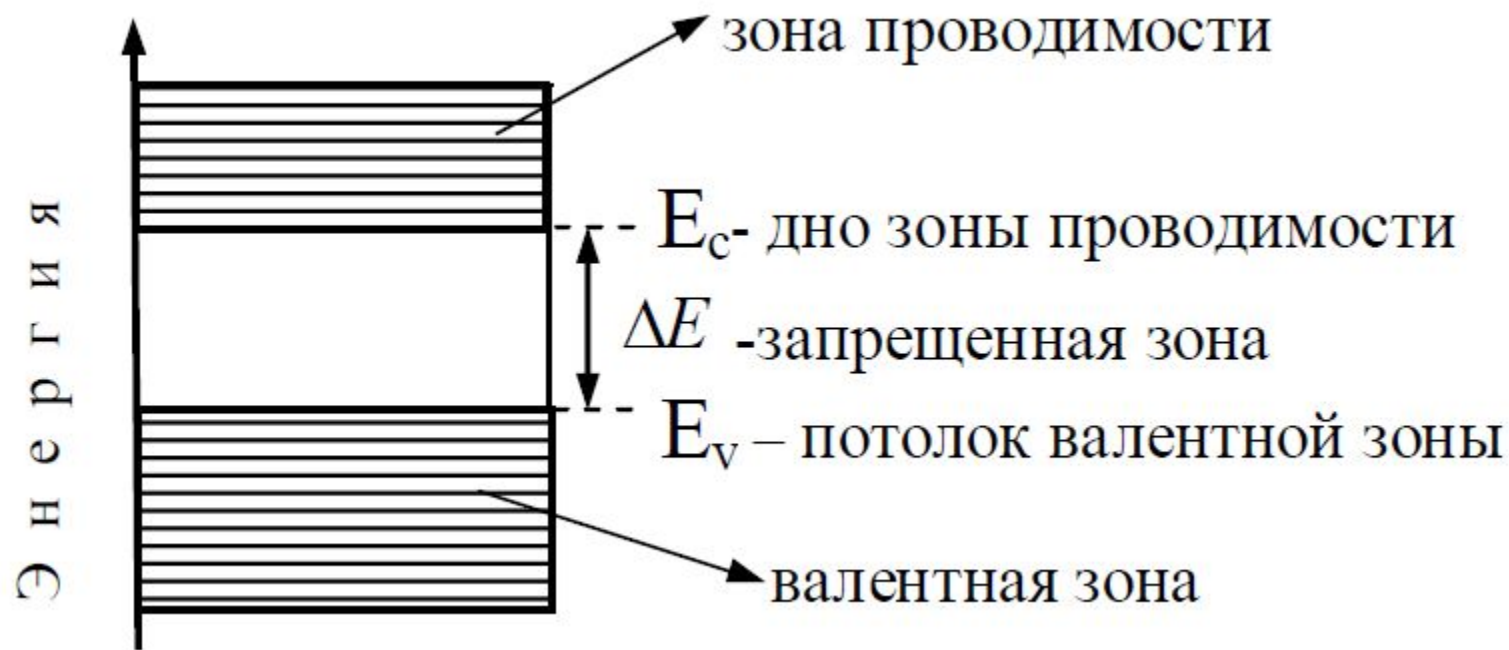


ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОН ИКИ

1) Полупроводник можно представить в виде модели энергетических зон, т.е. зонной диаграммы

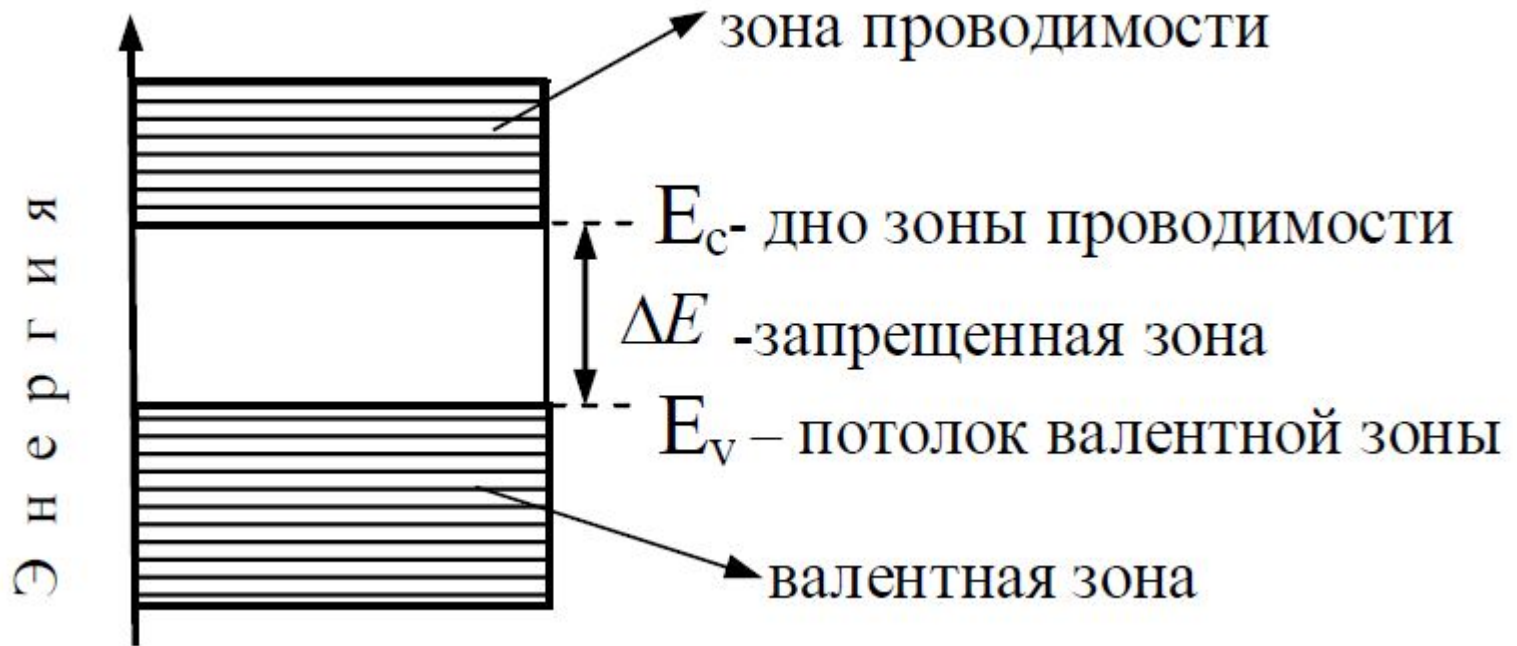


При образовании твердого тела атомы сближаются друг с другом на очень малые расстояния (менее 0,5 нм). При этом плотность атомов в твердом теле достигает 10^{22} - 10^{23} см⁻³.

Количество энергетических уровней в валентной зоне и зоне проводимости одного порядка.

Степень заполнения уровней электронами различна.

При $T = 0$ К все уровни **валентной зоны** **заполнены**, а уровни **зоны проводимости** **не заняты**.



Ширина запрещенной
зоны:

$$\Delta E = E_c - E_v$$

2. Ток в полупроводниковых приборах определяется количеством электронов и дырок находящихся в разрешенных зонах в свободном состоянии.

Если известно количество уровней, расположенных в зоне проводимости, то, зная вероятность их заполнения, можно путем интегрирования по всей зоне проводимости определить количество свободных электронов n_0 , т.е.

$$n_0 = \int_{E_c}^{\infty} N_c f(E) dE \quad 1$$

где $f(E)$ - функция вероятности заполнения электроном уровня с энергией E ;
 N_c - эффективная плотность энергетических состояний в зоне проводимости
(количество уровней, отнесенных к единице объема)

Плотность энергетических состояний в зоне проводимости:

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad 2$$

где m_n^* – эффективная масса электрона;

k, h – постоянные Больцмана и Планка соответственно;

T – температура.

Эффективная масса - величина, имеющая размерность массы и применяемая для удобного описания движения частицы в периодическом потенциале кристалла. Можно показать, что электроны и дырки в кристалле реагируют на электрическое поле так, как если бы они свободно двигались в вакууме, но с некой эффективной массой, которую обычно определяют в единицах массы электрона m_e ($9,11 \times 10^{-31}$ кг). Эффективная масса электрона в кристалле, вообще говоря, отлична от массы электрона в вакууме и может быть как положительной, так и отрицательной

Вероятность заполнения уровня с энергией E определяется соотношением Ферми-Дирака

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT} + 1\right)} \quad 3$$

Для **невырожденных** полупроводников уровень Ферми всегда расположен так,

что $E_c - E_F \gg kT$.

Под ^c невырожденным полупроводником будем понимать полупроводник, у которого уровень Ферми лежит в пределах запрещенной зоны.

Носители в невырожденных полупроводниках подчиняются **статистике Максвелла-Больцмана**

$$f(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right) \quad 4$$

Концентрации свободных электронов в зоне проводимости полупроводника:

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad 5$$

Аналогично для электронов можно записать выражения для расчета концентрации свободных дырок в валентной зоне:

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) \quad 6$$

где N_v - эффективная плотность энергетических состояний в валентной зоне.

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad 7$$

ΔE - ширина запрещённой зоны, [эВ].

$$\Delta E(T) = \Delta E(0) - \eta T \quad 8$$

η - температурный коэффициент ширины запрещенной зоны.
Для германия и кремния $\eta = 2,4 \times 10^{-4}$ эВ/К.

Для наиболее широко используемых полупроводниковых материалов ΔE имеет следующие значения: $\Delta E_{Ge} = 0,72$ эВ, $\Delta E_{Si} = 1,12$ эВ и $\Delta E_{GaAs} = 1,43$ эВ при $T = 300$ К.

μ_n, μ_p - подвижность
носителей, $[\text{см}^2/\text{В}], \mu = \frac{v_{др}}{E}$

Подвижность - это скорость дрейфа носителей при воздействии единичного электрического поля (**скорость перемещения заряда**).

- подвижность электронов во всех полупроводниках всегда больше подвижности дырок ($\mu_n > \mu_p$);
- подвижность электронов и дырок является функцией концентрации легирующей примеси и температуры ($\mu_{n,p} = f(N, T)$);

При **увеличении концентрации примеси возрастает число рассеивающих центров и снижается скорость перемещения носителей зарядов.**

Существует эмпирическая формула, связывающая подвижность с концентрацией

$$\mu = \mu_1 + \frac{\mu_2}{1 + \left(\frac{N^+}{N}\right)^\alpha} \quad 9$$

где N^+ - количество рассеивающих центров, см^{-3} .

Параметры для расчета подвижности носителей

Материал	П а р а м е т р ы			
	$\mu_1,$ см ² /В·с	$\mu_2,$ см ² /В·с	$N^0,$ см ⁻³	α
Кремний:				
электроны	65	1265	$8,5 \cdot 10^{16}$	0,72
дырки	48	447	$6,3 \cdot 10^{16}$	0,76
Германий:				
электроны	50	3850	$8,1 \cdot 10^{16}$	0,48
дырки	42	1860	$1,4 \cdot 10^{17}$	0,43

В диапазоне рабочих температур полупроводниковых приборов подвижность уменьшается с ростом температуры в основном за счет решеточного рассеяния, причем $\mu \sim T^{-3/2}$.

T - время жизни носителей, [с].

Если под воздействием освещения в зоне проводимости полупроводника появятся избыточные электроны, то их концентрация будет уменьшаться во времени за счет процессов рекомбинации по следующему закону:

$$\Delta n(t) = \Delta n(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \quad 10$$

Тогда под временем жизни τ_n надо понимать время, в течение которого начальная концентрация избыточных электронов $\Delta n(0)$ уменьшается в e раз.

Время жизни зависит от концентрации легирующей примеси и количества дефектов в полупроводнике: с ростом концентрации примеси время жизни уменьшается, т.к. примеси выступают в роли центров рекомбинации.

D_n , D_p - коэффициенты диффузии электронов и дырок, [cm^2/c]

Если в полупроводниковом материале существует градиент концентрации носителей, например, электронов, то возникает диффузионный поток Φ_n . Величина этого потока определяется градиентом концентрации

$$\Phi_n = -D_n \text{grad } n$$

Коэффициентом диффузии D_n – это коэффициент пропорциональности между Φ_n и $\text{grad } n$.

Численное значение коэффициента диффузии показывает число частиц, проходящих через единичную площадку (например, 1 cm^2), расположенную перпендикулярно вектору потока, за единицу времени.

L_n , L_p - длина диффузионного смещения, [см].

Если в полупроводнике существует градиент концентрации, то носители перемещаются в сторону уменьшения концентрации. При этом за счет процессов рекомбинации концентрация избыточных носителей уменьшается не только во времени, но и в пространстве по экспоненциальному закону

$$\Delta n(x) = \Delta n(0) \exp - \frac{x}{L_n} \quad 12$$

Под длиной диффузионного смещения L_n понимается расстояние, на котором концентрация носителей уменьшается в e раз.

Типичные значения $L_{n,p}$ составляют 10^{-3} - 10^{-1} см.

Перечисленные выше параметры связаны между собой следующими соотношениями

$$\left. \begin{aligned} D_n &= \frac{kT}{q} \mu_n \\ D_p &= \frac{kT}{q} \mu_p \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{- соотношение Эйнштейна;} \\ (13) \end{array}$$

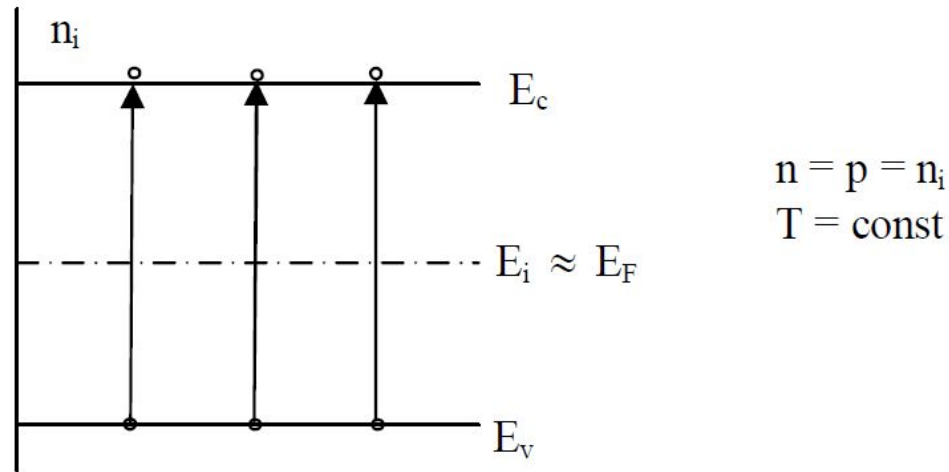
$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (14)$$

Величина $\frac{kT}{q}$ называется тепловым потенциалом. Он равен

0,0258 В. при 300 К

n_i - собственная концентрация носителей, [см⁻³].

В собственном полупроводнике, свободные электроны и дырки могут появиться только за счет перехода определенной части электронов из валентной зоны в зону проводимости. При этом в валентной зоне образуется такое же количество свободных дырок. Количество свободных носителей зависит от температуры и ширины запрещенной зоны полупроводника.



Собственная концентрация носителей n_i - это концентрация свободных электронов и дырок в собственном полупроводнике при заданной температуре. Численные значения n_i составляют: для германия - $2,5 \times 10^{13}$ см⁻³, для кремния - 10^{10} см⁻³ при $T=300$ К.

$E_{пр}$ - электрическая прочность, [В/см].

Если образец полупроводника разместить между металлическими обкладками и подать на него изменяющееся пилообразное напряжение, то ток через структуру будет изменяться по закону Ома: $j = \sigma E$.

Однако при некоторой напряженности поля E в полупроводнике произойдет резкое возрастание тока j . Явление резкого возрастания тока называют пробоем, а напряженность поля, при которой происходит пробой – электрической прочностью. Значения $E_{пр}$ для кремния и германия составляют приблизительно 8×10^5 В/см и 3×10^5 В/см соответственно.

ϵ - диэлектрическая проницаемость материала. Величина безразмерная.

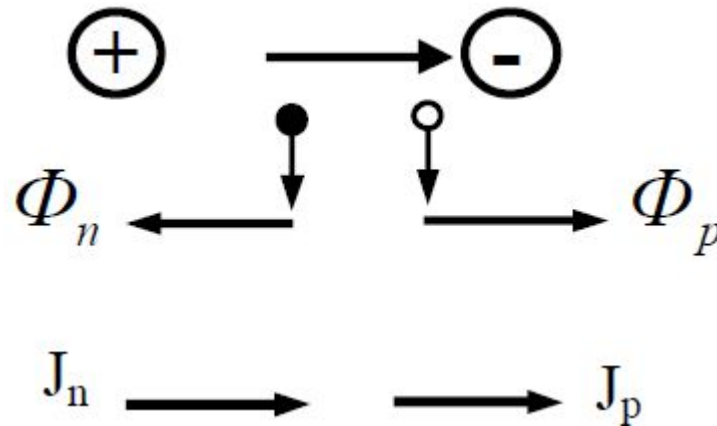
Характеризует материальную среду, в которой происходит перемещение носителей зарядов. $\epsilon_{\text{Si}} = 12$, $\epsilon_{\text{Ge}} = 16$, $\epsilon_{\text{GaAs}} = 11$.

В твердотельных приборах направленное движение заряженных частиц осуществляется за счет действия сил электрического поля и градиента концентрации.

Ток, обусловленный движением заряженных частиц под действием сил электрического поля, называется **дрейфовым**.

Величина дрейфового тока определяется количеством носителей и скоростью их перемещения

$$\vec{j}_n^{\text{др}} = qn\mu_n E; \quad \vec{j}_p^{\text{др}} = qp\mu_p E .$$



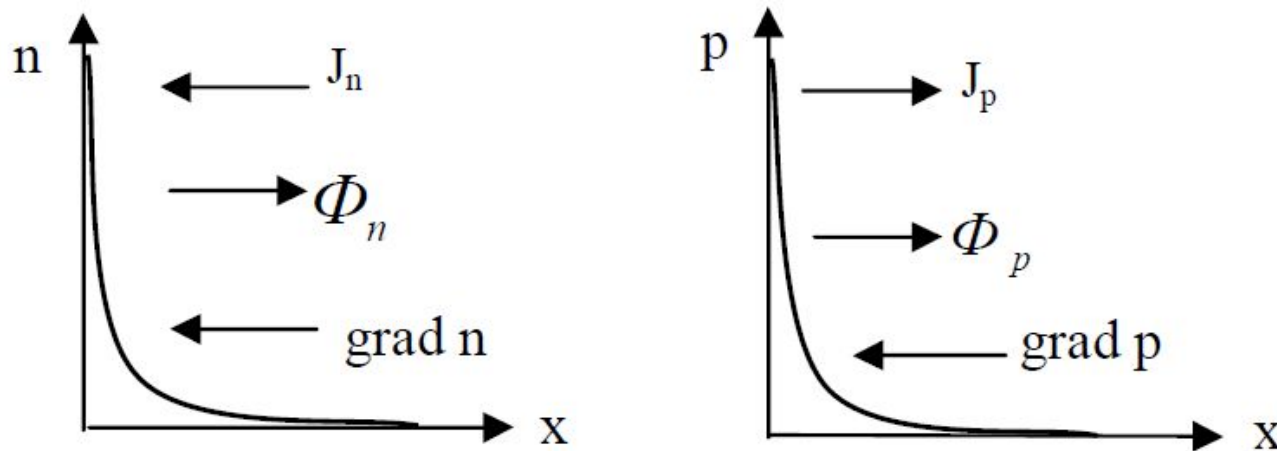
Вектора потоков Φ и токов / электронов и дырок под действием электрического поля.

Диффузионный ток - ток, обусловленный направленным движением электронов и дырок за счет градиента концентрации.

Если в какой-то части кристалла полупроводника большая концентрация электронов, а в другой части их мало, то возникает диффузионный поток электронов, создающий диффузионный ток. Величина диффузионного тока определяется градиентом.

$$j_n^{\text{диф}} = qD_n \text{grad } n ,$$

$$j_p^{\text{диф}} = -qD_p \text{grad } p .$$



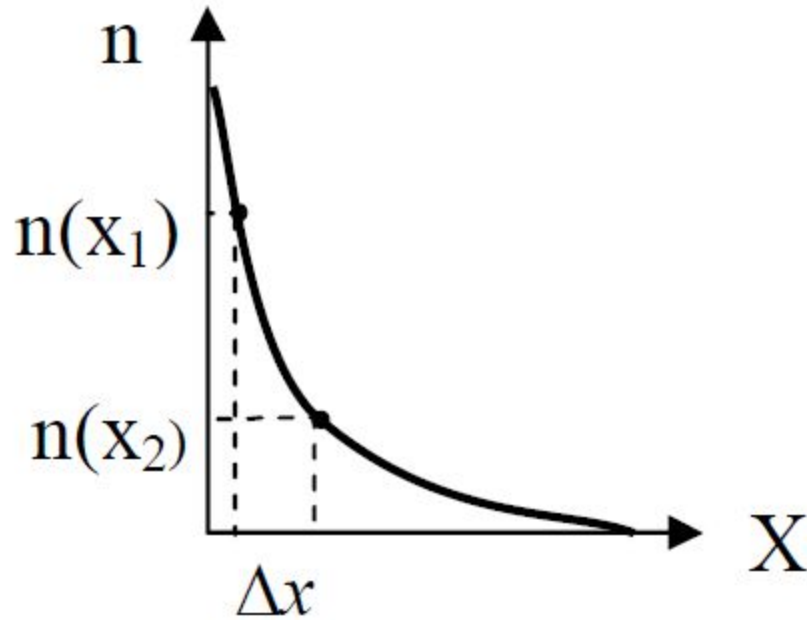
Направление векторов потоков Φ , токов и градиента для диффузии электронов и дырок.

$$j = j_n + j_p = j_n^{\text{др}} + j_n^{\text{диф}} + j_p^{\text{др}} + j_p^{\text{диф}} ,$$

$$j = qn\mu_n E + qp\mu_p E + qD_n \text{grad } n - qD_p \text{grad } p .$$

В большинстве полупроводниковых приборов на основе р - n переходов ток по своей природе является диффузионным и для его нахождения необходимо уметь определять градиент концентрации.

$$\text{grad } n = \frac{n(x_1) - n(x_2)}{\Delta x}$$



Уравнение
Пуассона.

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

где $\rho(x)$ – плотность заряда;

ε_0 – электрическая постоянная.

Если известна плотность заряда $\rho(x)$, то значение напряженности электрического поля E и потенциала φ может быть определено в любой точке пространства путем решения уравнения Пуассона при заданных граничных условиях.

$$\left[\begin{array}{l} \text{Изменение} \\ \text{концентрации} \\ \text{носителей} \\ \text{во времени} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{процессы} \\ \text{генерации} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{процессы} \\ \text{рекомбинации} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{растекание} \\ \text{тока} \end{array} \right]$$

$$G_n = \frac{n_0}{\tau_n}; \quad G_p = \frac{p_0}{\tau_p} \text{ — скорости генерации;}$$

$$R_n = \frac{n}{\tau_n}; \quad R_p = \frac{p}{\tau_p} \text{ — скорости рекомбинации;}$$

$$\operatorname{div} j_n = \frac{dj_n}{dx}; \quad \operatorname{div} j_p = \frac{dj_p}{dx} \text{ — дивергенция токов.}$$

Собственный полупроводник

$$E_F = E_i + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$$

или с учетом выражений для N_v и N_c

$$E_F = E_i + \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}.$$

Эти выражения показывают, что в собственном полупроводнике уровень Ферми лежит вблизи середины запрещенной зоны E_i и отклоняется от E_i в зависимости от соотношения эффективных масс электрона и дырки. При $m_n^* = m_p^*$ он лежит точно посередине запрещенной зоны.

Так как $n = p = n_i$, то можно записать с учетом того, что $n \cdot p = n_i^2$.

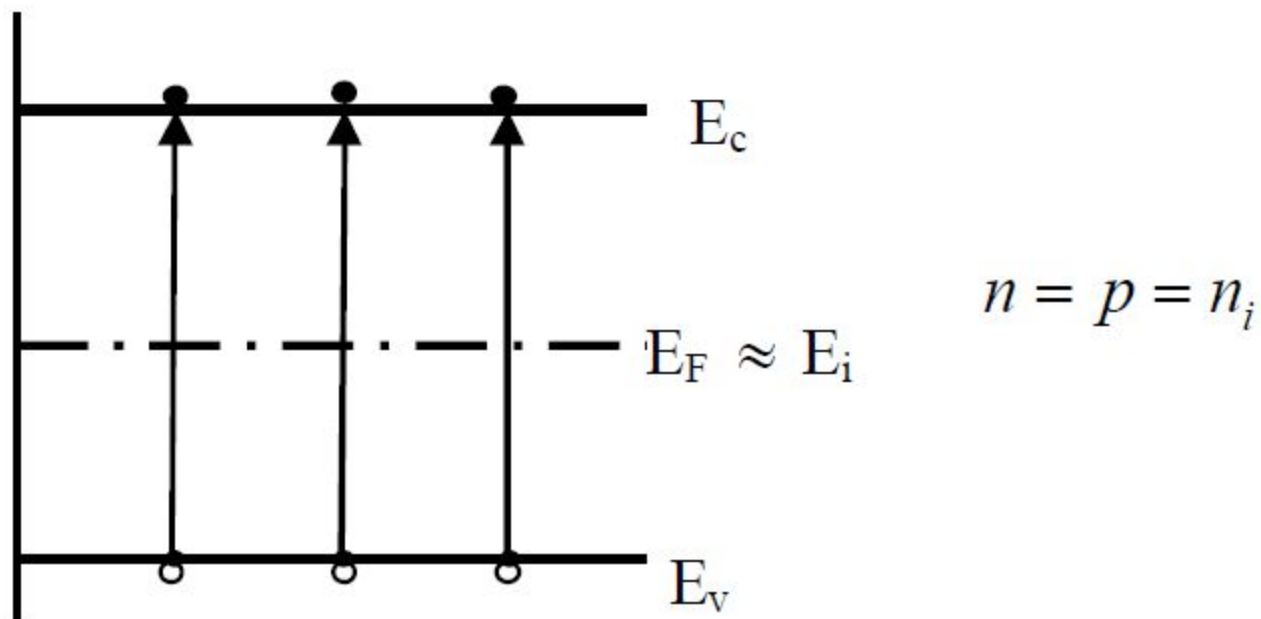
$$n_i^2 = N_c N_v \exp - \frac{\Delta E}{kT},$$

где $\Delta E = E_c - E_v$.

Тогда
$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp - \frac{\Delta E}{2kT},$$

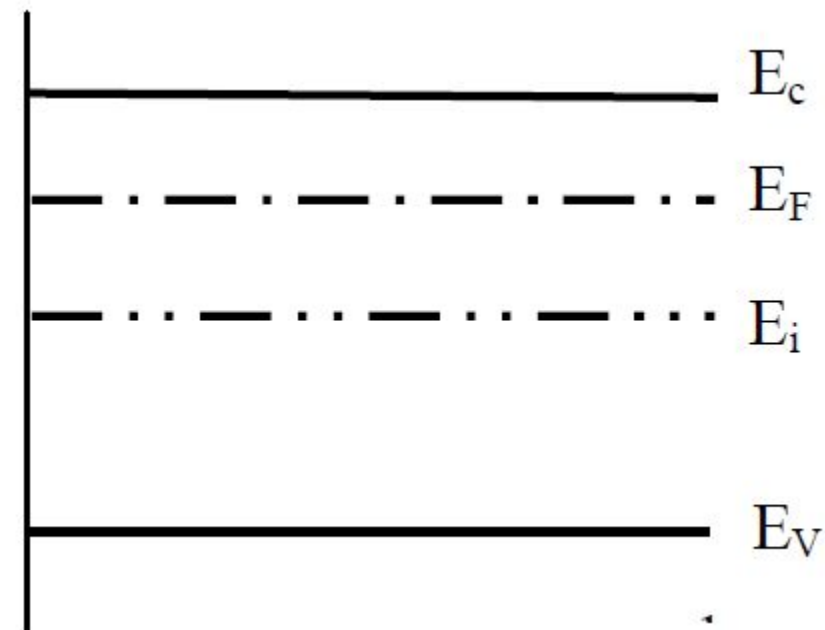
т.е. собственная концентрация носителей зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника и температуры.

Поскольку в собственном полупроводнике концентрации электронов и дырок равны, то электропроводность такого полу-проводника равна.



$$\sigma_i = q\mu_n n + q\mu_p p = q(\mu_n + \mu_p)n_i$$

Зонная диаграмма полупроводника n - типа



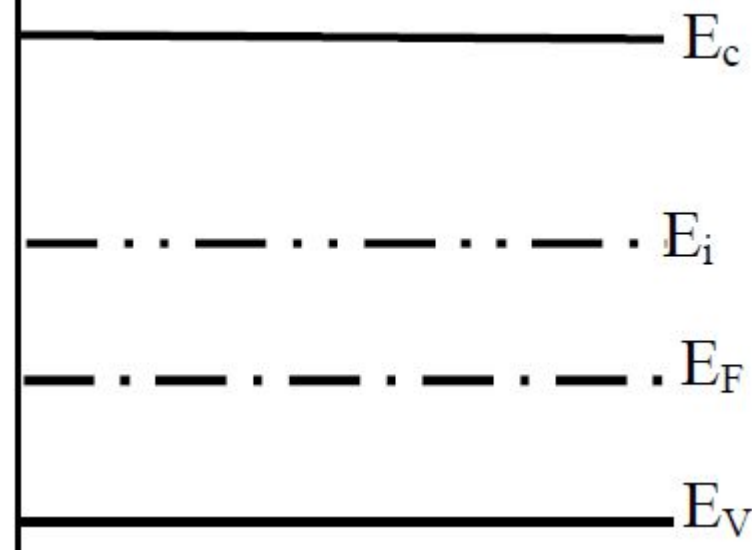
$$E_F = E_i + kT \ln \frac{N_q}{n_i}$$

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

$$E_F = E_c - kT \ln \frac{N_c}{N_q}$$

$$\sigma_n = q\mu_n n$$

Зонная диаграмма полупроводника p - типа.



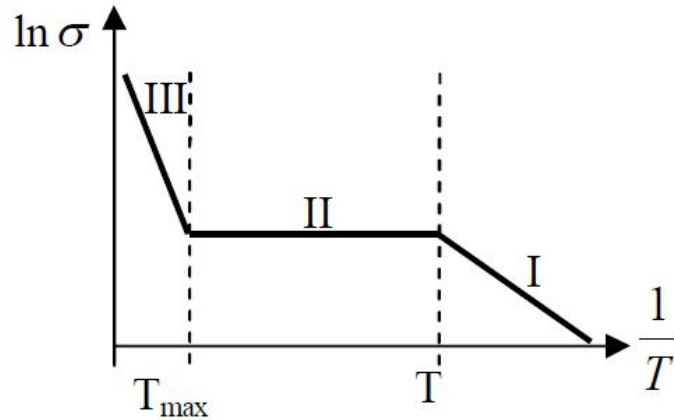
$$E_F = E_i - kT \ln \frac{N_a}{n_i}$$

$$E_F = E_v + kT \ln \frac{N_v}{N_a}$$

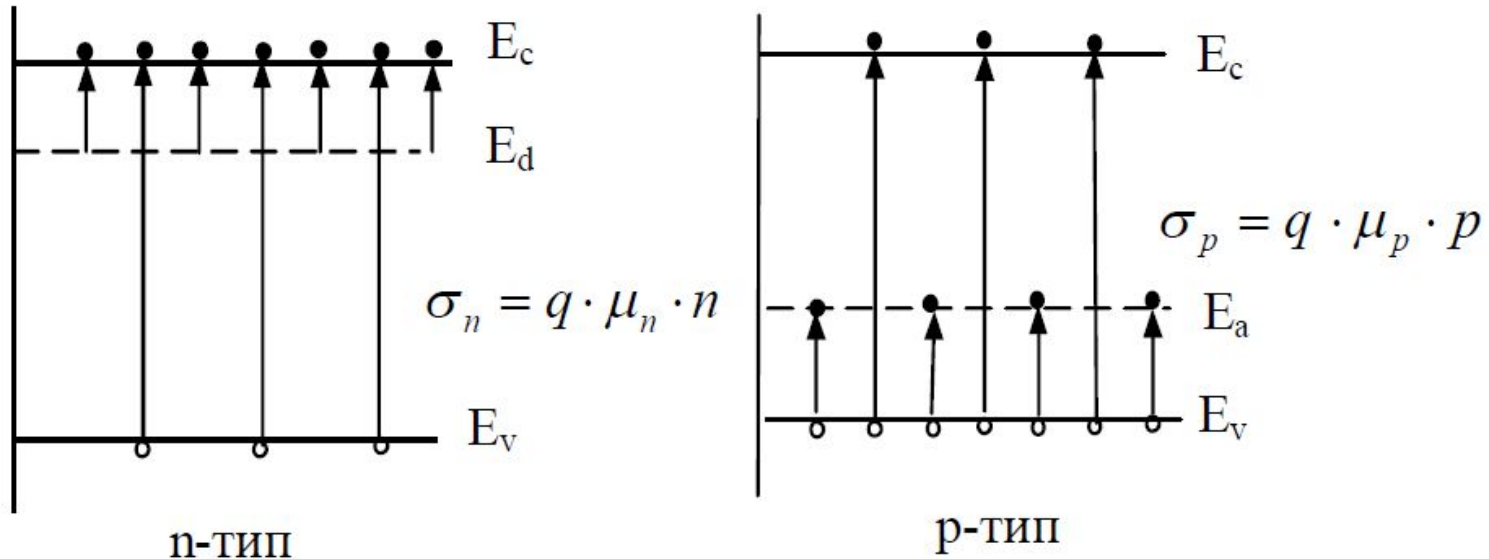
$$\sigma_p = q\mu_p p$$

Компенсированные полупроводники.

Зависимость электропроводности полупроводников от температуры



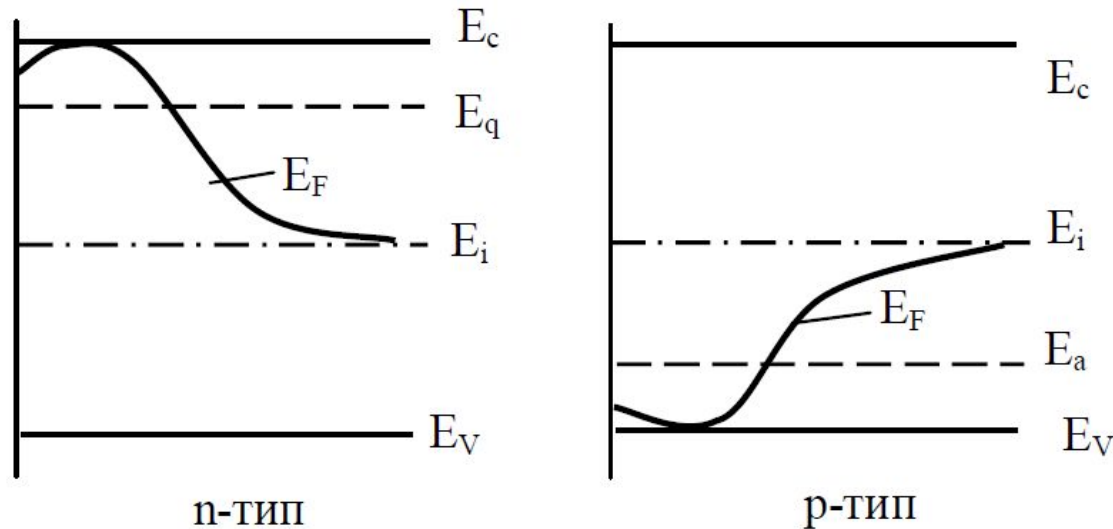
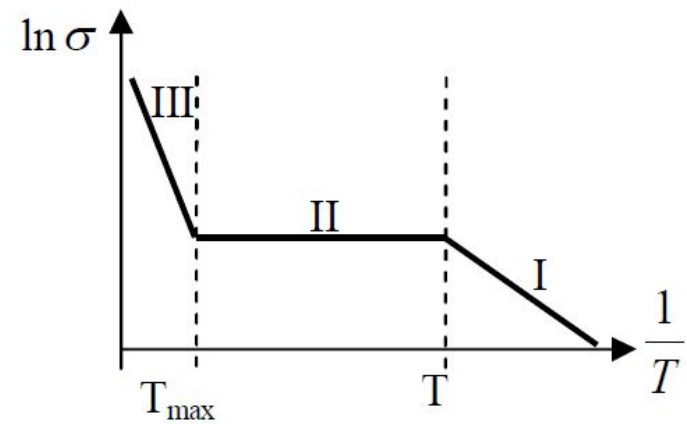
На участке I, называемом участком примесной проводимости, σ растет при увеличении температуры T , что связано с увеличением концентрации носителей, становящихся свободными в результате ионизации примеси



Изменение концентрации свободных электронов и дырок в примесных полупроводниках.

$$\sigma_n = q\mu_n n \quad \sigma_p = q\mu_p p$$

Пренебрегая температурной зависимостью подвижности носителей, можно говорить о том, что рост электропроводности обусловлен увеличением концентрации носителей (электронов в n - полупроводнике и дырок в p-полупроводнике) за счет их поступления с примесных уровней.



Изменение положения уровня Ферми в примесных полупроводниках при изменении температуры.

Равновесные и неравновесные носители зарядов в полупроводниках. Основные и неосновные носители.

n_n – концентрация электронов в n – полупроводнике;

p_n – концентрация дырок в n – полупроводнике;

p_p – концентрация дырок в p – полупроводнике.

n_p – концентрация электронов в p – полупроводнике;

В собственном полупроводнике концентрации электронов и дырок можно записать следующим образом

$$\begin{aligned} n &= N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i + E_i - E_F}{kT}\right) = \\ &= n_i \exp\left(-\frac{E_i - E_F}{kT}\right), \end{aligned}$$

так как $N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i}{kT}\right) = n_i.$

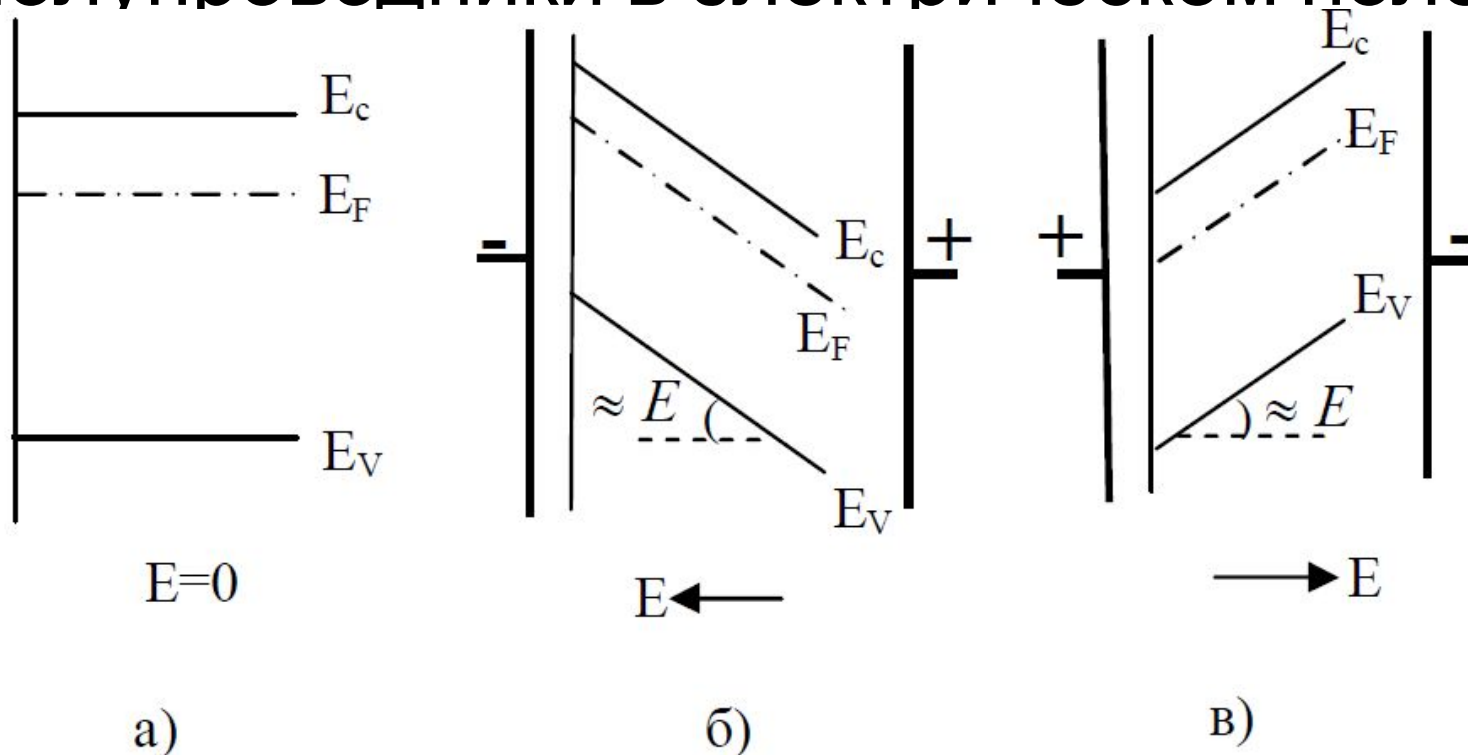
$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_i + E_i - E_v}{kT}\right) =$$
$$= p_i \exp\left(-\frac{E_F - E_i}{kT}\right).$$

так как $N_v \exp\left(-\frac{E_i - E_v}{kT}\right) = p_i$.

$n \cdot p = n_i^2 = \text{const}$ закон действующих
масс

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

Полупроводники в электрическом поле



Зонные диаграммы полупроводника n - типа вне поля (а), в электрических полях разного направления (б, в).

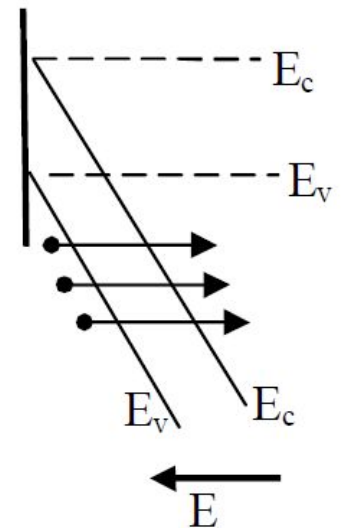
Угол наклона зон зависит от напряженности поля, а направление наклона - от направления вектора напряженности.

Ударная ионизация. Свободный электрон или дырка под действием сил электрического поля набирают энергию W

$$W = qE\lambda,$$

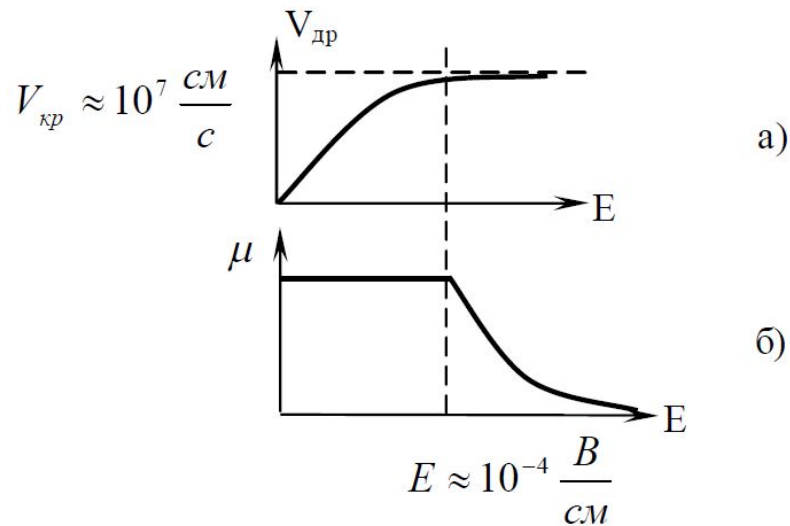
где λ – длина свободного пробега, которую надо понимать как расстояние между двумя актами взаимодействия.

Туннелирование. В области сильных электрических полей из-за большого наклона энергетических зон возможен процесс перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости без изменения энергии. Этот процесс называется туннелированием. Вероятность туннелирования электронов из зоны проводимости в валентную зону такая же, но так как в зоне проводимости электронов меньше, то преобладает процесс туннельного перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости.



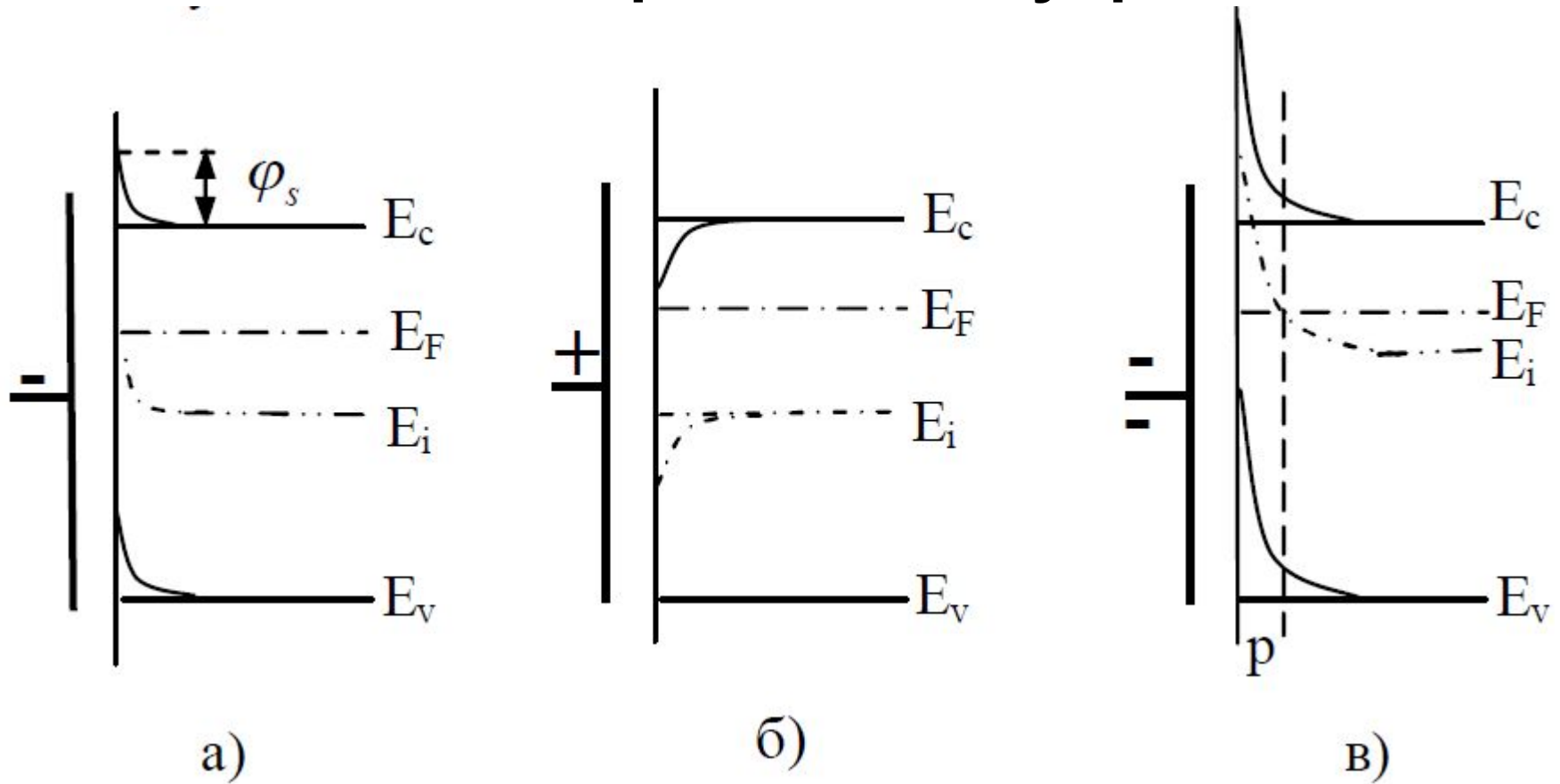
Насыщение скорости. В слабых электрических полях дрейфовая скорость носителей меньше, чем тепловые скорости. В сильных полях носители набирают дополнительную энергию (разогреваются) и дрейфовые скорости становятся соизмеримыми с тепловыми. При этом наблюдается изменение подвижности носителей.

В области высоких температур, когда процессы рассеяния определяются рассеянием на донорах, разогрев носителей приводит к увеличению числа столкновений носителей с атомами, и дрейфовая скорость перестает расти при увеличении напряженности электрического поля, т.е. происходит насыщение скорости, что сопровождается уменьшением подвижности (рис.2.17 б). Это наблюдается в полях порядка 10^4 В/см.



Зависимость дрейфовой скорости (а) и подвижности (б) от напряженности электрического поля.

Явления на поверхности полупроводников



Энергетические диаграммы полупроводника, поясняющие явления **обеднения (а), обогащения (б) и инверсии (в).**

полупроводника с n - типом проводимости

Явления

обеднения

Вблизи поверхности полупроводника находится пластина, на которую подан отрицательный потенциал или на поверхности полупроводника произошла адсорбция отрицательных частиц. В таком случае электроны начнут отталкиваться от поверхности полупроводника и уходить вглубь. Произойдет явление **обеднения** поверхности полупроводника основными носителями. На зонной энергетической диаграмме явление обеднения отра-

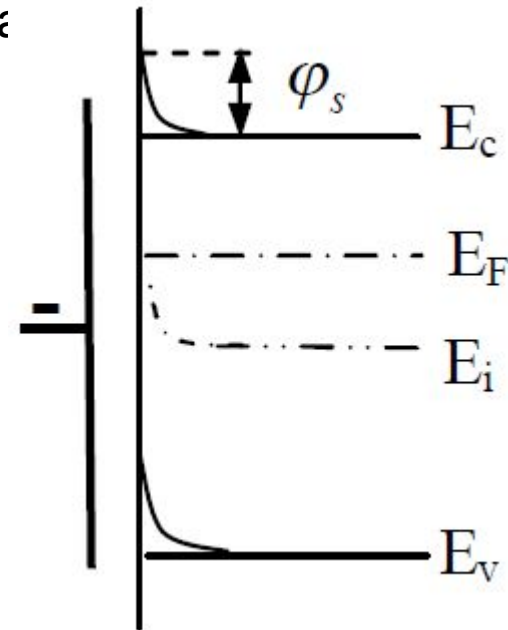
вверх на величину ϕ_s .

$$n = N_c \exp - \frac{E_c - E_F}{kT}$$

Зазор между E_c и E_F **увеличивается** при **уменьшении концентрации** на поверхности
Концентрация электронов на

поверхности:

$$n_s = n_0 \exp - \frac{\phi_s}{kT}$$



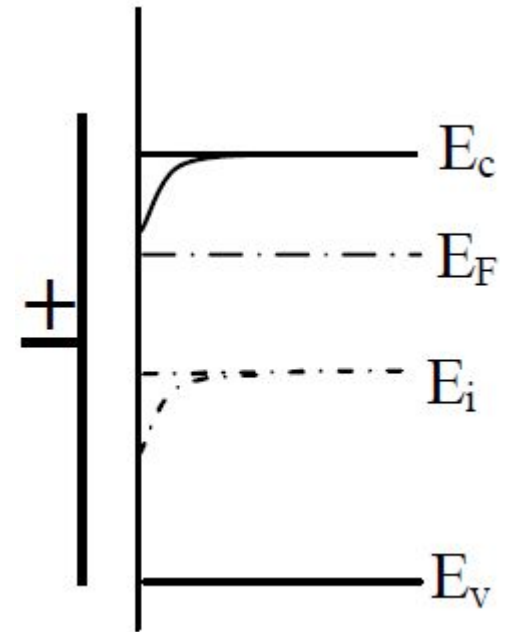
Поскольку в обедненном слое концентрация носителей мала, то он обладает повышенным сопротивлением. Причем сопротивление этого слоя зависит от изгиба зон ϕ_s . Данное явление используется для создания **выпрямляющих контактов**.

Явления обогащения

Если на поверхности полупроводника или вблизи нее образуется положительный заряд, то электроны притягиваются к поверхности и, поверхность **обогатится** основными носителями. На зонной диаграмме это выразится **изгибом зон вниз**.

Концентрация носителей на поверхности будет определяться как

$$n_s = n_0 \exp\left(\frac{\varphi_s}{kT}\right)$$

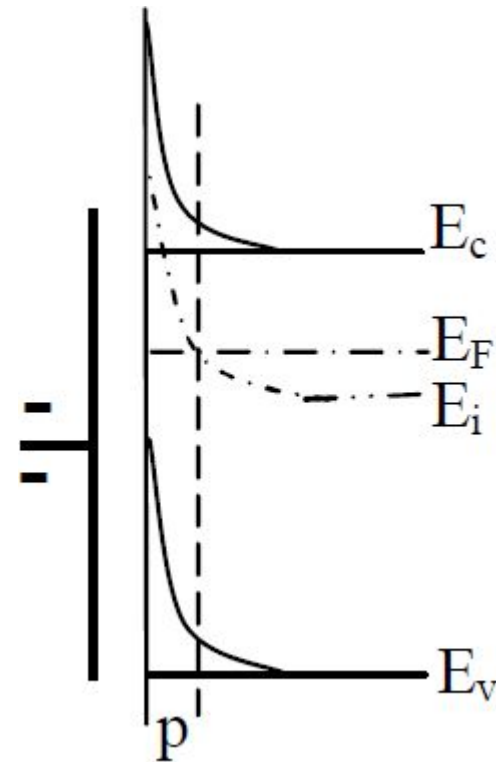


Поскольку вблизи поверхности концентрация электронов велика, то обогащенный слой имеет малое сопротивление, и это используется для создания **омических контактов**.

Явления инверсии

При наличии у поверхности большего, чем в случае обеднения, отрицательного заряда, изгиб зон будет сильнее. При определенной величине заряда на поверхности произойдет явление **инверсии поверхностной проводимости**.

На поверхности полупроводника n - типа образуется слой с p - типом проводимости. Это явление используется для создания широкого класса полевых приборов.



При рассмотрении этого вопроса надо иметь в виду, что уровень середины запрещенной зоны должен всегда находиться посередине запрещенной зоны в любом сечении полупроводника, а **уровень Ферми E_F не должен не сдвигаться по запрещенной зоне, не изгибаться**, так как его положение определяется концентрацией легирующей примеси. При изменении состояния на поверхности концентрация примеси, а, следовательно, и **уровень E_F своего положения не изменяет**.

1. Нарисовать зонную диаграмму собственного полупроводника, полупроводника n-типа, и полупроводника p-типа.

2. Концентрация электронов в начальный момент времени в полупроводнике составляет 10^{17} см^{-3} . За время 10^{-4} с эта концентрация уменьшилась до 10^{15} см^{-3} . Определить время жизни в таком полупроводнике.

3. Определить скорость дрейфа электронов и дырок в собственном германии при температуре $T = 300 \text{ К}$, если полупроводник находится в электрическом поле с напряженностью $E = 1000 \text{ В/см}$.

4. Определить и сравнить скорость дрейфа электронов в германии при напряженности поля $E = 10 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ с его скоростью при

движении на расстоянии 10 см в таком же поле в вакууме.

5. Определить ширину запрещенной зоны германия (Ge) при температуре $T = 500 \text{ К}$, если при $T = 300 \text{ К}$ ширина запрещенной зоны $0,658 \text{ эВ}$.