

Физические основы полупроводниковых приборов

1.1. Электропроводимость полупроводников

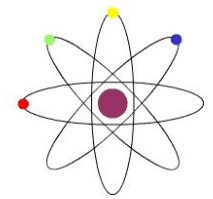




Дисциплина:
Электротехника и электроника

Лектор: Погодин Дмитрий Вадимович
Кандидат технических наук,
доцент кафедры РИИТ
(кафедра Радиоэлектроники и информационно-
измерительной техники)

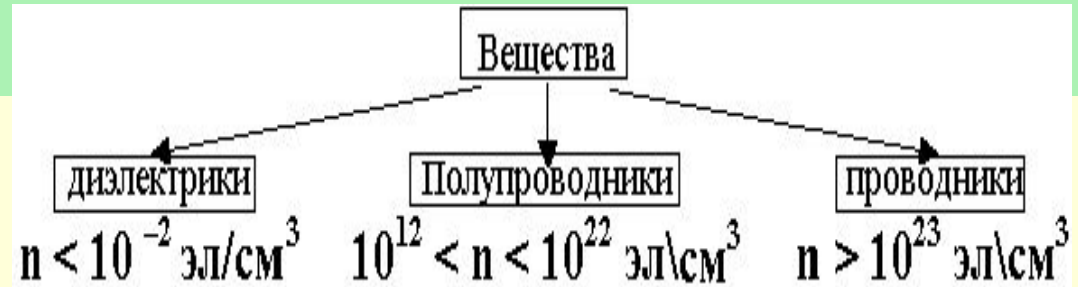
Глава 1. Раздел 1. Полупроводниковые приборы (ПП)



1.1. Электропроводимость полупроводников

- *Электропроводность* – это свойство веществ проводить электрический ток.
- *Электрический ток* – это направленное движение свободных носителей заряда.
- Количественно электропроводность характеризуется:
 1. удельным **электрическим** сопротивлением ρ (**Ом·см**);
 2. электрической удельной проводимостью $\sigma = 1/\rho$;
 3. концентрацией свободных носителей заряда в веществе n (**эл/см³**).

В зависимости от способности проводить электрический ток, все вещества делятся на три группы: проводники (металлы), полупроводники и диэлектрики.

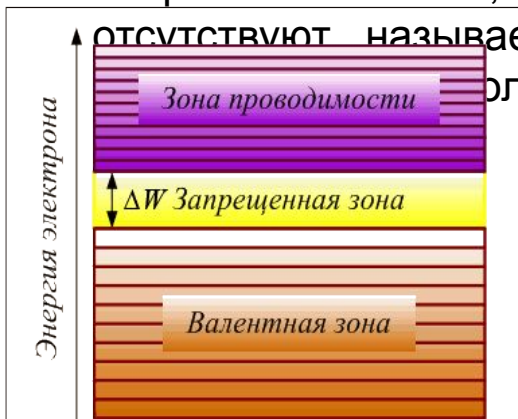


- Важнейшим признаком полупроводников является сильная зависимость их электр. сопротивления, от температуры, степени освещенности, уровня ионизирующего излучения, количества примесей....
- В настоящее время для изготовления полупроводниковых приборов в основном используются следующие полупроводники:
 - **четырехвалентные** - германий (Ge), кремний (Si) и арсенид галлия (AsGa);
 - трехвалентные** - алюминий (Al), индий (In), бор (B);
 - пятивалентные** – фосфор (P), сурьма (Sb), мышьяк (As).
- Валентность вещества, определяет число электронов на внешней оболочке атома.
- Все полупроводники можно разбить на две группы:
 - **чистые, собственные, беспримесные или ПП i-типа** –они состоят из атомов одного сорта;
 - **примесные или легированные** – в них часть атомов собственного ПП заменяется на атомы ПП другого сорта. Процесс введения примесей в полупроводник называется

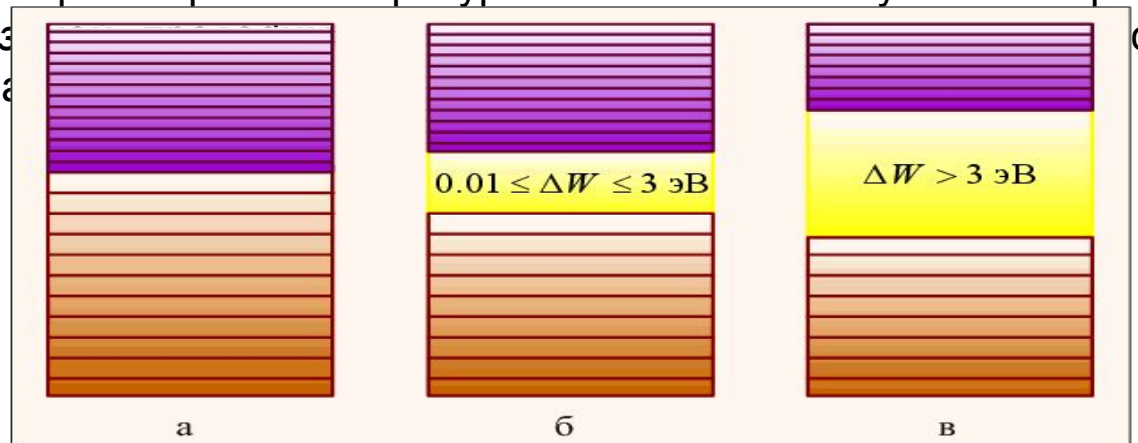


Энергетические уровни и зоны

- Электропроводность веществ удобно объяснять зонной теорией.
- В соответствии с квантовой теорией энергия электрона, вращающегося по своей орбите вокруг ядра, не может принимать произвольных значений.
- Согласно *принципу Паули* на одном энергетическом уровне не может находиться более двух электронов, причем спины этих электронов должны быть противоположны.
- В результате этого в твердых телах происходит расщепление энергетических уровней электронов, на большое количество почти сливающихся подуровней (рис. 1.3), образующих *энергетические зоны*. Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля все энергетические зоны заняты электронами, называется *валентной*.
- Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля электроны

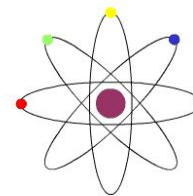


Расщепление энергетических уровней электронов в твердых телах



Зонные энергетические диаграммы различных твердых веществ:
а – проводник; б – полупроводник; в – диэлектрик

1.1.2. Собственные полупроводники



Атомы собственного полупроводника располагаются в пространстве в строго определённом порядке, образуя **кристаллическую решётку**. Она возникает за счёт обобществления валентных электронов соседними атомами и называется **ковалентной**.

Плоская модель кристаллической решётки собственного четырехвалентного полупроводника приведена на рис.2.1.

В собственных полупроводниках при $T=0^0\text{K}$ свободных носителей заряда нет. Все электроны участвуют в образовании ковалентной связи, и полупроводник является диэлектриком.

С повышением температуры электроны приобретают дополнительную энергию, и некоторые из них покидают ковалентные связи, становясь свободными. При этом образуется два свободных носителя заряда: **электрон и дырка (вакансия)**. Дырку можно рассматривать, как свободный положительный носитель заряда.

Процесс образования свободного электрона и дырки называется **генерацией** электронно-дырочной пары.

Свободные электроны, двигаясь по объёму полупроводника, теряют часть своей энергии и могут занимать место дырки. Этот процесс взаимного исчезновения электрона и дырки называется **рекомбинацией**. В результате рекомбинации электрон и дырка перестают существовать.

В чистом беспримесном полупроводнике (их называют полупроводниками i -типа) всегда выполняется условие $n_i = p_i$ причем

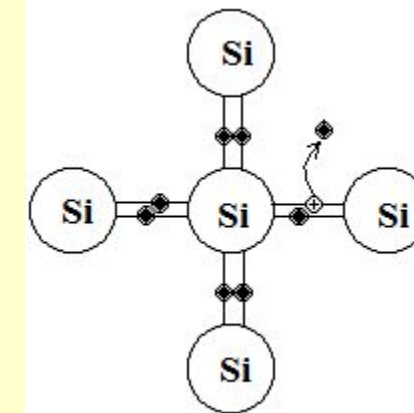
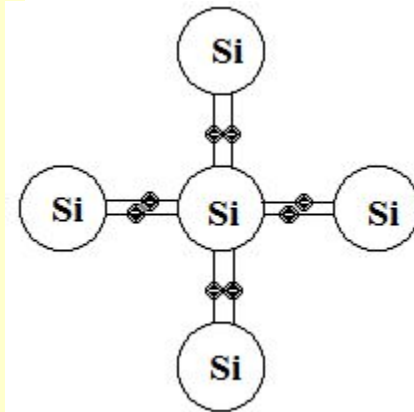
$$n_i^2 = AT^3 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

где: n_i и p_i – соответственно концентрация электронов и дырок в полупроводнике;

A - постоянный коэффициент; T - температура по шкале Кельвина;

ΔE - ширина запрещённой зоны (это энергия, которую должен приобрести электрон, чтобы разорвать ковалентную связь и стать свободным, она зависит от материала полупроводника). Она составляет 0,803 эВ для Ge, для Si - 1,12эВ, а для GaAs - 1,43эВ; k – постоянная Больцмана.

Чистые полупроводники при создании полупроводниковых приборов практически не используются, так как их электропроводность зависят только от температуры и других внешних факторов.



1.1.3. Примесные полупроводники

- Для создания пп приборов обычно используют примесные полупроводники.
- В зависимости от валентности введенной примеси различают двух типов примесных полупроводников: *p* и *n*- типа.

• **Полупроводники n-типа.** Их получают путём введения в собственный, обычно 4-х валентный полупроводник, атомов 5-и валентной примеси. Каждый атом примеси создает свободный электрон и неподвижный положительно заряженный ион атома донорной примеси. Примесь, создающая свободные электроны, называется **донорной**. В целом, такой полупроводник остается электрически нейтральным.

- Плоская модель кристаллической решётки полупроводника с донорной примесью (рис.).

В полупроводнике *n*-типа основными свободными носителями заряда (их больше, чем дырок) являются электроны с концентрацией n_n : N_D - концентрация атомов донорной примеси; n_i - концентрация электронов в собственном полупроводнике, они возникают за счет термогенерации; n_n - концентрация электронов в полупроводнике *n*-типа,

Дырки в полупроводнике *n*-типа называют неосновными носителями (их много меньше)

$$p_n = p_i$$

- Полупроводники *n*-типа в которых основными носителями являются электроны называют электронными. Для них справедливо соотношение: $n_n p_n = n_i p_i = n_i^2$.

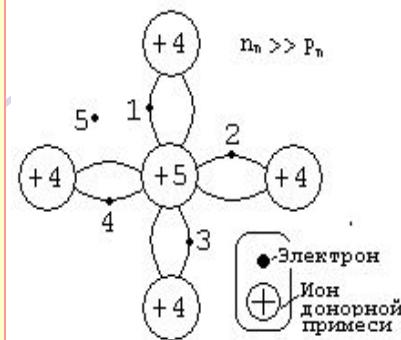
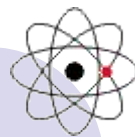
• **Полупроводники p-типа.** Их получают путем введения в собственный 4-х валентный атомов 3-х валентные примеси. Каждый атом примеси отбирает (присваивает) электрон близлежащего атома собственного полупроводника, в результате чего в полупроводнике образуется свободная дырка, и неподвижный отрицательно заряженный ион атома акцепторной примеси. Примесь создающая свободные дырки называется **акцепторной**.

- Плоская модель кристаллической решётки полупроводника с акцепторной примесью (рис.).

• Дырки являются основными свободными носителями заряда, их концентрация в основном равна концентрации ионов акцепторной примеси $p_p = N_A + p_i \approx N_A \gg p_i$, где: p_p - концентрация дырок в полупроводнике *p*-типа N_A - концентрация атом акцепторной примеси, p_i - концентрация дырок в собственном полупроводнике.

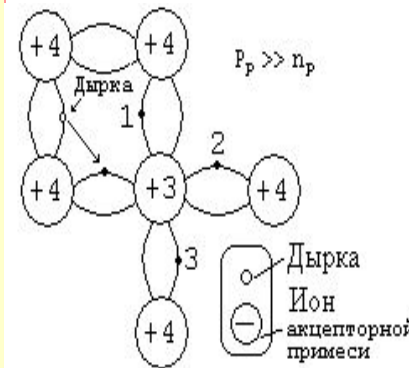
- Электроны являются неосновными носителями заряда, их концентрация n_p мала они возникают в результате термогенерации собственного полупроводника, т.е. $n_p = n_i$.

- Полупроводники *n*-типа в которых основными носителями являются электроны называют электронными. Для них справедливо соотношение: $n_p p_p = n_i p_i = n_i^2$.



$$n_n = N_D + n_i \approx N_D \gg n_i$$

$$p_n = p_i$$



$$p_p = N_A + p_i \approx N_A \gg p_i$$

$$n_p = n_i$$

1.1.4. Токи в полупроводнике. Дрейф и диффузия



В полупроводнике возможны два механизма движения зарядов (создания тока): *дрейф и диффузия*.

1. Дрейф- это движение носителей заряда под влиянием электрического поля.

Если между двумя точками есть разность потенциалов ϕ , то градиент потенциала $E = d\phi/dx$ называется напряженностью поля.

Электроны движутся от меньшего потенциала к большему, а дырки навстречу.

Плотность полного дрейфового тока состоит из электронной и дырочной составляющих:

$$I_{др} = I_{n,др} + I_{p,др}, \quad I_{n,др} = q_e V_n, \quad q_e = -ne, \quad V_n = -\mu_n E, \dots I_{p,др} = q_p V_p$$

где: $I_{др}$ - плотность полного дрейфового тока; $I_{n,др}$ и $I_{p,др}$ - электронная и дырочная составляющая; $-V_n$, V_p - средняя скорость электронов и дырок; q_e , q_p - заряд электронов и дырок в единице объема полупроводника; n , p - концентрация электронов и дырок в полупроводнике; e и $-e$ - заряд дырки и электрона; μ_n , μ_p - подвижности электронов и дырок ($\mu = V/E$); E - напряжённость электрического поля. Отсюда:

$$I_{др} = ne\mu_n E + pe\mu_p E = E(n_i e\mu_n + p e\mu_p) = \sigma E$$

где σ - удельная электропроводность полупроводника.

2. Диффузия - это движение носителей под действием градиента концентрации. Диффузия всегда происходит из области с большей концентрации в область с меньшей концентрации.

Плотность тока диффузии дырок и электронов пропорциональна градиенту концентрации т.е. :

$$I_{диф} = I_{n,диф} + I_{p,диф}, \quad I_{n,диф} = -eD_n \left(-\frac{\Delta n}{\Delta x} \right) = eD_n \frac{dn}{dx}, \quad (2.13)$$

где q - заряд электрона, D_p и D_n - коэффициенты диффузии электронов и дырок.

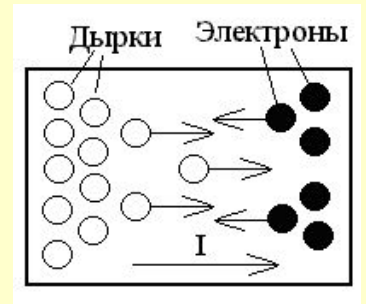
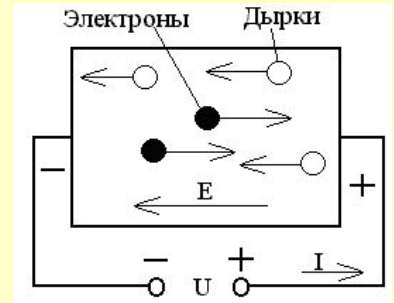
Подвижности и коэффициенты диффузии связаны

соотношением Эйнштейна: $D_p = \phi_T \mu_p$, $D_n = \phi_T \mu_n$, где ϕ_T - температурный потенциал.

Если электроны и дырки движутся в одну сторону, то это токи встречные, поэтому и появляется знак минус в одной из формул (2.13).

В общем случае могут присутствовать все четыре составляющих, тогда плотность полного тока равна векторной сумме:

$$I_{n \cdot др} + I_{p \cdot др} + I_{n \cdot диф} + I_{p \cdot диф} = 0 \quad (2.16)$$



Основные параметры процесса диффузии.

Диффузия характеризуется:

а) Временем жизни неравновесных (избыточных) носителей заряда τ_n .

Если, за счёт какого-либо внешнего воздействия, в одной из областей полупроводника создается неравновесная концентрация носителей заряда n , превышающая равновесную концентрацию n_0 (разность $\Delta n = n - n_0$ называется избыточной концентрацией), то после отключения этого воздействия, за счет диффузии и рекомбинация, избыточный заряд будет убывать по закону $n(t) = n_0 + (n - n_0)e^{-t/\tau}$. Это приводит к выравниванию концентраций по всему объёму проводника. Время τ , в течение, которого избыточная концентрация Δn уменьшится в $e = 2,72$ раза (e - основание натуральных логарифмов), называется временем жизни неравновесных носителей.

б) Диффузионная длина.

Если в объеме полупроводника левее $x < 0$ создать и поддерживать избыточную концентрацию $\Delta n = n - n_0$, то за счет диффузии она начнет проникать в область $x > 0$, одновременно рекомбинируя, а следовательно убывая, по закону $n(x) = n_0 + \Delta n e^{-x/L_n}$. Расстояние, L_n на котором избыточная концентрация $\Delta n = n - n_0$ убывает от своего начального значения в e раз называется диффузионной длиной.

Диффузионная длина и время жизни неравновесных носителей заряда связаны соотношением

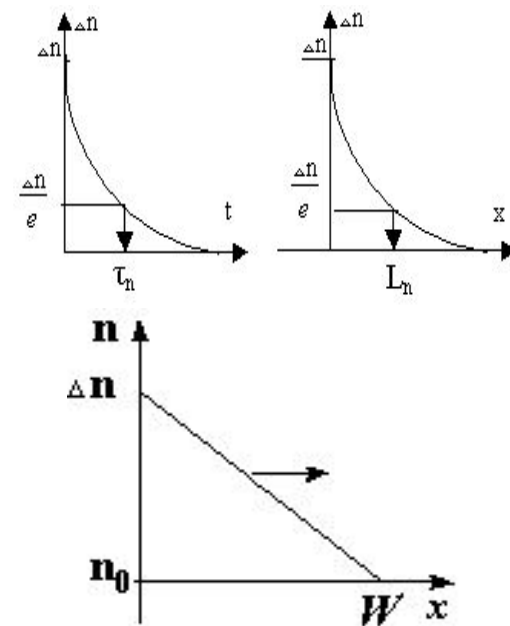
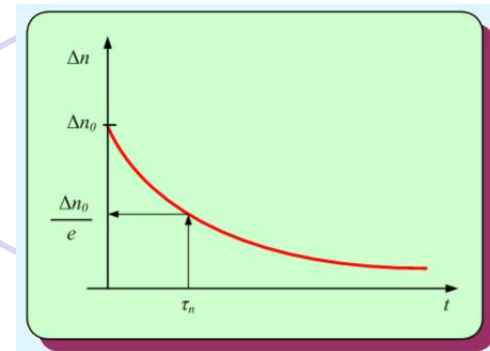
$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2},$$

где D_n - коэффициент диффузии.

В полупроводниковых приборах размеры кристалла конечны, и на его границе ($x=W$) нерекombинировавшие носители удаляются. Тогда граничные условия имеют вид $n(x=0) = n_0 + \Delta n$, $n(x=W) = n_0$, где W — длина кристалла. Если $W \ll L_n$ то решение уравнения (2.7) записывается в виде

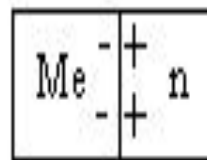
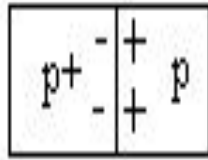
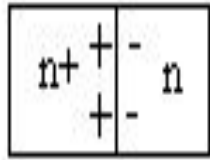
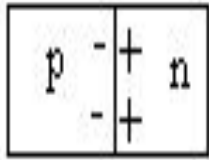
$$n(x) = n_0 + \Delta n(1 - (x/W))$$

Закон распределения носителей в этом случае линеен (рис. 2.2).

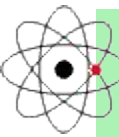


1.2. Электрические переходы

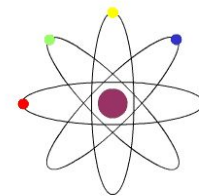
1.2.1. Классификация электрических переходов



- Электрический переход в полупроводнике – это граничный слой между двумя областями полупроводника с различным физическими свойствами. Различают следующие переходы:
- 1. *Электронно-дырочный или p-n* переход - возникает на границе между двумя областями полупроводника с разным типом проводимости.
- 2. *Электронно – электронный (n+-n)* и дырочно – дырочный переходы (*p+-p*) переходы - возникают между областями полупроводника с различной удельной проводимостью. Знаком + - обозначена область, где концентрация свободных носителей заряда выше.
- 3. *Переход на границе металл-полупроводник*. Если работа выхода электронов из полупроводника $A_{п/п}$ меньше работы выхода электронов из металла A_m ($A_{п/п} < A_m$), то, такой переход обладает выпрямительными свойствами и используется в диодах Шотки.
- Если $A_{п/п} > A_m$, то сопротивление перехода оказывается малым независимо от полярности напряжения на нем. Такой переход называется омический контакт, он используется для создания металлических контактов к областям полупроводника.
- 4. *Гетеропереход* - возникает между двумя разнородными полупроводниками, имеющими различную ширину запрещенной зоной.
- 5. Переход на границе металл- диэлектрик- полупроводник (МДП).
- Процессы, протекающие в системе МДП, связаны с эффектом электрического поля. Эффект поля состоит в изменении концентрации носителей заряда, а следовательно и проводимости в приповерхностном слое полупроводника под действием электрического поля создаваемого напряжением E (рис. .).
- *Режим обогащения и режим обеднения*. Приповерхностный слой с повышенной концентрацией свободных носителей заряда называется обогащенным, а с пониженной концентрацией – обедненным.



1.2.2. *p-n* переход



Механическим контактом двух полупроводников с различным типом проводимости *p-n* переход получить невозможно, так как:

- а) поверхности полупроводников покрыты слоем окислом, который является диэлектриком.
- б) всегда существует воздушный зазор, превышающий межатомное расстояние.

Наиболее распространены два способа получения *p-n* перехода.

а) Метод сплавления.

б) Диффузионный метод.

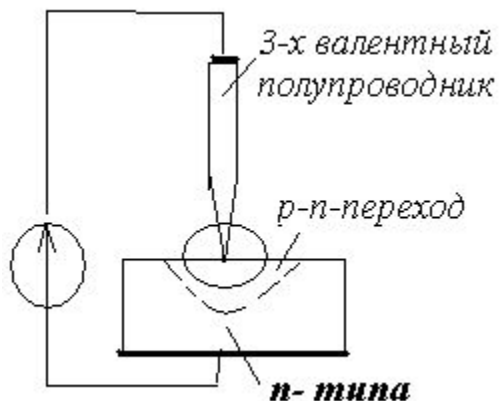
Рассмотрим способ (б). Наиболее распространена планарная конструкция *p-n* переходов, при которой *p-n* переход создаётся путём диффузии на одну из сторон пластины полупроводника.

1. Тонкая пластина подвергается термообработке, в результате чего появляется слой диоксида кремния SiO_2 - изолятор.

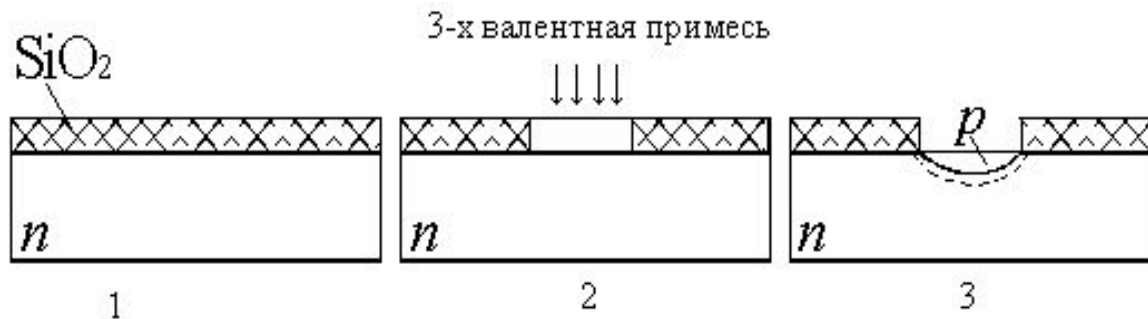
2. Используя методы фотолитографии, удаляют определённые участки в слое SiO_2 , создавая окна и напыляя туда акцепторную примесь.

3. В результате диффузии атомов примеси в полупроводнике *n*-типа образуется *p*-область, а между ними *p-n* переход. ***p-n* переход.**

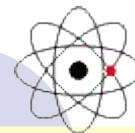
а)



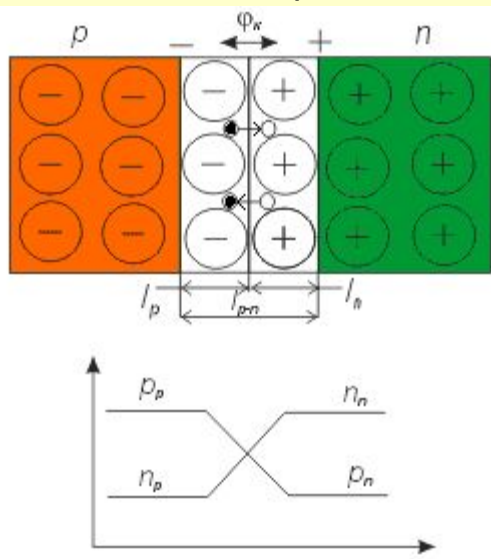
б)



Образование и основные параметры p-n-перехода



- Основным элементом большинства полупроводниковых приборов, например диодов, является электронно-дырочный переход (*p-n*-переход).
- P-n* переход представляет собой переходный слой *lp-n* (Рис.1.1), между двумя областями полупроводника с разным типом электропроводности, обеднённый свободными носителями заряда со своим диффузионным электрическим полем $E_{\text{диф}}$, которое возникает за счет контактной разности потенциалов ϕ_k , и препятствует диффузии основных носителей заряда, и является ускоряющим для неосновных зарядов



P-n-переход характеризуется двумя основными параметрами:

1. контактная разность потенциалов ϕ_k , ее называют

высотой потенциального барьера. Это энергия, которой должен обладать свободный заряд, чтобы преодолеть потенциальный барьер:

где N_A, N_D – концентрация акцепторной и донорной примеси; k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; T – температура; n_p, p_p – концентрации акцепторов и доноров в дырочной и электронной областях соответственно; p_n, n_n – концентрации дырок в *p*- и *n*-областях соответственно; n_i – собственная концентрация носителей заряда в нелегированном полупроводнике,

$\phi_T = kT/e$ – температурный потенциал. При температуре $T=270\text{C}$ $\phi_T=0.025\text{В}$, а $\phi_k=0,3 - 0,3\text{В}$ для Ge, и $\phi_k=0,6 - 0,8\text{В}$ для Si -кремниевого перехода.

2. ширина *p-n*-перехода $l_{p-n} = l_p + l_n$: – это приграничная

область, обеднённая носителями заряда, которая располагается в *p* и *n*-областях:

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала полупроводника; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная свободного пространства.

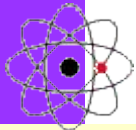
Толщина электронно-дырочных переходов имеет порядок $l_{p-n}=(0,1-10)$ мкм, она пропорциональна напряжению на *p-n*-переходе и обратно пропорциональна концентрации примесей в *p* и *n* областях..

Если $l_p = l_n$, то *p-n* переход называется симметричным, если $l_p \neq l_n$, то *p-n* переход называется несимметричным, причём он в основном располагается в области полупроводника с меньшей концентрацией примеси.

$$\phi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$l_p = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_k}{e} \frac{1}{N_A}} \quad l_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_k}{e} \frac{1}{N_D}}$$

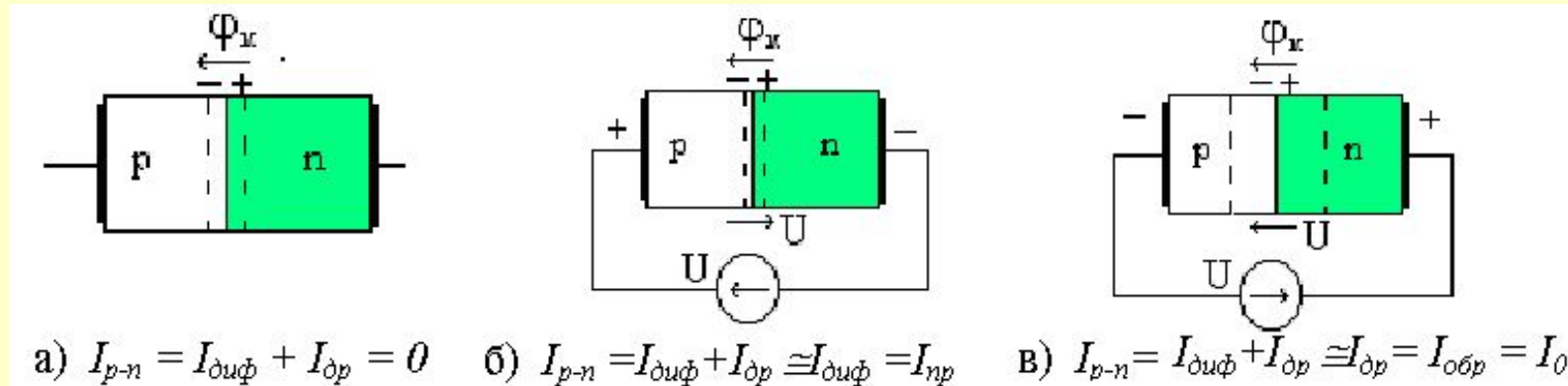
$$l_{p-n} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_k}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$



Токи p-n перехода

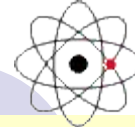
- Различают три режима работы p-n-перехода
- 1. P-n переход в равновесном состоянии: $U_{p-n} = \varphi_K$, (рис. а)
- Без внешнего напряжения на p и n областях через p-n-переход течет два тока диффузионной $I_{диф}$ и дрейфовой $I_{др}$. Диффузионный ток, создается основными носителями заряда, а дрейфовый ток – неосновными.
- В равновесном состоянии сумма диффузионного и дрейфового токов равна нулю:

$$I_{p-n} = I_{диф} + I_{др} = 0$$
- Это соотношение называют условие динамического равновесия процессов диффузии и дрейфа в изолированном (равновесном) p-n- переходе.



- 2) P-n переход смещён в прямом направлении: $U_{p-n} = \varphi_K - U$, (рис. б). $I_{p-n} = I_{пр}$
- Инжекция – процесс преобразования основных носителей заряда в неосновные при протекании прямого тока. Ширина p-n- переходе уменьшается: $l_{p-n} \sim (\varphi_K - U)^{1/2}$.
- 3) P-n переход смещён в обратном направлении: $U_{p-n} = \varphi_K + U$, (рис.в). $I_{p-n} = I_{обр}$
- Экстракция – процесс преобразования неосновных носителей заряда в основные при протекании обратного тока. Ширина p-n- переходе увеличивается: $l_{p-n} \sim (\varphi_K + U)^{1/2}$.

1.1.3. ВАХ p-n перехода



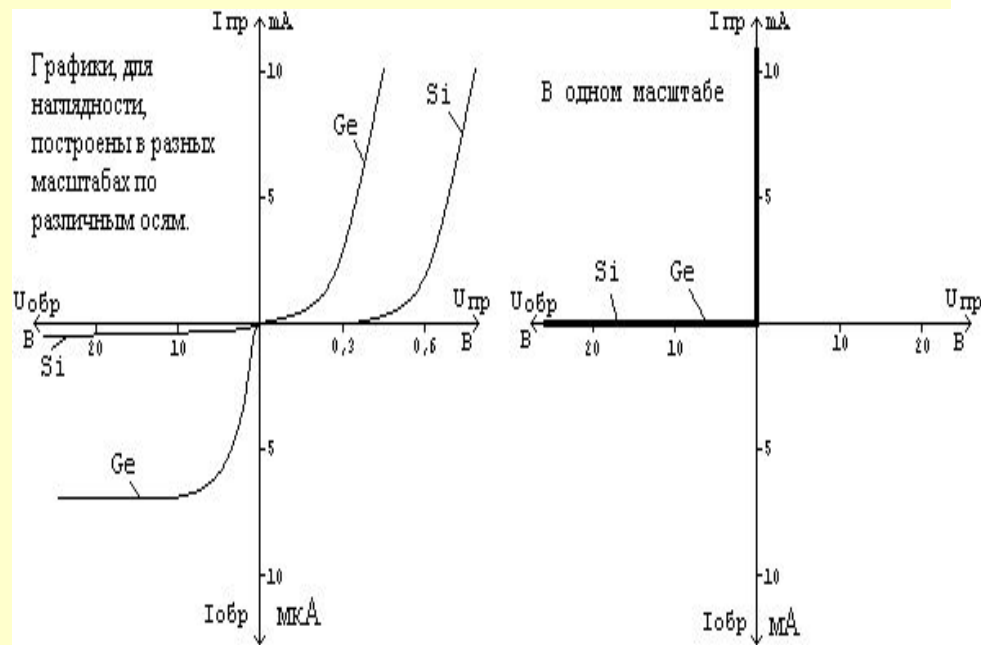
Вольт-амперная характеристика p-n-перехода – это зависимость тока через переход от приложенного к нему напряжения $i=f(u)$. Аналитически, при прямом и обратном смещении ВАХ записывают в виде:

Для наглядности ВАХ представляют в виде графиков (рис.1.3). Если прямую и обратную ветви строить в одном масштабе, то ВАХ p-n перехода имеет вид, как показано на рис. а. Из рисунка четко видно, что p-n переход обладает **односторонней проводимостью**, т. е. $I_{пр} \gg I_{обр}$ или $R_{пр} \ll R_{обр}$. Для изучения особенностей прямой и обратной ветви ВАХ их строят в разных масштабах, например, по току масштабы отличаются в тысячу раз.

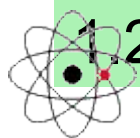
Из графика видно, что прямая ветвь ВАХ диода на основе кремния смещена вправо, а его обратная ветвь имеет ток много меньше, чем ток диода из германия. Дифференциальное сопротивление p-n перехода при прямом смещении определяется из соотношения $r_{диф} = \phi_T / I$. Например, при $I=1\text{мА}$ и $\phi_T=25\text{мВ}$ $r_{диф}=25\text{Ом}$.

Уравнение ВАХ p-n-перехода

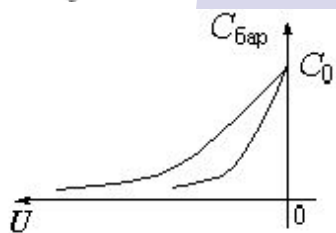
$$I = I_0 (e^{\frac{U}{m \phi_T}} - 1) = \begin{cases} I_{пр} = I_0 e^{\frac{U}{m \phi_T}}, & \text{прямое смещение} \\ I_{обр} = -I_0 & \text{если } U < 0 \text{ обратное смещение.} \end{cases}$$



- Условие односторонней проводимости:
 $I_{пр} \gg I_{обр}$ или $R_{пр} \ll R_{обр}$



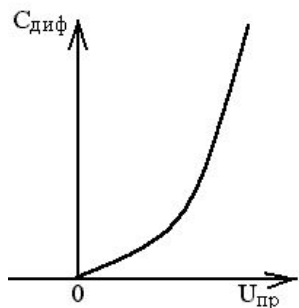
2.6. Ёмкости p-n - перехода



$$C_{(U)} = C_0 \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U} \right)^v$$

$$C_0 = \Pi \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 N_D}{2(\varphi_k)}}$$

$$C_{диф} = \frac{e I_{np} \tau_p}{kT} \left(1 - e^{-\frac{tU}{\tau_p}} \right)$$



Тот факт, что *p-n* что вблизи *p-n*-перехода имеются нескомпенсированные электрические заряд свидетельствует о том, что он обладает ёмкостью. Ёмкость *p-n* перехода состоит из двух составляющих - различают барьерную $C_{бар}$ и диффузионную $C_{диф}$ ёмкости.

$$C_{p-n} = C_{диф} + \begin{cases} \text{Обратное смещение} \\ \text{Прямое смещение} \end{cases}$$

а) При обратном смещении преобладает барьерная ёмкость $C_{бар} > C_{диф}$.

Она связана с неподвижными ионами примесей, концентрация которых невелика. Величина этой ёмкости зависит от величины напряжения U на *p-n* переходе, от площади перехода Π , а также от концентрации примесей.

где C_0 ёмкость, при $-$ обратное напряжение, v - зависит от типа *p-n* перехода ($v=1/2$ - для резкого, $v=1/3$ - для плавного перехода), ϵ - диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; Π - площадь *p-n*-перехода.

Модельным аналогом барьерной ёмкости может служить ёмкость плоского конденсатора, обкладками которого являются *p*- и *n*-области, а диэлектриком служит *p-n*-переход, практически не имеющий подвижных зарядов. Значение барьерной ёмкости колеблется от десятков до сотен пикофард, а изменение этой ёмкости при изменении напряжения может достигать десятикратной величины.

б) Диффузионная ёмкость, преобладает ($C_{диф} \gg C_{бар}$) при прямом смещении *p-n*-перехода.

Она характеризуется накоплением неосновных носителей зарядов вблизи *p-n*-перехода при протекании прямого диффузионного тока (тока инжекции)

где τ_p - время жизни неосновных носителей заряда, $I_{пр}$ - время, в течение которого протекает прямой ток. Значения диффузионной ёмкости могут иметь порядок от сотен до тысяч пикофард.

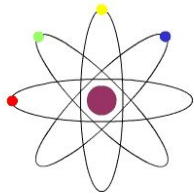
В целом если сравнивать диффузионную и барьерную ёмкости $C_{диф} \gg C_{бар}$.

Это связано с тем, что диффузионная ёмкость связана с прямым, диффузионным током (током основных носителей заряда), который может достигать больших величин.

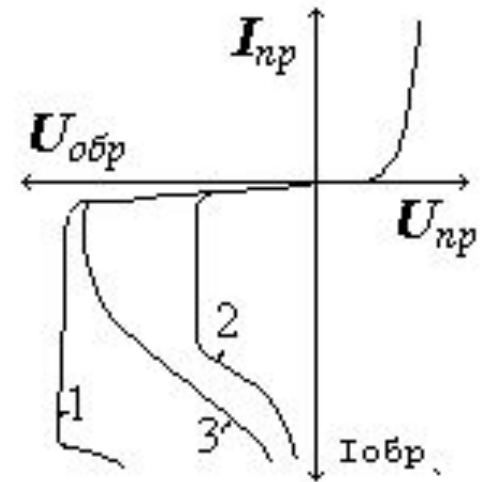
На практика используется барьерная ёмкость, т.к. диффузионная ёмкость обладает малой добротностью, поскольку параллельно этой ёмкости включён *p-n* переход, смещённый в прямом направлении с малым прямым сопротивлением.



Пробой p - n - перехода



- Резкое возрастание тока при обратном смещении p - n перехода, называют пробоем p - n -перехода, а напряжение при котором это происходит – напряжением пробоя.



1. электрический пробой – обратимый т.е. он не приводит к разрушению p - n -перехода, при снижении обратного напряжения p - n -переход восстанавливает свои свойства;

Он может быть туннельным – кривая 2 или лавинным – кривая 1. Лавинный пробой – возникает за счет лавинного размножения неосновных носителей заряда путем ударной ионизации. Туннельный пробой – возникает за счет перехода электронов из связанного состояния в свободное без сообщения им дополнительной энергии.

2. тепловой – необратимый, приводит к разрушению p - n -перехода - кривая 3.



Дисциплина:

Электротехника и электроника

Лектор: Погодин Дмитрий Вадимович
Кандидат технических наук,
доцент кафедры РИИТ
(кафедра Радиоэлектроники и
информационно-измерительной
техники)