

Модуль №3

Процессы получения контактов и р-п переходов

3.1. Получение электронно-дырочных структур.

3.1.1. Метод диффузии

Диффузия примесей является в производстве одним из наиболее распространенных способов легирования полупроводника при создании электронно-дырочных структур, изоляции и пассивных элементов ИМС. Основные преимущества метода - простота аппаратуры, управляемость процесса, возможность прогнозирования диффузионных профилей на основе простых математических моделей.

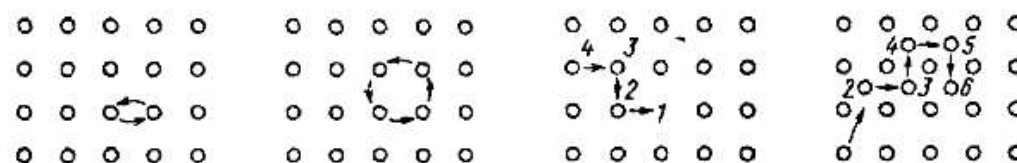
Необходимость применения высоких температур является ограничением метода, так как повышает вероятность загрязнения полупроводника побочными примесями, стимулирует образование точечных дефектов (вакансий, атомов в междоузлиях и др.).

Механизмы диффузии в полупроводниках

Перенос вещества, обусловленный хаотическим тепловым движением атомов, в направлении уменьшения их концентрации называется *диффузией*. Диффузия в кристалле, находящемся в состоянии химического равновесия (однородный химический состав, однородное распределение дефектов), называется *самодиффузией*. Диффузия атомов, в кристалле при наличии градиента химического потенциала (градиента концентрации вещества) носит название *гетеродиффузии, химической диффузии* или просто *диффузии*.

Диффузия атомов в кристаллической решетке осуществляется отдельными скачками из одного положения равновесия в другое. Длина таких элементарных перемещений имеет порядок **постоянной решетки**, т. е. несколько десятых долей нанометра. Возможны три механизма атомных скачков: **взаимный**

обмен местами, движение по вакансиям и перемещение по междоузлиям (рисунок).



Вакансионный механизм диффузии - заключается в миграции атомов по кристаллической решётке при помощи вакансий. В любом кристалле существуют вакансии — места в решетке без атомов (их иногда называют атомами пустоты). Атомы вокруг вакансии колеблются и, получив определенную энергию, один из этих атомов может перескочить на место вакансии и занять её место в решетке, в свою очередь оставив за собой вакансию. Так происходит перемещение по решетке атомов и вакансий, а значит и массоперенос. *Энергия, необходимая для перемещения вакансии или атома по решетке, называется энергией активации.*

Межузельный механизм диффузии - заключается в переносе вещества межузельными атомами. Диффузия по такому механизму происходит интенсивно, если в кристалле по каким-то причинам присутствует большое количество межузельных атомов и они легко перемещаются по решетке. Такой механизм диффузии предполагается, например, для азота в алмазе.

Прямой обмен атомов местами - заключается в том, что два соседних атома одним прыжком обмениваются местами в решетке кристалла.

Механизм Френкеля

Модели механизмов диффузии атомов по вакансиям и междоузлиям были впервые предложены Я. И. Френкелем в 1926 г. Атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, находятся в непрерывном тепловом движении около центра равновесия. Часть из них приобретает энергии достаточную для преодоления потенциального барьера, удерживающего их в положении равновесия. Такие атомы переходят из положения равновесия в узле решетки в неравновесное положение в междоузлии.

$$N_v = e^{-\Delta E_v / (kT)}$$

где ΔE_v - энергия, затрачиваемая на образование вакансии; k - постоянная Больцмана; T температура кристалла.

Скорость перемещения атомов, выраженная как вероятность их перехода из одного равновесного положения в другое вследствие статистического характера процесса, возрастает с повышением температуры по экспоненциальному закону

$$w = w_0 e^{-\Delta E / (kT)} .$$

Оценка величины коэффициента диффузии.

Обозначим расстояние между атомами простейшей кубической решетки через “ a ” (параметр решетки). Рассмотрим перенос дефектов вида i (вакансий или примесных атомов внедрения или замещения) между параллельными плоскостями в кристалле. Если концентрацию дефектов i в единице объема обозначить n_i , то в объеме слева от условной плоскости будет содержаться

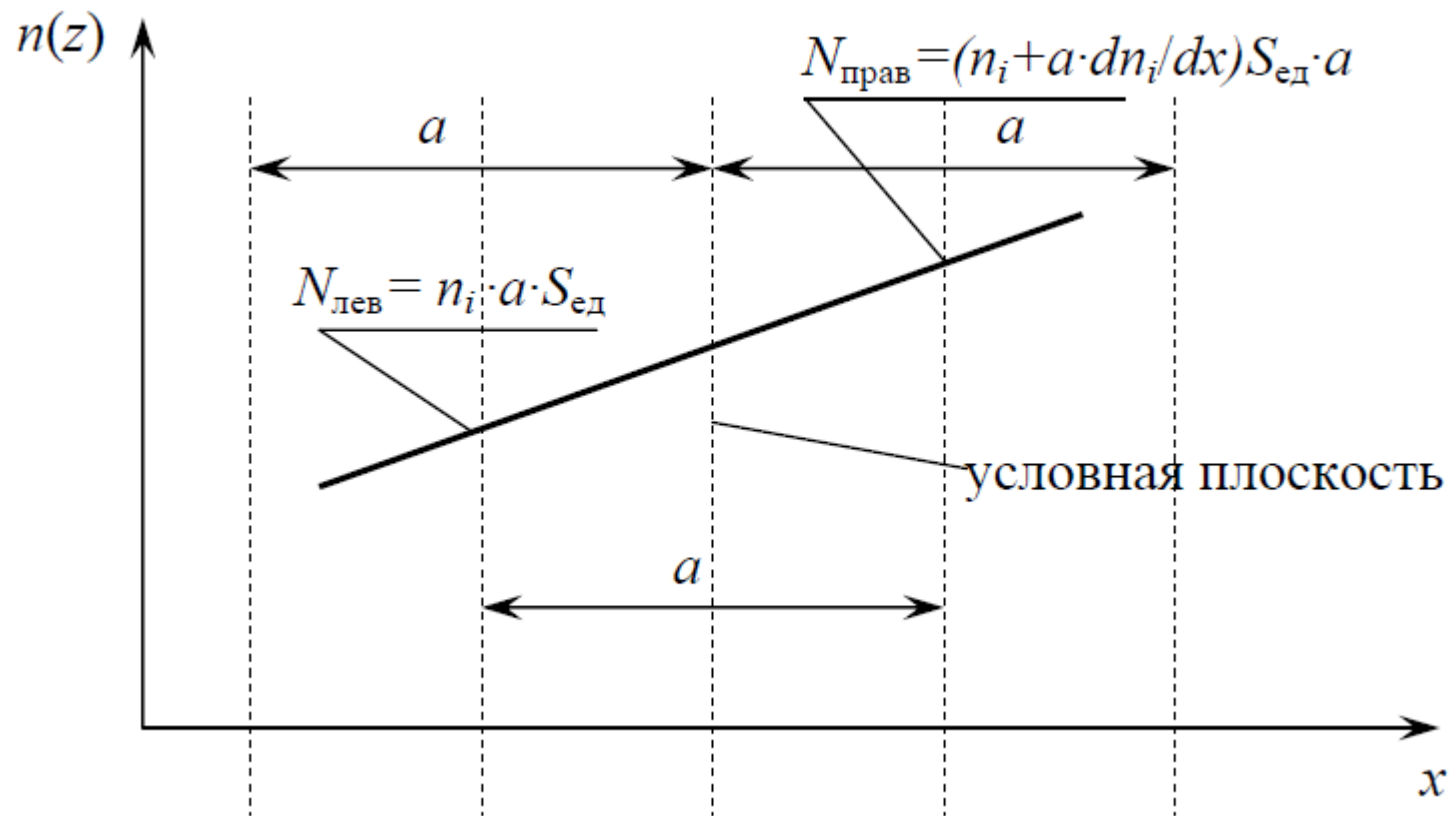
$$N_{лев} = n_i \cdot V_{лев} = n_i \cdot a \cdot S_{ед}.$$

Справа, в аналогичном объеме содержится дефектов больше

$$N_{прав} = \left(n_i + a \frac{dn_i}{dx} \right) \cdot a \cdot S_{ед}.$$

Если бы они все (дефекты) менялись местами, то результирующий поток через единичную площадку был бы

$$N_{\text{прав}} - N_{\text{лев}} = a^2 \cdot S_{\text{ед}} \cdot \frac{dn_i}{dx} = a^2 \cdot \frac{dn_i}{dx} \cdot 1$$



Распределение концентрации дефектов вида i
 (вакансий примесных атомов внедрения или замещения)
 в кристаллической решетке

Но обмениваются местами лишь те атомы (дефекты), которые будут обладать энергией больше энергии потенциального барьера

$$W_i \approx \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right).$$

Кроме того, ввиду равной вероятности перескока в любом из шести направлений для примитивной кубической решетки вероятность перескока в рассматриваемом направлении (одном из 6 равновероятных) будет пропорциональна частоте их колебаний в решетке ν

$$W(x) \cong \frac{\nu}{6} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right).$$

Тогда плотность потока частиц определяется выражением

$$j_D = \frac{\nu}{6} a^2 \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \cdot \frac{dn_i}{dx}$$

Но из термодинамики и теории тепло- и массообмена известно феноменологическое выражение закона Фика для процессов диффузии

$$j_D = D_i \cdot \text{grad}n_i = D_i \frac{dn_i}{dx}.$$

Окончательно получим

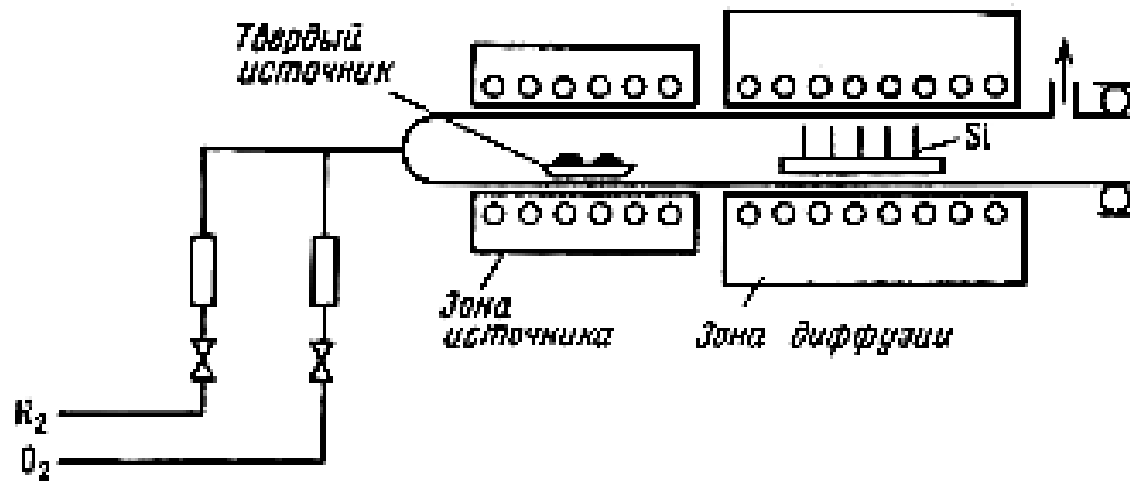
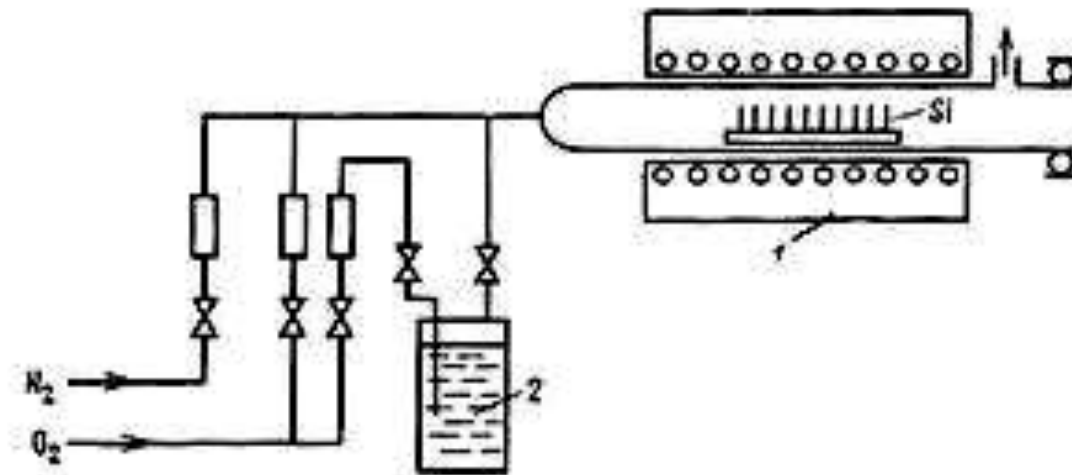
$$D_i = \frac{v}{6} a^2 \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_i}{RT}\right),$$

где E_i – энергия активации отдельного атома в узле решетки, Q_i - энергия активации моля.

3.1.2. Технологические приемы получения диффузионных структур

Диффузию проводят в сравнительно ограниченном диапазоне температур. Для кремния, например, этот диапазон 1100-1300°C. Ниже 1000°C значения коэффициентов диффузии очень малы и глубина диффузии незначительна. Выше 1300°C качество диффузионных слоев неудовлетворительно вследствие нарушения поверхности пластин под действием температуры. Если в изолированный объем поместить пластину полупроводника и примесный элемент и нагреть их до некоторой температуры, то вследствие сублимации или испарения примесного элемента в объеме вскоре установится определенное парциальное давление его паров. Молекулы пара адсорбируются всеми поверхностями, в том числе и поверхностью пластины, и при достаточно большой температуре диффундируют вглубь. В общем случае равновесная концентрация пропорциональна давлению пара, поэтому управление поверхностной концентрацией примеси осуществляют путем контроля давления.

Схемы диффузионного легирования



3.1.3. Метод ионной имплантации

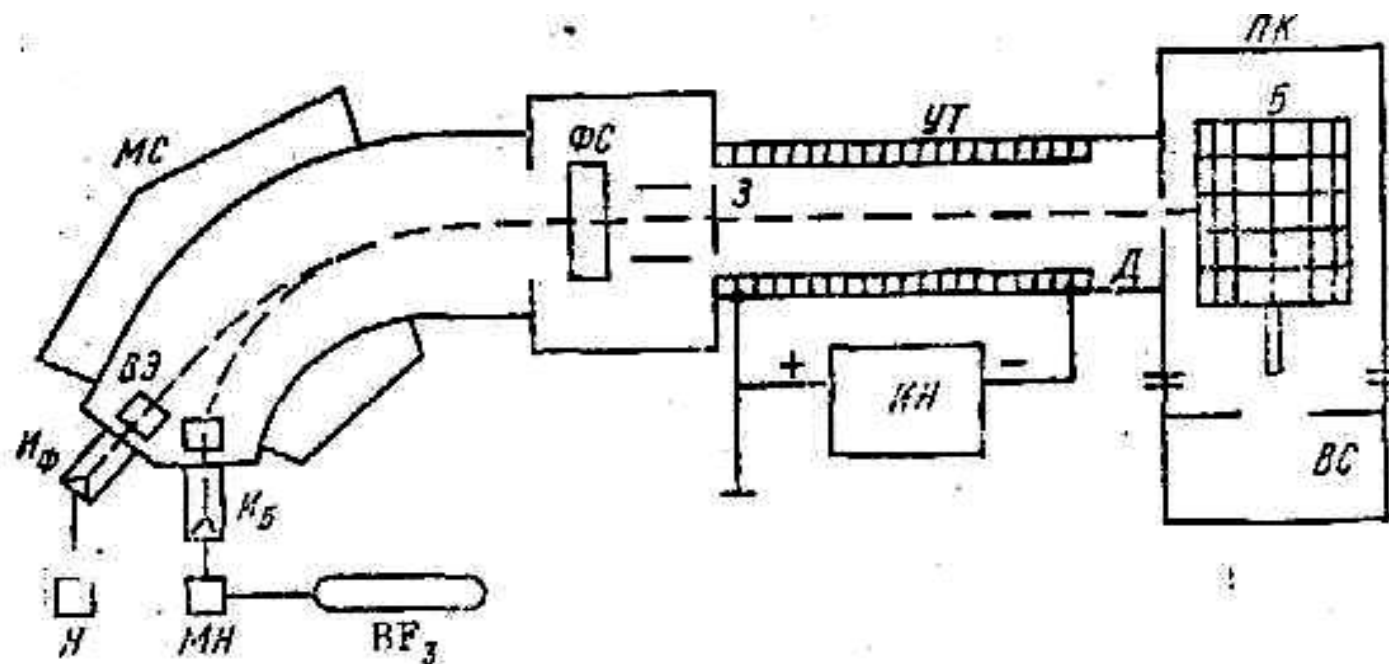
Метод *ионной имплантации* состоит в бомбардировке пучками ускоренных ионов с энергиями от 10 кэВ до 1 МэВ твердых тел с целью изменения их свойств и структуры.

Основные явления:

Ускоренные ионы проникают в кристаллическую решетку, преодолевая отталкивающее противодействие положительных зарядов ядер атомов. *Глубина проникновения ионов возрастает с увеличением их энергии. Легкие ионы проникают более глубоко, чем тяжелые, однако траектории движения тяжелых ионов более прямолинейны.* При точной ориентации направления падения пучка ионов вдоль одной из кристаллографических осей пластины полупроводника - (110) или (111) - часть ионов движется вдоль атомных рядов, между которыми имеются достаточно широкие каналы, свободные от атомов. Это явление называют *каналированием*. Попав в канал, ионы испытывают менее сильное торможение и проникают в несколько раз глубже, чем в случае неориентированного внедрения. *Если энергия, переданная атому решетки, превышает энергию связи атомов в твердом теле,*

*то атом покидает узел. В результате образуется пара Френкеля - дефект, состоящий из вакансии и междоузельного атома. Атомы, находящиеся в поверхностном слое, получив энергию от иона, могут отрываться от кристалла - происходит процесс распыления и образуется дефект по Шоттки - вакансия в приповерхностной области кристалла. Энергия первично смещенного атома, называемого *атомом отдачи*, сравнительно велика, поэтому на пути своего движения атом отдачи образует целый каскад смещений, вследствие чего в кристалле возникают отдельные разупорядоченные зоны размером 3-10 нм. По мере имплантации ионов идет накопление *радиационных дефектов*. Когда плотность ионов, внедренных на единице поверхности, превосходит критическую, называемую *дозой аморфизации*, образуется сплошной аморфный слой. Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях, где они не являются электрически активными. Для перевода их в узлы и восстановления кристаллической структуры полупроводника производят *отжиг*. 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.*

3.1.4. Принцип действия и конструкция ионно-лучевого ускорителя



Ионно-лучевой ускоритель состоит из следующих основных блоков: источника ионов, источника высокого напряжения, ускорительной трубки, магнитного сепаратора, системы фокусировки и сканирования пучка ионов, приемной камеры и вакуумной системы откачки.

Положительные ионы вытягиваются из разрядной камеры небольшим ускоряющим напряжением первой ступени - до 20 кВ, подаваемым на вытягивающий электрод ВЭ. Формирование ионного пучка производят с помощью магнитного сепаратора МС и системы фокусировки и сканирования ФС. Магнитный сепаратор предназначен для разделения пучка ионов в соответствии с их зарядом и массой, так как под действием силы Лоренца в области магнитного поля сепаратора ионы движутся по круговым траекториям, радиусы которых зависят от их массы M_1 ускоряющего напряжения U и магнитной индукции B :

$$r = \sqrt{\frac{2V_1U}{qB^2}}.$$

Приемная камера ПК служит для загрузки обрабатываемых полупроводниковых пластин, которые размещаются на кассете барабанного типа Б в несколько рядов. Вакуумная система ВС обеспечивает разрежение $2 \cdot 10^{-3}$ Па. При облучении ионный пучок сканирует вдоль оси вращающейся кассеты Б, что обеспечивает высокую однородность легирования. Перед кассетой стоит прямоугольная диафрагма Д, которая задает высоту и ширину облучаемой области. Время облучения t (с) для набора дозы Q (Кл/м²) при плотности ионного тока j (А/м²) определяется соотношением

$$t = \frac{2\pi Q}{\alpha j}$$

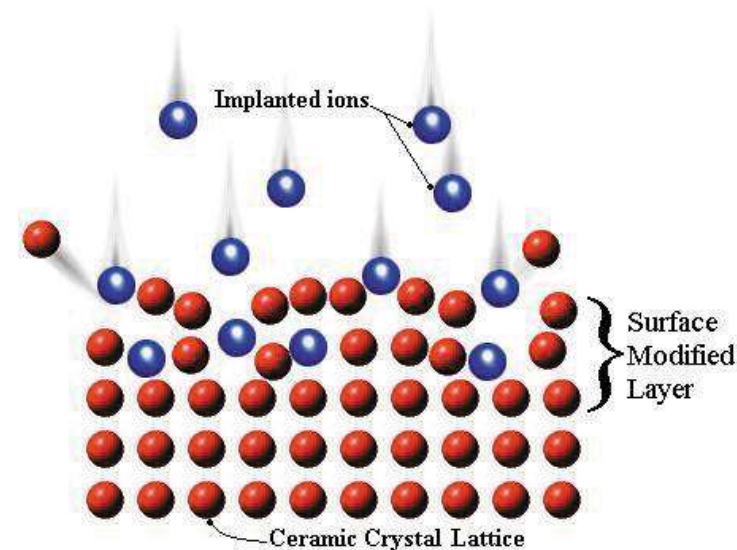
где α - выраженный в радианах угол, определяемый сектором окружности барабана, на который попадает ионный пучок, проходящий через диафрагму заданной ширины.

Основные преимущества метода ионной имплантации, на которых базируется его использование в серийном производстве, состоят в **точном контроле полного количества внедренной примеси и высокой однородности легирования по поверхности пластины.**

3.1.5. Отжиг ионно-имплантированных слоев

В технологической практике получили применение две группы процессов ионной имплантации: *имплантация как стадия загонки примеси для последующей диффузионной разгонки* с целью реализации необходимой структуры и имплантация для *непосредственного создания структуры без диффузионного перемещения* внедренного примесного распределения. Во втором случае после имплантации производят отжиг, задача которого - устранить радиационные нарушения и обеспечить электрическую активацию внедренных атомов.

Большая часть радиационных дефектов кристаллической решетки, возникающих в кремнии при имплантации, отжигается при $T < 600^\circ\text{C}$. Можно выделить **два режима отжига**, при каждом из которых исчезает половина имеющихся нарушений. Если дозы облучения были малы и отдельные кластеры нарушений не перекрываются, то восстановление кристаллической



структуры кремния происходит при $T \leq 260^\circ\text{C}$. В случае больших доз облучения образуется сплошной аморфный слой, для рекристаллизации которого необходимы температуры $T \geq 570^\circ\text{C}$. Отжиг при первом режиме сопровождается освобождением вакансий из кластеров с образованием новых дефектов (ассоциаций вакансий, комплексов вакансия-примесь) и их распадом. Отжиг при втором режиме - *эпитаксиальная рекристаллизация аморфизированного слоя*, причем роль затравки играет лежащая под ним монокристаллическая пластина. Граница между понятиями «отжиг» и «диффузия» для ионно-имплантированных слоев кремния лежит вблизи 1000°C . При $T < 1000^\circ\text{C}$ диффузионными процессами можно пренебречь.

Диффузия примеси из ионно-имплантированного слоя. ИИ используется для предварительной загонки строго фиксированного количества примеси. Диффузия служит для последующей разгонки внедренной примеси с целью обеспечения нужного профиля распределения атомов с требуемой глубиной залегания p-n-перехода и концентрацией носителей заряда. Наибольший эффект дает применение ионной имплантации при создании слаболегированных областей: баз транзисторов, элементов резисторов и др.

3.2. Получение омических контактов.

Под омическим контактом понимают контакт металл - полупроводник, обладающий линейной вольт - амперной характеристикой, в котором не происходит инжекции неосновных носителей. Омическими контактами обеспечивается каждый полупроводниковый прибор или ИМС для осуществления электрической связи между их элементами и внешней цепью.

В планарных приборах изготавливают как обычные контакты, так и контакты, распространяющиеся на поверхность диэлектрического слоя.

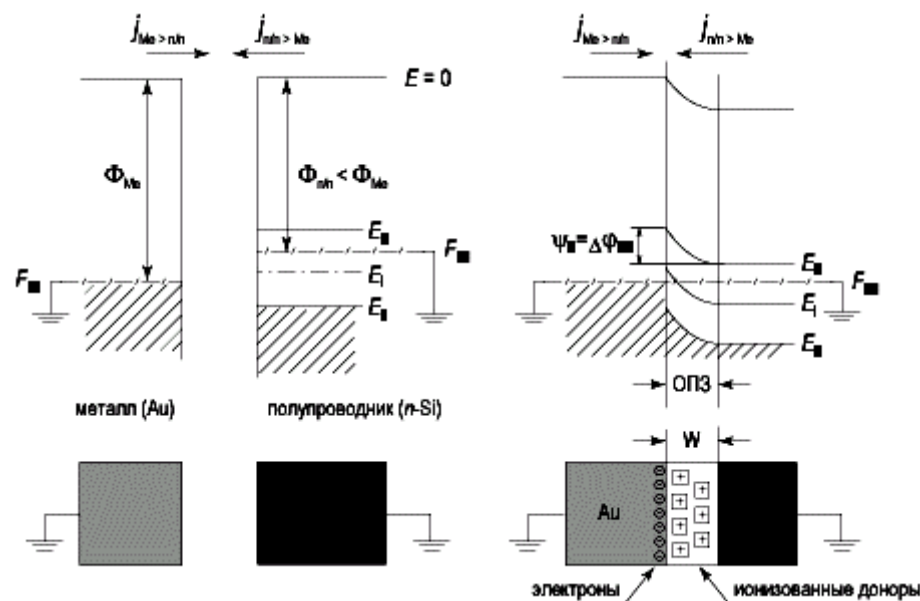
Основные требования:

- должен быть невыпрямляющим (т. е. его сопротивление не должно изменяться при изменении направления электрического тока);
- иметь линейную вольт-амперную характеристику - (т. е. его сопротивление не должно зависеть от протекающего тока);
- обладать очень малым сопротивлением в направлении, как перпендикулярном, так и параллельном плоскости p-n-перехода, высокой теплопроводностью и хорошей адгезией к полупроводнику (а распространенный - и к оксиду);
- не инжектировать неосновных носителей заряда;

- иметь температурный коэффициент расширения, по возможности близкий ТКЛ полупроводника и материала вывода;
- представлять стабильную металлургическую систему с полупроводником и материалом вывода (если контакт является многослойным, то это требование распространяется и на материалы, из которых изготовлены слои контакта);
- не проникать глубоко в полупроводник (так как в ряде полупроводниковых приборов р-n-переход формируется на глубине 0,2-0,4 мкм);
- его материал должен позволять проводить фотолитографическую обработку и при изготовлении СВЧ-приборов обеспечивать фотолитографическое разрешение 500 (и более) линий на миллиметр.

3.2.1. Контактные материалы и виды контактных систем

Возникающий электрический барьер при плотном контакте металла с полупроводником определяется разностью работ выхода электрона из металла ϕ_M и полупроводника ϕ_P . В соответствии с моделью Шоттки контакт металла с полупроводником будет омическим, если выполняется условие $\phi_M < \phi_P$ (для полупроводников n -типа) и $\phi_M > \phi_P$ (для полупроводников p -типа).



В реальных условиях из-за *влияния энергетических состояний на границе раздела металл - полупроводник* омические контакты в большинстве случаев не удастся получить соответствующим подбором этих величин.

Качество контакта улучшается при создании **сильно легированной приконтактной** области в полупроводнике. Вследствие того, что эта область легирована сильно, обедненный слой вблизи барьера достаточно тонок, барьер становится как бы прозрачным и для пропускания тока через контакт необходимо очень малое падение напряжения (явление туннелирования). При этом понижается сопротивление контакта и ослабляются его инжекционные свойства (высокий уровень легирования при контактной области полупроводника приводит к снижению времени жизни неосновных носителей заряда, что значительно ослабляет влияние инжекции).

Большая часть тока I_n через контакт обусловлена движением электронов, инжекционная составляющая I_p - дырок. Отношение этих составляющих тока имеет вид

$$I_p / I_n \approx e^{(\varphi_\delta - \varphi)/kT}.$$

Лучше других металлов требованиям, предъявляемым к контактному материалу, удовлетворяет **алюминий и золото**. Имеют высокую проводимость, пластичность, обладают хорошей адгезией к кремнию, легко приваривать выводы методом термокомпрессии. При получении контактного слоя используют также **титан, хром, ванадий, молибден, вольфрам**.

Металл	Φ_m , эВ	Полупроводник	E_g , эВ	χ_s , эВ	D_s , эВ ⁻¹ см ⁻²
Ag	4.42	ZnO	3.46		—
Al	4.18	ZnS	3.6		—
Au	5.1–5.2	ZnSe	2.7	4.09	—
Co	4.97	CdS	2.43	4.77	$1.6 \cdot 10^{13}$
Cr	4.4–4.6	AlN	6.2	0.6	—
Cu	4.59	GaN (вюрцит)	3.39	4.1	$(1-2) \cdot 10^{11}$ (для SiO ₂ -GaN)
Fe	4.46	InN	0.7	—	—
In	3.97	GaAs	1.425	4.07	$12.5 \cdot 10^{13}$
Mg	3.61	InAs	0.354	4.9	—
Mo	4.21	GaP	2.26	3.8	$2.7 \cdot 10^{13}$
Ni	5.15–5.2	InP	1.344	4.38	—
Pb	4.04	GaSb	0.726	4.06	—
Pd	5.17	InSb	0.17	4.59	—
Pt	5.43–5.65	C	5.46–5.6	—	—
Sb	4.56	Si	1.12	4.05	$2.7 \cdot 10^{13}$
Sn	4.43	Ge	0.661	4.0	—
Ta	4.2	4H-SiC	3.23	4.05	$\sim 10^{13}$
Ti	3.83–4.33	6H-SiC	3.0	4.07	$\sim 10^{13}$

3.2.2. Методы формирования омических контактов

Омические контакты обычно изготавливают *сплавлением, электрохимическим или химическим осаждением, вакуумным испарением, методом термокомпрессии или с помощью ультразвука.*

Сплавление. Тонкий слой металла, металлическую навеску или шарик, нанесенные на поверхность кристаллической пластины, нагревают до температуры, при которой они плавятся. При этом происходит растворение в них небольшого количества полупроводника. При охлаждении системы полупроводник с растворенными в нем атомами металла и легирующими примесями кристаллизуется. В результате этого формируется сильно легированный слой полупроводника того же типа электропроводности и создается структура типа Me - n⁺ - n или Me - p⁺ - p.

Электрохимическое (химическое осаждение). Создание омических контактов происходит за счет осаждения на катоде металла при пропускании между электродами тока, вызывающего восстановление соли в электролитической ванне. Осаждение применяют главным образом для нанесения никелевых и золотых контактов. При получении контакта в процессе химического осаждения восстановление металла из соли на поверхности полупроводника осуществляют с помощью восстанавливающего реагента, содержащегося в растворе. Химическое осаждение никеля происходит из фосфатного электролита, что способствует значительному уменьшению контактного сопротивления на кремнии n-типа. Осаждение золота производят обычно электрохимическими методами из щелочных электролитов на основе хлорного золота или дицианоаурата калия $\text{KAu}(\text{CN})_2$.

Контакт золото – кремний (фотоприемник).

