси, которое будет служить ограниченным источником на втором этапе процесса. При этом поверхностная концентрация примеси на границе $x = 0$ все время остается постоянной и равной N_0 . Граничные условия для решения второго уравнения Фика могут быть записаны в виде

$$\left. \begin{aligned} N(x, t) &= 0 \\ & \text{при } x > 0 \\ & \text{и } t = 0 \end{aligned} \right| \quad \left. \begin{aligned} N(x, t) &= N_0 \\ & \text{при } x > 0 \\ & \text{и } t \geq 0 \end{aligned} \right| \quad (2.8)$$

Это означает, что в начале процесса примесь в объеме кристалла отсутствует, однако на поверхности ее концентрация в любой момент времени равна N_0 . В процессе диффузии примесь к поверхности кристалла поступает из внешнего источника непрерывно и поток ее все время одинаков. Поэтому процесс и получил название диффузии из бесконечного или неограниченного источника.

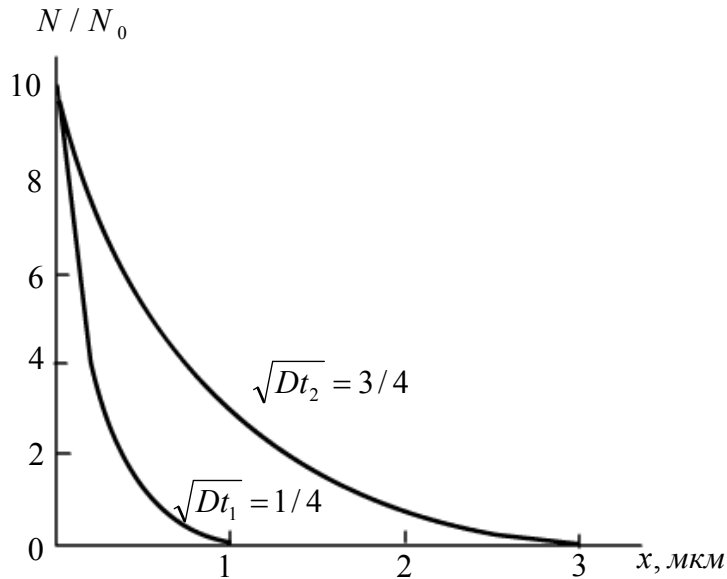


Рис. 2.2. Распределение примеси при диффузии из бесконечного источника

Решением уравнения Фика будет выражение

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (2.9)$$

Функция $\operatorname{erfc} y$ – (error function complementation), дополняющая функцию ошибок $\operatorname{erf} y$ (error function) до 1, равна

$$\operatorname{erfc} y = 1 - \operatorname{erf} y = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-z^2} dz.$$

Уравнение (2.9) хорошо выполняется при диффузии примеси из газовой или паровой фазы. Распределение примеси для двух времен $t_1 < t_2$ показано на рис. 2.2.

Величина постоянной поверхностной концентрации N_0 определяется скоростью потока примеси, поступающей к поверхности кристалла:

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{DN}{\sqrt{xDt}} \exp\left(-\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2 \Big|_{x=0} = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t}}. \quad (2.10)$$

Тогда за время t в твердое тело поступит количество примеси, определяемое выражением

$$Q = \int_0^t J(t) dt = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}. \quad (2.11)$$

Это выражение хорошо выполняется в том случае, когда глубина проникновения примеси достаточно велика, – превышает несколько микрометров, а концентрация примеси сравнительно невелика – не более 10^{19} м^{-3} . Максимальное значение величины N_0 равно предельной растворимости примеси в кремнии при данной температуре. Предельная растворимость определяется фазовой диаграммой состояния для кремния и соответствующей примеси.

Разгонка примеси

Целью второго этапа диффузии является получение заданного распределения примеси. Высоколегированный поверхностный слой полупроводника, образованный на первом этапе диффузии, служит источником примеси, количество Q которой определено уравнением (2.11). Поверхность $x = 0$ считается абсолютно непроницаемой, т.е. поток примеси через эту поверхность в любое время отсутствует, поэтому граничное условие может быть записано в виде

$$\left. \frac{\partial N(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (2.12)$$

Вся примесь считается сосредоточенной в тонком поверхностном слое толщиной h , а распределение примеси в этом слое равномерно. Полное количество примеси в предельном случае определяется величиной поверхностной концентрации N_0 и толщиной легированного слоя h . Площадь, ограниченная прямоугольником, должна быть равна площади кривой, описываемой уравнением (2.9) при данных N_0 , x и t . Полное количество введенной примеси, таким образом, равно

$$Q = N_0 h.$$

При диффузии вглубь кристалла поверхностная концентрация примеси будет все время уменьшаться. Начальные условия для решения второго уравнения Фика могут быть записаны в этом случае следующим образом:

$$N(x,t)|_{t=0} = \begin{cases} N_0, & 0 \leq x \leq h; \\ 0, & x > h. \end{cases} \quad (2.13)$$

Решение уравнения Фика имеет вид

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[- \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

и является распределением Гаусса по x .

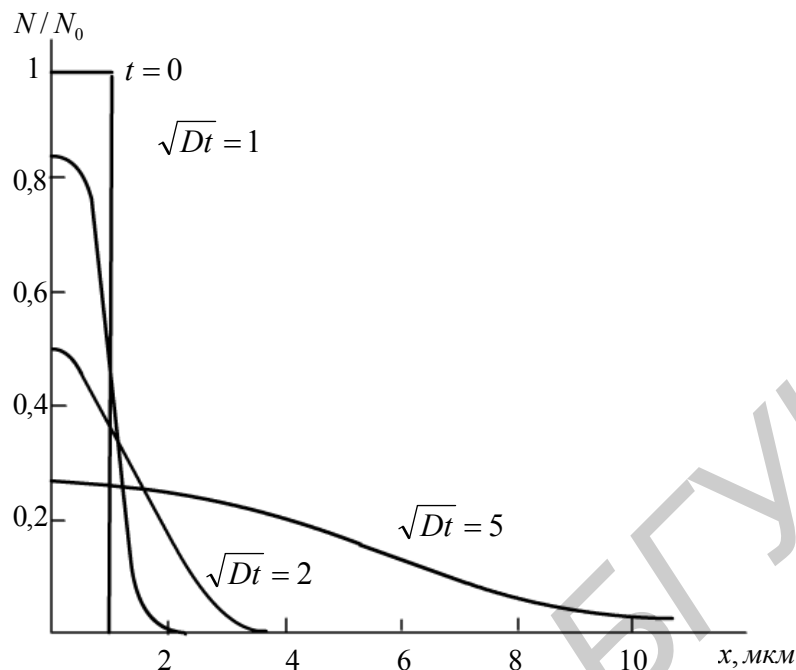


Рис. 2.3. Распределение примеси при диффузии из ограниченного источника

Поверхностная концентрация примеси в момент времени t определяется выражением

$$N_s(t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} < N_0. \quad (2.15)$$

Источники донорной примеси

Донорами в кремнии являются элементы V группы таблицы Менделеева: фосфор, мышьяк, сурьма. Ранее в качестве донорной примеси наиболее часто использовался фосфор. Однако с переходом к субмикронным размерам элементов интегральных микросхем и уменьшением толщин диффузионных слоев все большее место в технологии занимают мышьяк и сурьма.

Источники акцепторной примеси

Акцепторами в кремнии являются элементы III группы таблицы Менделеева: бор, галлий, индий, алюминий. В полупроводниковой планарной технологии используется бор (в некоторых случаях галлий). Применение алюминия, галлия, индия в планарной технологии ограничено из-за высокой проницаемости окисла кремния для этих примесей.

Бор является, таким образом, основной акцепторной примесью при изготовлении кремниевых интегральных микросхем.

Контроль параметров диффузионных слоев

К параметрам диффузионного слоя относят глубину залегания р–п-перехода x_j , поверхностное сопротивление слоя R_S (поверхностную концентрацию примеси N_S) и зависимость концентрации примеси от глубины $N(x)$.

Обычно x_j измеряют с помощью сферического шлифа. Погрешность определения x_j в этом случае составляет около 2 %. Для определения удельной электрической проводимости тонких диффузионных слоев измеряется x_j и поверхностное сопротивление слоя R_S четырехзондовым методом.

Методические указания

- Изучению теоретических аспектов термодиффузии уделить особое внимание. Необходимо понять механизмы перемещения примесных атомов по кристаллической решетке кремния.
- Обратит внимание на коэффициент диффузии примесей и распределение примесей при диффузии.
- Необходимо изучить законы термодиффузии – законы Фика, определяющие протекание процессов распределения примесей в полупроводнике.
- Обратит внимание на проведение этапов технологических процессов термодиффузии. Оценить применимость разных способов проведения термодиффузии.
- При изучении контроля параметров диффузионных слоев обратит внимание на контроль толщины слоя методом косого и шарового слоя.
- Контроль концентрации легирующей примеси в слое определяется измерением поверхностного сопротивления, поэтому на этот метод обратит особое внимание.

Практическая часть

В ходе выполнения лабораторной работы после ознакомления с основными теоретическими вопросами студенты решают обратную инженерную задачу (табл. 2.1): определяют технологические режимы проведения термодиффузии (температура и время процесса) для получения структуры с заданными параметрами. Подробная методика решения инженерных технологических задач по термодиффузии приведена в [5].

Таблица 2.1.

Номер варианта	Тип подложки	Внедряемая примесь	Толщина диф. слоя	Поверхностное сопротивление Ом/кв.	Процесс, стадии
1	КЭФ-4,5	B	0,1	40	2
2	КЭФ-4,5	B	0,2	50	2
3	КЭФ-10	B	0,3	60	2
4	КЭФ-10	B	0,11	35	2
5	КЭФ-20	B	0,12	48	2
6	КЭФ-20	B	0,13	50	2
7	КЭФ-40	B	0,14	41	2
8	КЭФ-40	B	0,2	60	2
9	КДБ-10	P	0,1	40	2
10	КДБ-10	P	0,18	41	2
11	КДБ-10	P	0,15	38	2
12	КДБ-20	P	0,1	52	2
13	КДБ-20	As	0,2	45	2
14	КДБ-20	As	0,15	40	2
15	КДБ-40	As	0,25	38	2
16	КДБ-40	As	0,11	51	2
17	КДБ-40	As	0,15	44	2
18	КЭС-01	B	0,1	40	2
19	КЭС-01	B	0,2	35	2
20	КЭС-01	B	0,15	40	2

2.3. Технологический процесс ионного легирования

Внедрение ионов (ионная имплантация, ионное легирование) в кремниевую подложку для формирования слоев с нужной проводимостью является основным методом легирования при создании всей гаммы кремниевой элементной базы.

Характеристики процесса ионного легирования.

Суть процесса ионного внедрения заключается в формировании пучков ионов с одинаковой массой и зарядом, обладающих необходимой заданной энергией, и внедрении их в подложку или мишень в определенном количестве, называемом дозой. Нужная энергия E_0 приобретается ионом под действием разности потенциалов U :

$$E_0 = neU, \quad (2.16)$$

где n – кратность ионизации, $n = 1, 2, 3$; e – заряд электрона. (Например, $^{31}\text{P}^+$ означает, что внедряется однократно ионизованный (+) ион фосфора с атомной массой 31; BF_2^+ – однократно ионизованная молекула фторида бора.)

Доза ионов определяется либо плотностью тока ионов j в единицу времени t :

$$Q = j/t[\text{Кл}/\text{см}^2], \quad (2.17)$$

либо количеством частиц на единицу площади

$$N_0 = Q/ne = j/tne[\text{ион}/\text{см}^2]. \quad (2.18)$$

Для $n = 1$ $1 \text{ мкКл}/\text{см}^2$ соответствует примерно $6,25 \cdot 10^{12}$ ион/см².

Пробег ионов

При движении в твердом теле быстрый ион в результате столкновений с ядрами и электронами теряет свою энергию и останавливается. Полная длина пути, пройденного ионом, и ее проекция на направление первоначального движения иона называются соответственно пробегом R и проекцией R_p пробега (рис. 2.4, а). По всей длине пробега образуются дефектные области (рис. 2.4, б).

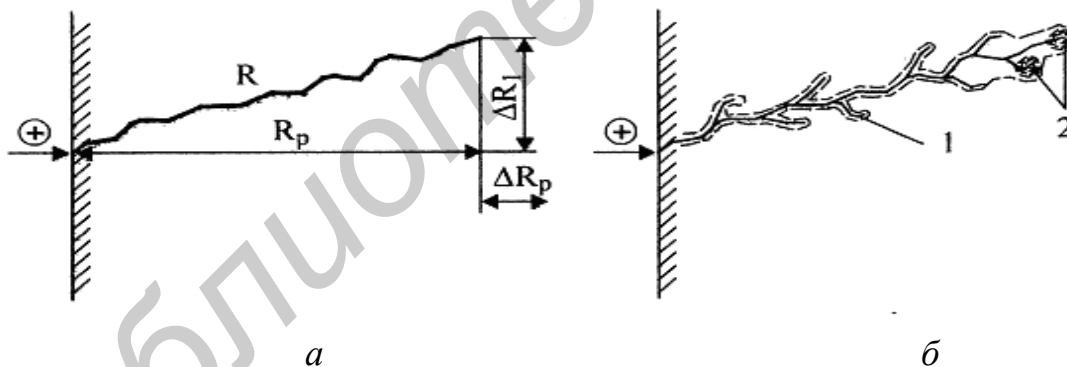


Рис. 2.4 Схема движения внедряемого иона: а – пробег R , проекция пробега R_p и рассеяние пробега ΔR_p и ΔR_1 ; б – образование дефектных областей в подложке на пути иона; 1 – точечные дефекты, 2 – аморфные области

Распределение пробега в аморфной мишени зависит главным образом от энергий, масс и атомных номеров бомбардирующих ионов и атомов мишени, плотности и температуры мишени во время ионной бомбардировки, дозы внедренных ионов. Для монокристаллической мишени распределение пробега, кроме того, сильно зависит от ориентации кристалла относительно ионного пучка, условий на поверхности мишени и ее предыстории.

В случае внедрения ионов в аморфные и неориентированные кристаллические мишени обычно используется теория Линдхарда, Шарфа и Шиотта (называемая теорией ЛШШ), которая позволяет рассчитать ряд параметров, характеризующих измеряемые распределения пробегов с точностью, вполне удовлетворительной с точки зрения основных практических применений.

Для расчета зависимости пробега от энергии частицы в случае ионного внедрения рассматриваются два основных вида потерь энергии: в результате взаимодействия с электронами твердого тела (как связанными, так и свободными) и при столкновении с ядрами мишени.

Ядерная тормозная способность $S_N(E)$ – это энергия, теряемая движущимся ионом с энергией E на интервале пути Δx при столкновении с ядрами мишени, плотность которой равна единице.

Электронная тормозная способность $S_E(E)$ – это энергия, теряемая движущимся ионом с энергией E при столкновении с электронами.

При известных $S_N(E)$ и $S_E(E)$ общее расстояние R , пройденное движущимся ионом с начальной энергией E_0 до его остановки, равно

$$R = \int_0^R dx = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{[S_E(E) + S_N(E)]} \quad (2.19)$$

При имплантации ионов в мишень создаются радиационные нарушения (дефекты) решетки мишени. При внедрении ионов малых энергий радиационные дефекты образуются вдоль всей траектории частицы, а в случае бомбардировки ионами высокой энергии – только в конце пробега. В том случае, когда кристалл ориентирован точно по направлению с низкими кристаллографическими индексами, для движущегося иона ряды атомов кристалла образуют так называемый канал (рис. 2.5, а), а траектория иона совпадает с осью канала (рис. 2.5, б) – т.е. наблюдается эффект каналирования.

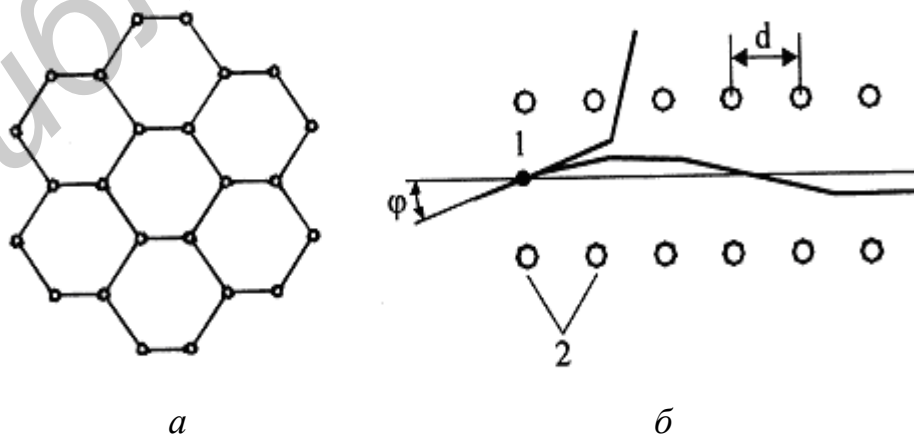


Рис. 2.5. Эффект каналирования: а – расположение атомов в кремнии в плоскости, перпендикулярной направлению [110]; б – движение внедренного иона вдоль канала 1, образованного атомами мишени 2

Максимальный угол Φ , при котором исчезает направляющее действие ряда атомов, называется критическим углом каналирования Φ_K . Часть ионов может в результате столкновений выйти из канала. Такие ионы принято называть деканализованными.

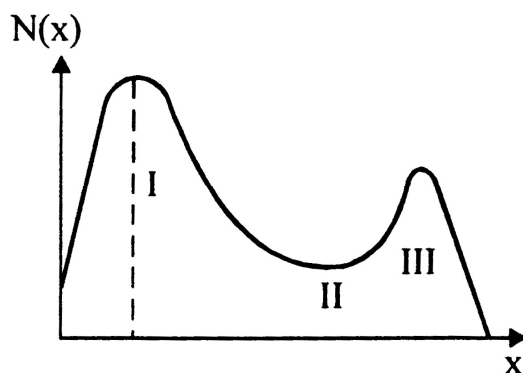


Рис. 2.6. Распределение примеси при каналировании:
 I – основное распределение, II – деканализованные ионы,
 III – каналированные ионы

Основные типы дефектов, образующихся при ионном легировании полупроводника

При ионном легировании характерными являются дефекты по Шоттки (вакансии) и по Френкелю (междоузлия). Вакансии при своем движении по кристаллу могут объединяться в пары – дивакансии или более сложные комплексы – тривакансии, тетравакансии и даже гексавакансии. В результате объединения простых дефектов возникают линейные и плоскостные дефекты – дислокации, дефекты упаковки.

При внедрении тяжелых ионов малыми дозами при комнатной температуре в кристаллической решетке возникают разупорядоченные области, называемые кластерами. При больших дозах ионов кластеры перекрываются, концентрация дефектов может превысить предельную. В этом случае происходит аморфизация полупроводника.

Распределение внедренных ионов

При ионном легировании первичным процессом является проникновение ускоренных ионов в вещество и их торможение до тепловых скоростей. Установившееся в результате этого распределение внедренных атомов примеси по глубине называют профилем торможения. Основными характеристиками профиля торможения примесных атомов являются средняя проекция пробега \bar{R}_p и среднеквадратичный разброс проецированных пробегов или среднее нормальное отклонение проекции пробега $\Delta\bar{R}_p$. Распределение проекций пробегов считается гауссовым.

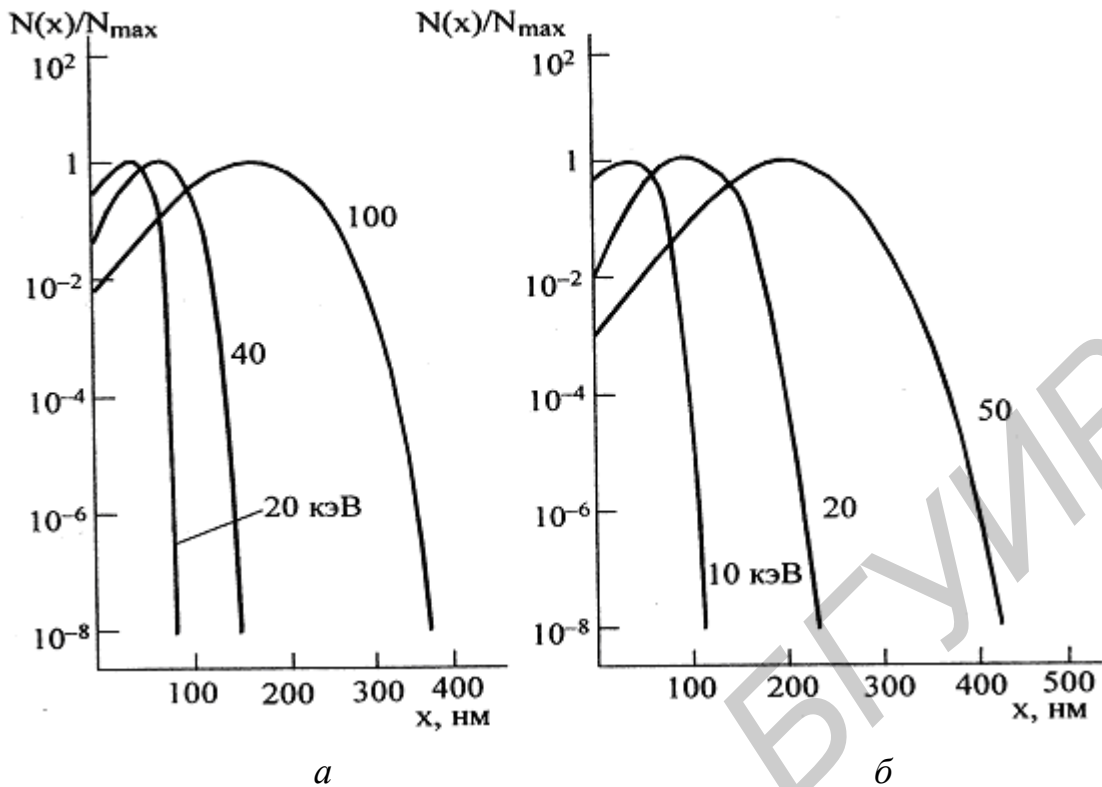


Рис. 2.7. Распределение фосфора (а) и бора (б) в кремнии при имплантации с различными энергиями

Распределение примеси в двухслойной мишени

В планарной технологии внедрение ионов проводится локально с использованием масок из различных материалов. На границе двух фаз из-за различий в тормозной способности кремния и диэлектрика концентрация примеси должна изменяться скачком (рис. 2.8).

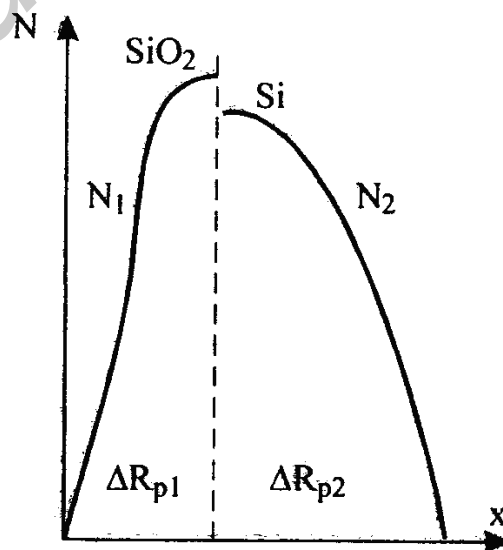


Рис. 2.8. Распределение примеси в двухслойной мишени

Отжиг легированных структур и радиационно-ускоренная диффузия

Целью отжига является восстановление кристаллической структуры легированных областей кремния и активация внедренной примеси.

Отжиг образцов способствует переходу внедренных ионов примеси в узлы решетки, где они проявляют свои донорные или акцепторные свойства. Для активации примеси достаточно отжечь кремний при температуре около 500°C примерно в течение часа. При температуре около 1000°C для полной активации примеси требуется отжиг около 30 мин.

Полный отжиг дефектов структуры зависит от выбора температуры и времени обработки, причем определяется длительностью процесса с наибольшей температурой.

Оборудование для ионного легирования

Установки ионного легирования содержат следующие основные части: ионный источник, анализатор ионов по массам, сканирующее устройство и коллектор ионов. На рис. 2.9. приведена схема установки для ионного легирования.

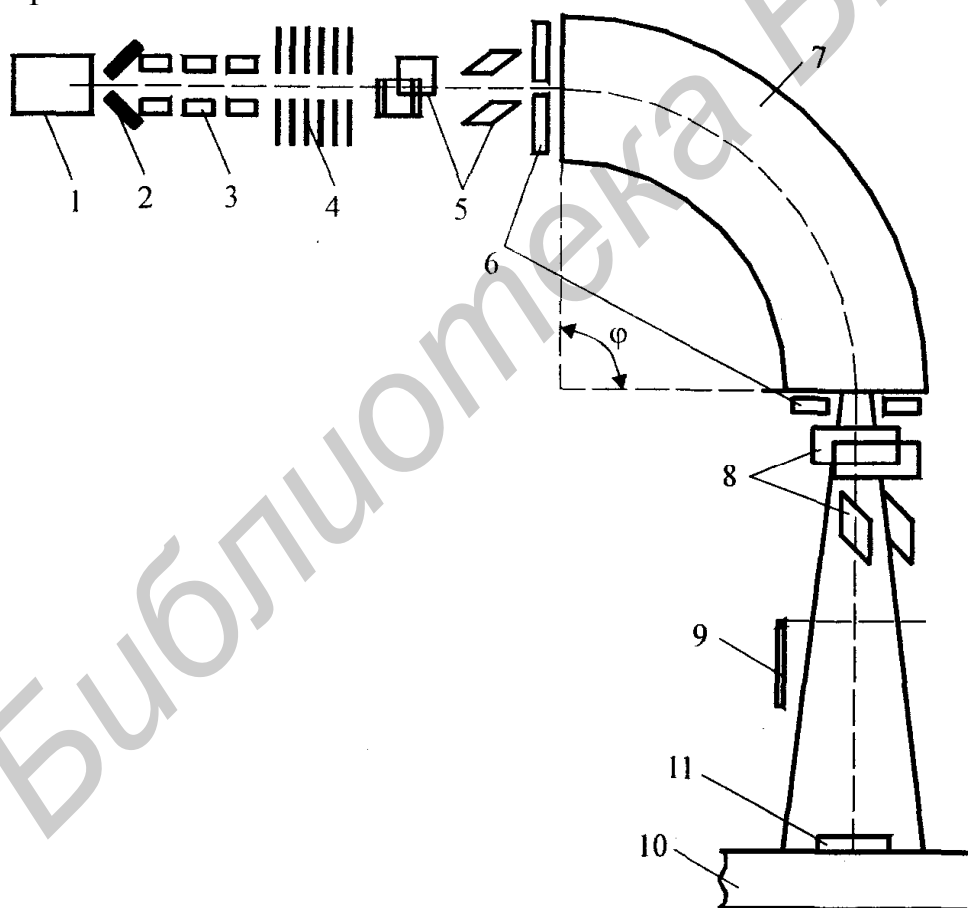


Рис. 2.9. Схема установки для ионного легирования: 1 – источник ионов; 2 – вытягивающий электрод; 3 – фокусирующие линзы; 4 – ускоритель; 5 – устройство коррекции пучка ионов; 6 – диафрагмы; 7 – масс-сепаратор; 8 – система отклонения (сканирования) пучка; 9 – заслонки; 10 – коллектор; 11 – облучаемые мишени

В ионном источнике ионизируются газообразные, жидкие или твердые исходные вещества и ускоряются в электрическом поле. Ускоренный ионный пучок для удаления многозарядных ионов и загрязняющих его ионов примесей поступает в систему, чувствительную к массе ионов (анализатор по массам). Система сканирования необходима не только для равномерной обработки пластины, но и для направления пучка в нужную ее часть. Дозу легирования определяют с помощью интегратора тока.

Ионные источники

Наиболее типичными источниками ионов являются источники с накаливаемым катодом; высокочастотный; источник с разрядом Пеннинга, дуоплазматрон и источник с электронной бомбардировкой. В зависимости от типа ионного источника имеет место различный разброс ионов по энергиям.

Источник с накаливаемым катодом – самый распространенный благодаря универсальности по отношению к сорту ионов, а также возможности получения интенсивных ионных пучков.

Для всех ионных источников (рис. 2.10) проблемой является осаждение проводящих пленок на изоляторах, а также коррозия и распыление катода.

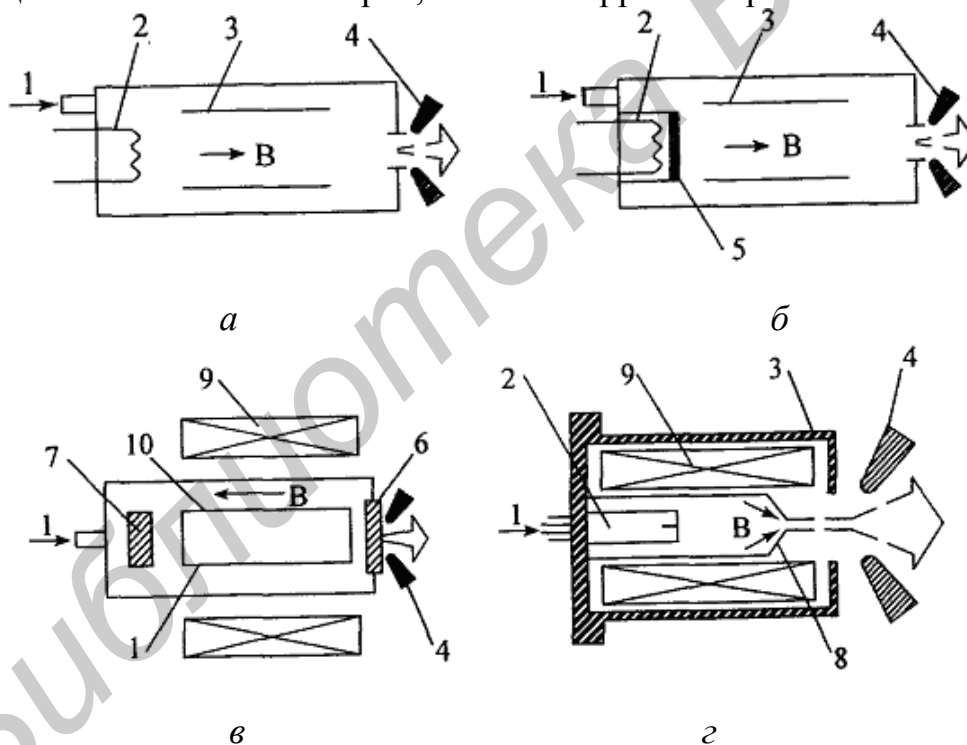


Рис. 2.10. Конструкции ионных источников различного типа:

с горячим катодом прямого (а) и косвенного (б) канала; с холодным катодом (в); дуоплазматрон (г). 1 – газ, 2 – катод, 3 – анод, 4 – экстрактор, 5 – косвенный катод, 6 – верхний катод, 7 – нижний катод, 8 – промежуточный электрод, 9 – электромагнит, 10 – плазма

Поскольку вакуумные системы всегда содержат определенное количество остаточных газов, то необходимо проводить разделение ионного пучка по массам.

Методические указания

Изучению теоретических аспектов ионного легирования уделить особое внимание. Необходимо понять механизмы перемещения примесных атомов по кристаллической решетке кремния.

Обратить внимание на эффект каналирования с точки зрения создания скрытых проводящих и изоляционных слоев.

Обратить внимание на проведение этапов технологических процессов ионного легирования.

При изучении контроля параметров легированных слоев обратить внимание на контроль толщины слоя методом косого и шарового слоя.

Контроль концентрации легирующей примеси в слое определяется измерением поверхностного сопротивления, поэтому на этот метод также обратить особое внимание.

Практическая часть

При выполнении практической части необходимо решить обратную инженерную задачу – рассчитать режим ионного легирования по заданным условиям (табл. 2.2). Подробная методика расчета приводится в [5].

Таблица 2.2

Номер варианта	Тип подложки	Примесь	Глубина имплантации	Поверхностное сопротивление, Ом/кв
1	КЭФ-4,5	В	0,1	38
2	КЭФ-4,5	В	0,11	39
3	КЭФ-10	В	0,12	40
4	КЭФ-10	В	0,13	41
5	КЭФ-20	В	0,14	42
6	КЭФ-20	В	0,15	43
7	КДБ-10	Р	0,1	44
8	КДБ-10	Р	0,12	45
9	КДБ-10	AS	0,11	38
10	КДБ-40	AS	0,13	40
11	КДБ-40	AS	0,14	41
12	КДБ-40	Р	0,15	38
13	КДБ-40	Р	0,1	39
14	КДБ-40	Р	0,11	40
15	КДБ-20	Р	0,15	42
16	КДБ-20	Р	0,14	38
17	КДБ-20	Р	0,12	40
18	КЭС-0,1	В	0,1	40
19	КЭС-0,1	В	0,11	41
20	КЭС-0,1	В	0,12	42

2.4. Технологический процесс микролитографии

Микролитография объединяет в себе такие области науки, как оптика, механика и фотохимия. Задача микролитографии заключается в том, чтобы обеспечить совмещение и воспроизвести в резисте двумерный рисунок фотошаблона с требуемой точностью. Используемые в литографии источники экспонирующего излучения бывают как точечными (лазеры), так и протяженными (ртутные лампы). Существует 3 типа фотолитографических устройств: теневого экспонирования (контактная печать), проекционные с преломляющей оптикой, проекционные с отражательной оптикой.

При теновом экспонировании шаблон находится в физическом контакте с подложкой или отдален от нее на несколько микрометров в случае печати с зазором. В проекционных системах используются линзы или зеркала, позволяющие проецировать рисунок фотошаблона на светочувствительный слой. В стандартной проекционной системе, осуществляющей перенос изображения, фокус объектива (f) является функцией диаметра его входного зрачка (D). Числовая апертура объектива (NA) в среде с показателем преломления n определяется как $NA = n \sin\theta = D/2f$; разрешение (W) объектива определяется для двух непрозрачных объектов, которые едва различимы в диске Эйри, согласно критерию Рэлея $W = K\lambda/NA$.

Основы оптики

Размер скрытого изображения и величина краевого градиента профилей резиста определяются следующими основными физическими свойствами света: когерентность; дифракция; интерференция; астигматизм; хроматические aberrации.

В случае когерентного излучения цуги световых волн распространяются так, что их гребни и впадины согласованы по фазе друг с другом. Если освещение изменяется от когерентного к частично когерентному, то контраст в передаваемом объективом изображении, эффективное разрешение и глубина фокуса изображения уменьшаются. Техническое определение разрешающей способности объектива исходит из возможности объектива разрешать последовательность одинаковых прозрачных и непрозрачных полос (дифракционную решетку).

Контактная печать и печать с зазором

В принципе сколь угодно высокое разрешение может быть получено при физическом контакте шаблона и подложки, а также методом прямого молекулярного осаждения. Однако на практике молекулярный контакт трудно осуществить, а шаблон после десятка проходов при совмещении и печати повреждается. Перемещения и шаблона, и пластины в процессе совмещения вызывают ошибки оператора и ограничивают точность совмещения.

При использовании соответствующего контактного шаблона или двухслойных резистов могут быть получены изображения размером вплоть до 0,1 мкм. При использовании дальнего УФ-излучения метод печати с зазором позволяет получать в позитивном фоторезисте рисунки с шириной линии 1 мкм. Контактная литография является устаревшим техпроцессом.

Проекционная печать

В сканирующих системах (сканерах) и устройствах пошагового совмещения (степперах) используется как отражательная, так и преломляющая оптика. При сканировании пластина экспонируется в результате последовательности проходов степпера. В современных степперах проводится совмещение по каждому полю и достигается согласование по двум координатам, углу поворота, фокусу и наклону.

Степперы обладают лучшей точностью совмещения, в них используются более дешевые шаблоны и существующие позитивные резисты, экспонируемые в спектральном диапазоне 365 – 435 нм. Однако производительность степперов ниже производительности оптических сканеров. Главное преимущество степпера 10:1 заключается в уменьшении влияния неточности фотошаблона до несущественных значений и в более высоком разрешении по сравнению с объективами с 5–кратным уменьшением.

В методе проекционной печати возможность контроля профиля и ширины воспроизводимых элементов рисунка фотошаблона определяется характеристиками проекционной оптики, контрастом резиста, коэффициентом отражения подложки и глубиной фокуса используемого объектива. При проекционной печати происходит накопление пыли на поверхности фотошаблона. Количество пропечатанных дефектов можно уменьшить с помощью применения пленочных покрытий (тонкая пленка полимера), которые дефокусируют изображение частиц пыли, оказывающихся в этом случае на некотором расстоянии от поверхности фотошаблона.

Совмещение

Существует два основных метода совмещения: отделенное от проекционного объектива (глобальное) и совмещение через проекционный объектив (локальное). Совмещение зависит от оптических свойств системы, плоскости поверхностей фотошаблона и подложки, а также вида меток совмещения и способов обработки сигнала рассовмещения.

Для распознавания и коррекции ошибок совмещения проводят измерения плоскостности пластин, ширины линий и совмещений.

Фотошаблоны

Оригинал фотошаблона изготавливается методом электроннолучевой литографии. Изготовление рабочих (1х) фотошаблонов осуществляется фотоповторением промежуточного (10х) фотошаблона на прецизионном координатном столе.

Перспективы развития фотолитографии

Никакие другие системы экспонирования не могут соперничать с оптическими системами в производительности и высокой стабильности шаблонов. Развитие техники экспонирования от контактной печати и печати с зазором к проекционной фотолитографии обусловлено необходимостью снижения износа шаблонов, ведущего к дефектности, и обеспечения требуемой точности совмещения. Внутренние и взаимные эффекты близости являются главными проблемами систем фотолитографии. Дифракционные и интерференционные эффекты искажают структуры, воспроизводимые поверх уже сформированного рельефа. Существует ряд приборов, которые могут быть изготовлены только с помощью УФ-литографии, поскольку применение высокоэнергетических электронных пучков или рентгеновских лучей может нанести этим приборам необратимые повреждения. Фотолитография как таковая остаётся незаменимой при массовом производстве ИС.

Электронно-лучевое экспонирование

При использовании некоторых видов излучения высокой энергии шаблоны могут не применяться, что ведет как к снятию ограничения по разрешению, так и к снижению производительности процесса экспонирования и росту производственных затрат (рис. 2.11).

Длина волны экспонирующего излучения высокой энергии измеряется сейчас не нанометрами, а ангстремами. Резистом может служить любой полимер либо неорганический пленкообразующий материал. Литография высоких энергий подразделяется на два вида: проекционную (рентгеновская, ионная, электронная) и сканирующую (электронная, ионная). Сравнение литографий приведено в табл. 2.3.

Шаблоны изготавливаются из тяжелых металлов на полупрозрачных органических или неорганических мембранах. Кроме того, сам шаблон может служить источником энергии, как, например, фотокатод из TiO_2 , который при возбуждении УФ-излучением испускает электроны с энергией 10 кэВ.

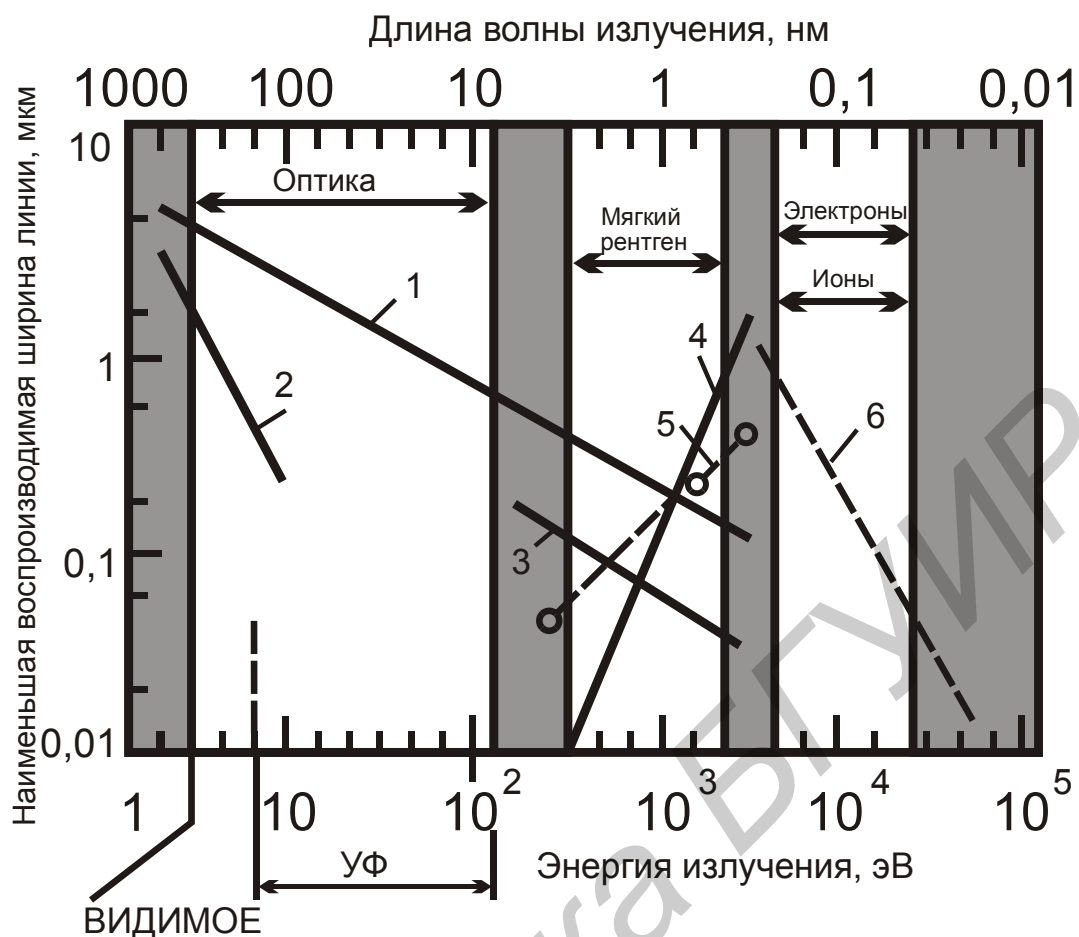


Рис. 2.11. Наименьшая воспроизводимая ширина линии:

I – дифракционный предел (зазор 10 мкм); II – дифракционный предел (NA объектива равна 0.4); III – дифракционный предел (зазор 1 мкм); IV и V – предел рассеяния фотоэлектронов, теоретические значения и данные эксперимента соответственно; VI – предел, определяемый обратным рассеянием электронов

Таблица 2.3

Фотолитография	Высокоэнергетичная литография
Хорошо изученные принципы	Гибкость настройки
Простые шаблоны	Нанометровое разрешение
Берет начало от фотографии	Автоматизированный контроль
Умеренная стоимость	Нанометровая точность совмещения
Стойкие резисты	Более широкий выбор резистов
Отсутствие радиационных повреждений	Незаменима при изготовлении фотошаблонов
Хорошая производительность	

С помощью ЭЛ-литографии создаются шаблоны для всех остальных видов литографии (с УФ, рентгеновским и ионным экспонированием. Минимальный размер элементов изображения зависит от формы сечения входного пучка, его энергии и от области простираения обратно рассеянного излучения.

Характеристики электронно-лучевых установок

Разрешение зависит, в частности, от распределения интенсивности на краю луча еще до того, как он поглотится в резисте. Используются два типа пучков: гауссов пучок круглого сечения и пучок с квадратным или прямоугольным сечением.

Разрешение r должно превышать толщину резиста t , а точность совмещения должна быть лучше $1/5$ разрешения. Для электронных пучков было достигнуто совмещение $\pm 0,1$ мкм. Близко расположенные элементы получают избыточную дозу из-за обратного рассеяния от соседних элементов (взаимный эффект близости), что вызывает сужение неэкспонированных участков.

Применение многослойных резистов – наиболее приемлемый способ ослабления эффектов близости и повышения разрешения.

Поглощение излучения высоких энергий

Поглощение излучения высоких энергий происходит в результате взаимодействия падающих лучей с электронами в атомах резиста или при столкновениях ядер в случае ионно-лучевого экспонирования. Высокоэнергетичные электроны и рентгеновское излучение теряют энергию за счет явления фотоэффекта путем возбуждения электронов в атомах вещества.

При поглощении электронных пучков потери энергии электронов на торможение в твердом теле описываются соотношением Бете, полученным в приближении непрерывных потерь:

$$-dE/dS = 7,9 \cdot 10^4 Z/E \cdot \ln(2E/j) \text{ [кэВ}\cdot\text{см]}, \quad (2.20)$$

где Z – средний атомный номер, j – средний потенциал ионизации и S – длина пробега электрона, которая для обратно рассеянных электронов с энергией > 1 кэВ может иметь величину порядка несколько микрометров.

Радиационные резисты

При взаимодействии резиста с экспонирующим оборудованием должны обеспечиваться:

- высокая чувствительность для приемлемой производительности;
- высокое разрешение для формирования субмикронных изображений.

Кроме выполнения этих первоочередных задач, резистная маска должна иметь хорошую стойкость на этапе переноса изображения.

Чтобы достичь нанометрового разрешения, для малых элементов изображения требуется большая доза, соответствующая паспортной чувствительности резиста, но экспонирование излучением высокой энергии требует более чувствительных резистов для достижения хотя бы минимально приемлемого выхода продукции. Из трех видов экспонирования (ЭЛ, рентгеновское и ионно-лучевое) ионный пучок имеет самую высокую эффективность, поскольку большая часть его энергии (90 %) может поглотиться

пленкой толщиной 1 мкм без искажений, обусловленных обратным рассеянием, которое свойственно ЭЛ-экспонированию. При электронном или рентгеновском экспонировании пленка поглощает только 1–10 % падающей дозы.

Оборудование для ЭЛ-экспонирования

Главные элементы экспонирующей ЭЛ-системы– источник электронов, системы фокусировки и бланкирования луча, устройство контроля совмещения и отклонения, вакуумная система, электромеханический стол и компьютерный интерфейс.

1. Блок бланкирования электростатического либо электронно-магнитного типа «выключает» электронный луч, отклоняя его за пределы отверстия коллимирующей диафрагмы.

2. Блок отклонения либо совмещается с оконечной линзой, либо помещается после нее.

3. Блок динамической фокусировки корректирует aberrации, вносимые отклонением луча от оптической оси системы.

4. Система детектирования электронов, сигнализирует об обнаружении меток совмещения и других деталей рельефа мишени.

5. Прецизионный рабочий стол с механическим приводом, обеспечивает обработку всей пластины.

6. Вакуумная система служит для обеспечения транспортировки луча.

Использование луча с сечением фиксированной либо переменной прямоугольной формы повышает производительность (рис. 2.12). Еще большая производительность может быть достигнута проецированием целых фигур в комбинированном растрово-векторном режиме (рис. 2.13).

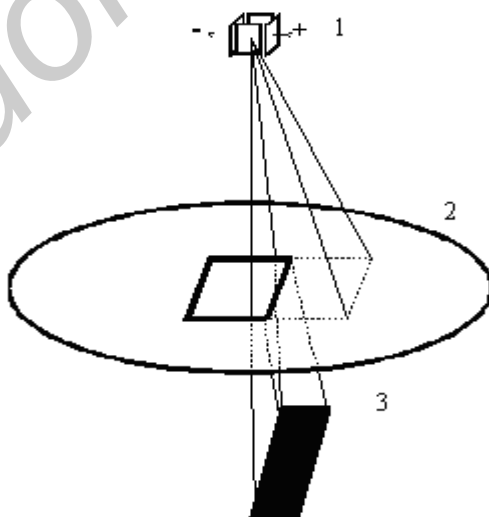


Рис. 2.12. Экспонирующая ЭЛ-система с прямоугольным лучом переменной формы: 1 – пластины, управляющие формой луча; 2 – вторая квадратная диафрагма; 3 – полученное пятно

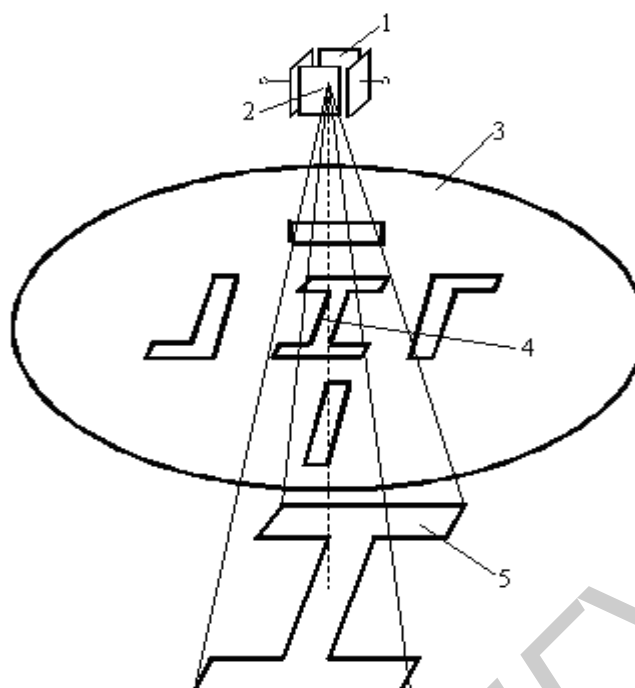


Рис. 2.13. Символьная проекционная ЭЛ-печать: 1 – отклоняющие пластины; 2 – фокус; 3 – символьные апертурные отверстия; 4 – символьная диафрагма; 5 – полученное изображение (сечение луча)

Чем больше одновременно проецируемая область, тем выше производительность. Время переноса изображения в системах с лучом переменной формы в 16 – 100 раз короче, чем в системах, использующих гауссов луч.

Производительность ЭЛ-установок складывается из производительности процессов экспонирования, совмещения, перемещения и подготовки топологической информации.

При использовании луча переменной формы основными проблемами являются формирование элементов прямоугольной формы и коррекция эффектов близости посредством разбиения фигур на области равной дозы. Резистный материал может взаимодействовать с компонентами ЭЛ-систем, порождая такие проблемы, как загрязнение, накопление заряда, плохое совмещение и низкий срок службы оборудования, приводящие к росту затрат времени на ремонт.

Совмещение

Общим для всех экспонирующих систем являются послойное совмещение и контроль ширины линии.

Метки для ЭЛ-совмещения обычно изготавливаются в виде канавок или выступов в кремнии, а для повышения уровня сигнала обратно рассеянных электронов – из металлов большой атомной массы. В качестве детекторов могут использоваться микроканальные умножители, сцинтилляторы или диффузионные диоды.

Эффекты близости

Эффекты близости – основная проблема ЭЛ-литографии. При энергии луча 25 кэВ и диаметре 1 мкм полуширина области обратного рассеивания электронов составляет 5 мкм, а при энергии 50 кэВ достигает 15 мкм. Длина пробега в обратном рассеянии пропорциональна $E^{1.7}$, где E – энергия электронов падающего луча. Эффекты близости приводят к нежелательному экспонированию областей, на которые луч непосредственно не направлялся.

В зависимости от отсутствия или наличия ближайших «соседей» наблюдается соответственно внутренний или взаимный эффект близости. Внутренний эффект близости, обусловленный обратным рассеянием электронов за пределы непосредственно экспонируемой области, приводит к тому, что уединенные мелкие элементы топологии приходится экспонировать с дозой Q , заметно большей Q_0 , необходимой для больших фигур. Для компенсации внутреннего эффекта близости должна быть задана избыточная доза и, следовательно, большее время экспонирования.

Другой вид эффекта близости – взаимный – заключается в экспонировании ближайшими соседями друг друга и пространства между ними. Неэкспонированные области между линиями засвечиваются обратно рассеянными электронами.

Радиационные повреждения приборов

Пучки электронов, рентгеновское излучение и ионы высокой энергии проникают в активные области кремниевых приборов на глубину 5 – 10 мкм.

Нарушение работы МОП-приборов обусловлено генерацией электронно-дырочных пар, поверхностных состояний на границе раздела Si–SiO₂ и дополнительными нейтральными ловушками в окисле.

Степень радиационных повреждений пропорциональна поглощенной дозе.

Другими проблемами ЭЛ-экспонирования (особенно с кварцевым шаблоном) являются нагрев резиста, вызывающий искажение изображения, газовыделение из резиста, загрязняющее катод из LaV₆, и появление пузырьков в резисте над метками совмещения, искажающими сигнал совмещения. Степень ЭЛ-нагрева кремниевых и стеклянных подложек зависит от мгновенной мощности пучка, теплопроводности резиста и подложки.

Рентгеновская литография

В рентгеновской литографии используется теневой шаблон. Недостатки такой схемы связаны с возникновением полутени, обусловленной размерами (неточностью) источника и зазором между шаблоном и пластиной; аналогичные эффекты наблюдаются при использовании диффузного оптического источника в фотолитографии.

Качественная печать обеспечивается при наличии четырех составляющих: высокоинтенсивного коллимированного источника; механического, электрического, оптического или ЭЛ-совмещения шаблона с заданной

точностью; прецизионного контроля зазора; недорогого мембранного либо трафаретного шаблона.

Субмикронная печать обеспечивается при зазоре шаблон – пластина порядка 1 мкм. При увеличении зазора между шаблоном и пластиной уход размера изображения на пластине и время экспонирования возрастают. Минимальный контраст между прозрачным и непрозрачным участками шаблона для экспонирования резиста составляет 4:1 (модуляция 60%). Вторичные электроны, испускаемые поглощающими элементами из золота, могут вызывать «размывание» края изображения. Для того чтобы рентгеновская литография стала технологичной, нужно решить ряд важных проблем. Для достижения хотя бы минимальной приемлемой производительности (2 – 5 пластин диаметром 125 мм в час) требуется резист с чувствительностью не хуже 1 мДж/см² для обычных (возбуждаемых электронным пучком) рентгеновских источников.

Ионная литография

Литографическое применение ионных пучков возможно: в установках пошаговой печати; в системах, использующих фокусированные пучки протонов, ионов Si⁺, В, Р.

Главным достоинством ионных пучков по сравнению с электронными является малое обратное рассеяние и, следовательно, минимальный эффект близости.

В ионно-лучевой литографии используются шаблоны типа металл–на кремнии или трафаретные. В случае применения последних произвольный рисунок можно воспроизвести, используя взаимодополняющие трафаретные шаблоны.

Для того чтобы ионная литография могла конкурировать с рентгеновской литографией, необходимо создать компактный источник ионов. Здесь пригодны схемы совмещения, разработанные для установок рентгеновской литографии. Из-за эффектов полутени и коробления пластины следует избегать экспонирования больших областей.

Фокусированные ионные пучки можно использовать для экспонирования резистов, исправления дефектов фотошаблонов, а также в безрезистной литографии и непосредственного травления оксида кремния.

Сущность ионной литографии состоит в экспонировании пластины широким пучком ионов Н⁺, He²⁺ или Ar⁺ через шаблон из золота на кремниевой мембране или поточечного экспонирования сканирующим пучком из жидкометаллического (Ga) источника. Зазор между шаблоном и пластиной составляет около 20 мкм, но для субмикронных процессов требуется контакт, так как изолированные элементы изображения не могут быть экспонированы через сквозной шаблон, а составные шаблоны разделяются на две взаимодополняющие части.

Ионно-лучевое экспонирование является идеальным в том смысле, что для него прямое и обратное рассеяния пренебрежимо малы, а радиационные

повреждения в кремниевой подложке практически отсутствуют, так как ионы в основном не проходят сквозь слой резиста. В настоящее время ионные пучки используются для ретуширования фотошаблонов.

Методические указания

Обратить особое внимание на проекционную фотолитографию.

Оценить рациональность применения металлизированного фотошаблона с точки зрения получения субмикронного разрешения.

Рассмотреть принципиальные отличия стандартной проекционной фотолитографии от проекционной фотолитографии на экстремальном ультрафиолете.

Обратить внимание на возможность появления радиационных дефектов при проведении экспонирования высокоэнергетическими лучами.

Практическая часть

При выполнении практической части необходимо оценить применимость различных типов литографий для формирования базового элемента сенсора температуры (табл. 2.4). Подробная методика расчета приводится в [5].

Таблица 2.4

Номер варианта	R, Ом	Rs, Ом/кв	Резист	Тип литографии
1	1000	1000	РН-7	Контактная
2	10000	2000	ПММА	Эл. луч.
3	100000	3000	ПММА	Рентген.
4	1000	4000	ПММА	Ионная
5	10000	5000	SU-8	EUVL
6	100000	1000	РН-7	Проекционная
7	1000	2000	ПММА	Эл. луч
8	10000	3000	ПММА	Рентген.
9	100000	4000	ПММА	Ионная
10	1000	5000	SU-8	EUVL
11	10000	1000	РН-7	Оптическая
12	100000	2000	ПММА	Эл. луч.
13	1000	3000	ПММА	Рентген.
14	10000	4000	SU-8	EUVL
15	100000	5000	РН-7	Проекционная
16	1000	1000	РН-7	На микрозав.
17	10000	2000	ПММА	Эл. луч.
18	100000	3000	ПММА	Рентген.
19	1000	4000	SU-8	EUVL
20	10000	5000	ПММА	Ионная

2.5. Технологический процесс металлизации

Для осуществления коммутации в ИС можно использовать следующие материалы: Au, Ni, Pb, Ag, Cr, Al, а также системы Ti - Au, Mo - Au, Ti - Pt - Au и т.д. К системам металлизации ИС предъявляются следующие требования:

- высокая проводимость ($\rho < 10^{-6}$ Ом·см);
- хорошая адгезия как к Si, так и к SiO₂;
- способность к образованию качественного омического контакта с кремнием *n*- и *p*-типов проводимости;
- отсутствие вредных интерметаллических соединений или протекания реакций, разрушающих кремний в процессе обработки и эксплуатации;
- технологичность методов осаждения и нанесения рисунков;
- устойчивость к электродиффузии в металле;
- металлургическая совместимость со сплавами, которые применяются для присоединения внешних проводов к металлизированной схеме.

Наиболее удобным, простым в изготовлении и дешевым материалом для металлизации ИМС является алюминий. Пленки, нанесенные на аморфную поверхность термически окисленных пластин кремния – SiO₂, являются поликристаллическими с некоторой тенденцией к определенной ориентации кристаллитов. После напыления пленки имеют зеркально-гладкую поверхность. Удельное сопротивление напыленной пленки алюминия толщиной 1 мкм составляет около $3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, т. е. всего на 10 – 20 % больше, чем объемное удельное сопротивление чистого алюминия. Широкое использование пленок алюминия для металлизации в интегральных схемах обусловлено следующими факторами: высокой электропроводностью, близкой к электропроводности объемного алюминия; легкостью испарения в вакууме и чистотой испаряемой пленки. Алюминий имеет относительно низкую температуру испарения, и поэтому вероятность загрязнения напыленной пленки примесями из вакуумной камеры и испарителя должна быть небольшой, по сравнению с металлами, имеющими более высокую температуру испарения. Хорошая адгезия к кремнию и окислам, в сравнении с золотом и молибденом, дает возможность изготовления однослойной металлизации, что значительно упрощает технологию производства и уменьшает стоимость ИМС. Алюминий образует низкоомный контакт с кремнием *n*- и *p*-типа проводимости. Контактные площадки на пластине кремния всегда покрыты слоем естественного окисла SiO₂. Алюминий вступает в реакцию с SiO₂, поскольку способен к образованию окислов с большой отрицательной свободной энергией. В результате между кремнием и алюминием создается низкоомный контакт. Скорости химической

реакции диоксид кремния – алюминий и диффузии кремния в алюминий очень высоки, так что для получения низкоомного контакта достаточно прогреть образец при температуре 550 °С в течение нескольких минут.

Алюминий пластичен и стоек к циклическим изменениям температуры. Низкая температура подложки при его напылении (120 – 160 °С) и отжиге (~200 °С) позволяет получить пленки с низкими механическими напряжениями вследствие малой разницы ТКЛР при уменьшении температуры до комнатной. Алюминий устойчив к окисляющему воздействию атмосферы; легко обрабатывается методами фотолитографии для получения необходимой конфигурации контактов и межсоединений в ИМС. Возможна обработка травителями, которые не действуют на кремний или SiO₂.

Алюминий образует прочные контакты при креплении золотой или алюминиевой проволоки методами термокомпрессии. Алюминий можно использовать в схемах, устойчивых к воздействию радиации.

Однако наряду с положительными свойствами алюминий имеет ряд недостатков, которые ограничивают использование его для металлизации.

К ним относятся:

- мягкость и, следовательно, легкость повреждения слоя алюминия;
- появление пустот в пленке вследствие электродиффузии при меньших, чем для других металлов, плотностях тока;
- возможность короткого замыкания через диэлектрическую пленку в системах с несколькими уровнями металлизации из-за образования выступов при электродиффузии или низкотемпературной рекристаллизации пленок;
- возникновение коррозии вследствие гальванического эффекта при одновременном использовании других металлов;
- взаимодействие с SiO₂ при низких температурах (начиная от комнатной и выше), что может приводить к нестабильности, особенно в МДП интегральных схемах;
- способность образовывать хрупкие соединения с золотом, что может снижать электропроводность и приводить к отказам в случае термокомпрессионного крепления выводов.

Защита алюминиевой пленки от механических повреждений практически осуществляется нанесением поверх металла диэлектрического слоя. Такое покрытие служит одновременно для предохранения близко расположенных токонесущих полосок от электролитической или химической коррозии и от закорачивания проводящих полосок.

При травлении окон в диэлектрике (обычно SiO₂) скорость травления диэлектрика должна быть значительно большей, чем скорость травления

алюминия, иначе повреждается алюминиевая пленка вследствие существования в ИС локальных положительных потенциалов. Для систем, содержащих слои золота, эта проблема не возникает. В случае подсоединения золотых проволочек к пленке алюминия методом термокомпрессионной сварки возможно образование интерметаллических соединений, что приводит к уменьшению надежности аппаратуры. Однако при относительно низких температурах и умеренных нагрузках такой метод соединения оказывается вполне надежным. Проблему образования интерметаллических соединений на границе золото – алюминий полностью решает использование ультразвуковой сварки золотых проводников с пленкой алюминия. Для исключения взаимодействия золотой проволоки с алюминием при одновременном сохранении преимуществ контакта алюминия с кремнием часто между золотом и алюминием наносят дополнительную металлическую пленку, например молибденовую или танталовую.

Алюминий подвержен электродиффузии. Электродиффузия – это явление переноса вещества в металлах при высоких плотностях тока. В пленках алюминия, применяющихся для металлизации ИМС, электродиффузия приводит к разрыву алюминиевого проводника вследствие образования пустот (пор) из-за скопления вакансий в алюминии.

В сплошном металлическом проводнике на термически возбужденный ион металла в узле решетки действуют две силы: одна направлена навстречу электронному потоку при приложении к проводнику электрического поля, другая действует по направлению электронного потока и появляется за счет обмена импульсами между электронами проводимости и возбужденными ионами металла при столкновениях («электронный ветер»).

Вследствие экранирующего влияния электронов сила, с которой электрическое поле действует на ион, весьма невелика, поэтому преобладающей является сила «электронного ветра». В результате этого возбужденные ионы металла, приходящие в вакансию в направлении потока электрона, имеют более высокую вероятность заполнения вакансии, чем окружающие ее близлежащие ионы. Следовательно, ионы металла перемещаются к положительно заряженному концу проводника, а вакансии – к отрицательному. Вакансии скапливаются на отрицательном полюсе (коагулируют) в виде пустот, тогда как ионы на положительных концах образуют кристаллы, усы и холмики. Большое количество пустот приводит к разрыву электрической цепи в пленках алюминия. Поверхностные царапины на металлических проводниках ведут себя как вакансии, причем наблюдается их

движение по поверхности проводника в направлении отрицательно заряженного конца.

В мелкозернистых пленках алюминия, полученных осаждением в вакууме на холодные подложки, преобладают диффузия по границам зерен и поверхностная диффузия. Вследствие этого энергия активации в таких пленках низка и составляет 0,48 эВ (энергия активации при самодиффузии в объемном алюминии равна 1,4 эВ). В хорошо упорядоченных крупнозернистых пленках, осажденных на горячие подложки, энергия активации определяется в основном поверхностной диффузией и составляет 0,84 эВ. Это связано с уменьшением границ зерен и соответственно с высоким коэффициентом самодиффузии. Если крупнозернистую пленку покрыть слоем кварцевого стекла, то поверхностная диффузия уменьшается, а энергия активации увеличивается до 1,2 эВ, т.е. приближается к значению для объемного алюминия. При температуре 275 °С и выше объемная диффузия преобладает над диффузией по границам зерен и поверхностной диффузией, поэтому влияние структуры несущественно. При температуре ниже 275 °С долговечность ИМС можно повысить на несколько порядков путем применения хорошо упорядоченных крупнозернистых пленок, особенно если они покрыты пленкой стекла.

Общие требования к тонким токопроводящим пленкам – равномерность толщины пленки, однородность ее структуры, надежное сцепление с подложкой (адгезия) и другими материалами, с которыми она контактирует.

Основными методами осаждения тонких пленок являются: вакуумное испарение (напыление) с косвенным подогревом; ионно-плазменное распыление; осаждение из газовой фазы с помощью газотранспортных реакций; восстановление в атмосфере водорода и термохимическое разложение. Выбор того или иного метода зависит от природы осаждаемого материала, материала подложки, структуры (аморфная, поликристаллическая, монокристаллическая) и толщины пленки.

Наиболее распространенным методом является вакуумное испарение. Оно дает возможность получать пленки, удовлетворяющие многим требованиям. Преимущества этого метода: удовлетворительная воспроизводимость свойств пленок за счет высокой чистоты при осаждении; хорошая адгезия к подложке, особенно при нагревании подложек; возможность контроля толщины пленок с точностью до нескольких мономолекулярных слоев в процессе осаждения. Этот метод позволяет наносить пленки различного назначения в одной установке, в едином технологическом цикле. К недостаткам вакуумного метода следует отнести проблему отвода тепла, необходимость

охлаждения аппаратуры, сложность очистки подложек перед напылением для хорошего сцепления с ними пленок.

Пленки тугоплавких металлов (Ta, W, Mo и др.) осаждаются ионно-плазменным (катодным) распылением. В атмосфере активного газа (O_2 , N_2 и др.) возможно изготовление диэлектрических пленок (окислы, нитриды металлов) путем распыления соответствующего металла, однако в этом случае трудно предотвратить поглощение остаточных газов пленкой в процессе ее формирования из-за относительно высокого давления газа ($10^{-2} - 10^{-1}$ мм рт.ст.).

Осаждение из газовой фазы позволяет получать высококачественные пленки, однако этот метод предполагает наличие сильных агрессивных сред, которые могут вступать во взаимодействие с кремнием или диэлектрическими пленками на его поверхности. Вследствие этого осаждение металлов из газовой фазы применяется редко.

В настоящее время наиболее широкое распространение при нанесении металлических пленок получил метод ионно-плазменного распыления с помощью магнетронных распылительных систем. В методе магнетронного распыления используются скрещенные магнитное и электрическое поля, повышающие эффективность ионизации рабочего газа и, следовательно, плотность плазмы.

Магнетрон представляет собой двухэлектродную систему, в которой распыляемый материал является катодом. Использование магнетронного распыления позволяет проводить нанесение металла с высокой скоростью. При этом напряжение магнетронных источников обычно ниже, чем электронно-лучевых устройств, следовательно, они генерируют меньшее проникающее излучение. Скорость осаждения может регулироваться расстоянием между источником и подложкой и достигать 1 мкм/мин при осаждении алюминия или его сплавов. Хотя магнетронные системы распыления металлов значительно сложнее в изготовлении и эксплуатации, чем вакуумно-термические, в условиях современного производства они являются наиболее совершенными, обеспечивая необходимые качества и производительность при нанесении металлических тонких пленок.

При использовании многослойной разводки в интегральных схемах нельзя применять в качестве проводящего слоя только алюминий, так как за счет взаимодействия с диэлектрическими слоями, между которыми он наносится, проводимость пленки будет со временем уменьшаться, могут появиться отдельные непроводящие участки или разрывы в металлизации. Вследствие этого при многослойной разводке используется многослойная металлизация. В качестве первого слоя, как указывалось ранее, могут быть

выбраны платина, титан, молибден и их силициды. Задача этого слоя – обеспечить омический контакт к Si, хорошую адгезию к кремнию и окислу. Второй проводящий слой создается напылением золота, алюминия или серебра. Для изоляции от нанесенных поверх металла диэлектрических слоев наносится третий слой – изолирующий. В качестве металла третьего слоя могут использоваться платина, хром, титан, тантал, молибден или ванадий.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

3.1. Химическое травление кремния

1. Нарисуйте структуру поверхности кремния после механической обработки.
2. Назовите основные группы технологических загрязнений поверхности подложки и пути их удаления.
3. Обоснуйте последовательность применения технологических растворов для очистки кремниевых пластин.
4. Напишите состав кислотного травителя типа CP и обоснуйте его компоненты.
5. Напишите основные реакции травления кремния в кислотном травителе.
6. Напишите основные травления кремния в щелочном травителе.
7. Назовите травители, используемые для выявления структурных дефектов кремниевых пластин.

Технологический процесс высокотемпературной диффузии.

1. Поясните основные физические закономерности высокотемпературной диффузии в твердом теле.
2. Объясните основные механизмы диффузии в твердом теле.
3. Нарисуйте и поясните профиль зависимости концентрации примеси по глубине при различных температурах разгонки.
4. Поясните сущность высокотемпературной диффузии из твердого планарного источника.
5. Назовите основные технологические ограничения применения высокотемпературной диффузии в технологии ИС.
6. Дайте сравнительную характеристику жидких, твердых и газообразных источников легирования.

3.2. Технологический процесс ионного легирования

1. Нарисуйте структурную схему установки ионного легирования.
2. Поясните принцип работы масс-сапаратора.
3. Поясните физику процесса, лежащего в основе эффекта каналирования.

4. Нарисуйте концентрационные зависимости от глубины для высокотемпературной диффузии и ионного легирования, объясните причины их различия.

5. Нарисуйте основные источники ионов, дайте их сравнительные характеристики.

6. Поясните физику процесса экстракции ионов из источника.

7. Объясните причины образования дефектов твердого тела при ионном легировании.

8. Поясните термин «аморфизация структуры» при ионном легировании.

9. Обоснуйте причины необходимости отжига после ионного легирования.

10. Какие технологические слои, не доступные высокотемпературной диффузии, можно создать ионным легированием?

3.3. Технологический процесс микролитографии

1. Чем ограничивается размер скрытого изображения и величина краевого градиента резистных профилей?

2. От чего зависит время экспонирования фоторезиста?

3. Назовите главный недостаток контактной фотолитографии.

4. В каких случаях используется фотолитография на микрозазоре?

5. В чем преимущества и ограничения проекционной фотолитографии?

6. Объясните принцип работы степпера и сканера в проекционной литографии.

7. Назовите основные элементы установки электронно-лучевой литографии.

8. Назовите основные оптические эффекты, ограничивающие минимальный топологический размер рисунка.

9. Поясните принцип работы установки литографии на экстремальном ультрафиолете.

10. Нарисуйте структуру металлизированного фотошаблона.

11. Объясните принцип работы отражательного шаблона литографии на экстремальном ультрафиолете.

12. Укажите основные преимущества рентгеновской литографии и факторы, сдерживающие ее широкое использование в нанотехнологии.

13. В чем сущность и достоинства импринт-литографии?

ЛИТЕРАТУРА

1. Готра, Ю. З. Технология микроэлектронных устройств: справочник. – М. : Радио и связь, 1991.
2. Моро, У. Микролитография / У. Моро. – М. : Мир, 1990.
3. Родионов, Ю. А. Литография в производстве интегральных микросхем / Ю. А. Родионов. – Минск : Дизайн ПРО, 2004.
4. Кисель, А. М. Химическая обработка в технологии ИМС / А. М. Кисель, Ю. А. Родионов. – ПГУ, 2001.
5. Родионов, Ю. А. Базовые техпроцессы ИС и МЭМС : учеб.-метод. комплекс / Ю. А. Родионов [Электронный ресурс]. – Минск : БГУИР, 2007.
6. Bhushan, V. Handbook of nanotechnology / V. Bhushan, – Berlin : Springer-Verlag, 2004.
7. Campbell, S. A. The science and engineering of microelectronics fabrication/ S. A. Campbell. – New York : Oxford university press, 2001.

Учебное издание

Котов Дмитрий Анатольевич
Родионов Юрий Анатольевич

**БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *Т. П. Андрейченко*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная верстка *В. М. Задоля*

Подписано в печать 07.02.2011. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 100 экз. Заказ 84.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6