

Банк заданий по профильной части вступительного испытания в магистратуру

Задание №6 – вопрос (5 баллов)	
6.1	Объясните образование энергетических зон в твердых кристаллических телах.
6.2	Объясните образование примесных энергетических уровней в кристалле.
6.3	Уровень Ферми в собственном полупроводнике. Как это понятие используется в физике полупроводников для определения собственных концентраций носителей заряда.
6.4	Объясните температурную зависимость концентрации носителей в собственном полупроводнике.
6.5	Эффективная плотность электронных состояний в зоне проводимости и валентной зоне полупроводника.
6.6	Что такое невырожденный полупроводник?
6.7	Донорные и акцепторные примеси в полупроводниках.
6.8	Собственные и примесные полупроводники.
6.9	Рекомбинации носителей заряда в полупроводниках.
6.10	Рассеяние носителей зарядов в полупроводниках. Подвижность носителей заряда.
Пример выполнения Задания 6.3	
<p>Для случая невырожденного полупроводника соотношение для локальной концентрации электронов:</p> $n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_c \exp\left(-\frac{\zeta}{\varphi_T}\right)$ <p>где N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в кремнии); E_F – энергия уровня Ферми, E_c – энергия дна зоны проводимости, $\varphi_T = \frac{kT}{q}$ – тепловой потенциал, ζ – химический потенциал.</p> <p>Роль уровня Ферми удобно проиллюстрировать на зонной диаграмме равновесного p-n перехода (рис. 1), где химический ζ и электрический потенциал φ по толщине перехода меняется, но электрохимический потенциал μ остается постоянным:</p> $\frac{\mu}{q} = \varphi + \zeta = \varphi + \varphi_T \ln\left(\frac{N_c}{n}\right) = \text{const}$ <p>Химический потенциал электрически заряженных частиц называют электрохимическим потенциалом.</p> <p>Химический потенциал в общем случае имеет смысл изменения энергии термодинамической системы при изменении её массы на одну единицу или изменение энергии при добавлении одной частицы в систему без совершения работы. Переход электрона из зоны валентной в зону проводимости как раз и описывается химическим ζ потенциалом, а если этот электрон перешел из n-области в p-область, то в этом процессе участвовал и электрический потенциал φ. Экспонента в формуле для концентрации n определяет вероятность этих переходов</p> <p>Практически разделение электрохимического потенциала на две части оказывается хорошим приближением в случае заряженных частиц малой массы.</p> <p>Разность электрических потенциалов в равновесном p-n переходе составляет величину</p>	

барьера ($\sim 0,7-0,9$ В).

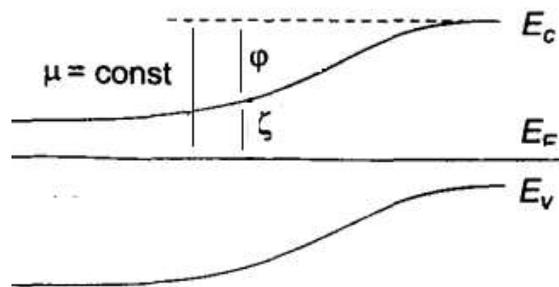


Рис.6.1. Зонная диаграмма равновесного p-n-перехода

Задание №7 – вопрос (5 баллов)

7.1	Классификация механизмов поляризации диэлектриков.
7.2	Объясните понятие тангенса угла диэлектрических потерь.
7.3	Зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты электрического поля.
7.4	Диэлектрические потери в твердых диэлектриках.
7.5	Электропроводность твердых диэлектриков на переменном токе.
7.6	Зависимость электропроводности твердых диэлектриков от температуры.
7.7	Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для полярных диэлектриков.
7.8	Сегнетоэлектрики и их характерные свойства. Диэлектрический гистерезис.
7.9	Электрическая прочность диэлектриков. Виды пробоев диэлектриков.
7.10	Электрический и электротепловой пробой твердых диэлектриков.

Пример выполнения Задания 7.4

Твердые неполярные диэлектрики, не содержащие примесей, обладают малыми диэлектрическими потерями. К таким диэлектрикам относятся полимеры – полиэтилен, политетрафторэтилен (фторопласт), полистирол и другие. Твердые диэлектрики, состоящие из полярных молекул, представляют собой в основном органические вещества: полярные полимеры – ПВХ, эпоксидные, кремнийорганические и фенолформальдегидные и др. смолы, композиционные материалы: текстолит и гетинакс и др. Все они, благодаря дипольно-релаксационному механизму поляризации, имеют большие потери, особенно на радиочастотах, т.е. выше сотен кГц. В веществах с кристаллической структурой и плотной упаковкой ионов, например в чистом оксиде алюминия (сапфир), диэлектрические потери весьма малы и сравнимы с потерями неполярных диэлектриков. Однако при повышении температуры в оксидах проявляются потери на электропроводность. Оксиды кремния, алюминия и кальция входят в состав различных керамических диэлектрических материалов: фарфоров и ультрафарфоров, работающих на высоких частотах. Ионные примеси в керамических диэлектрических материалах, приводящие к возникновению поляризационных токов, резко увеличивают диэлектрические потери. Диэлектрические потери в веществах с ионной структурой и, в особенности, в неорганических стеклах – могут быть значительными. В стеклах, имеющих аморфную структуру, многочисленные слабосвязанные ионы могут совершать перескоки из одной кристаллографической позиции в другую, что может приводить к возникновению не только поляризационных токов, но и токов сквозной проводимости. Релаксационные потери в стеклах определяются широким набором времен релаксации, что является причиной расширения и сглаживания максимумов в температурной и частотной зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь.

Задание №8 – вопрос (5 баллов)

8.1	Объясните понятие эффективной массы электронов и дырок в полупроводниках.
8.2	Чем определяется длина свободного пробега носителей заряда в полупроводниках.
8.3	Объясните работу электронно-дырочного перехода.
8.4	Изобразите распределение примеси, потенциала, электрического поля, контактной разности потенциалов и объемного заряда резкого несимметричного $p-n$ перехода.
8.5	Зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в примесных полупроводниках от температуры.
8.6	Вольтамперная характеристика $p-n$ перехода.
8.7	Неравновесные и равновесные носители заряда в полупроводниках.
8.8	Полупроводник с примесью одного типа, доноры и акцепторы.
8.9	Функция распределения Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в полупроводниках.
8.10	Время жизни и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках.

Пример выполнения Задания 8.4

В несимметричном $p-n$ переходе (в данном случае p -область более легирована, чем n -область) основные носители зарядов стремятся уравновесить концентрацию друг друга и ионизированных примесей с обеих сторон $p-n$ перехода. В результате диффузии часть дырок из p -области переходит в n -область. Эти дырки начинают рекомбинировать с электронами, что приводит к уменьшению концентрации электронов вблизи раздела областей, аналогично из n -области электроны диффундируют в p -область и рекомбинируют с дырками, снижая их концентрацию, см. рис. 8.1.

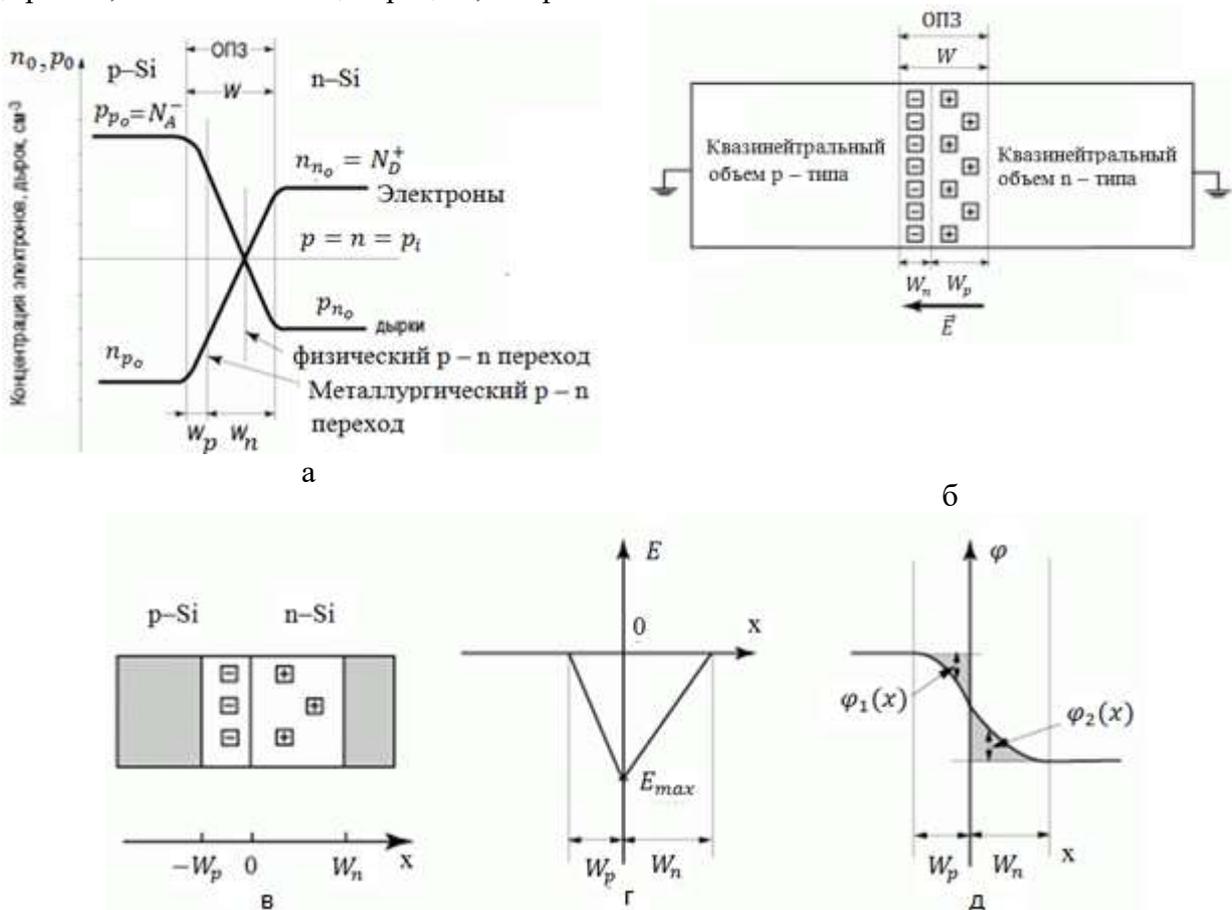


Рис. 8.1. Распределение примесей в $p-n$ переходе – а), области $p-n$ структуры – б), область пространственного заряда $p-n$ перехода – в), распределение напряженности поля – г) и потенциала в $p-n$ переходе – д)

Существует точка, в которой концентрации дырок и электронов равны, эта точка называется физическим $p-n$ переходом (рис. 8.1.а), он смещён в сторону менее легированного полупроводника относительно металлургического $p-n$ перехода (место фактического соединения 2-х полупроводников или 2-х областей, где концентрации доноров и акцепторов равны). После рекомбинации в обедненных областях остаются заряженные ионы примеси, в n -области положительные донорные ионы, в p -области отрицательные акцепторные ионы. Эти ионы образуют область пространственного заряда. Из-за меньшей концентрации в n -области ионов донорной примеси, эта область более протяженная, чем обедненная p -область. Между положительными и отрицательными ионами образуется разность потенциалов, называемая, контактной разностью потенциалов, она препятствует диффузии основных носителей, но способствует переходу неосновных. Значение контактной разности потенциалов U_k зависит от положения уровня Ферми в p и n областях или от концентрации доноров и акцепторов.

$$U_k = \varphi_T \cdot \ln(n_{n_0} p_{p_0} / n_i^2)$$

Если взять производную по координате x , то мы получим напряжённость поля в $p-n$ переходе. Это поле действует только в области обедненной носителями заряда.

Задание №9 – вопрос (5 баллов)

9.1	Методы выращивания кристаллов из жидкой фазы.
9.2	Методы роста кристаллов из расплавов.
9.3	Тигельные методы выращивания монокристаллов. Методы Чохральского.
9.4	Бестигельные методы выращивания монокристаллов. Методы Вернеля, зонной плавки, гарнисажа.
9.5	Методы выращивания монокристаллических пленок. Термовакuumное испарение.
9.6	Эпитаксиальное выращивание пленок. Задачи, решаемые эпитаксиальной технологией.
9.7	Общее представление о зарождении и росте кристаллов. Движущая сила кристаллизации.
9.8	Метод газофазной эпитаксии выращивания слоев кремния.
9.9	Классификация дефектов в кристаллах. Макро- и микродефекты.
9.10	Точечные дефекты. Линейные дефекты. Объемные дефекты. Дефекты эпитаксиальных пленок

Пример выполнения Задания 9.8

Эпитаксиальное выращивание слоев кремния из парогазовой фазы обычно проводят в цилиндрическом, горизонтально расположенном реакторе, из стеклообразного кварца, на помещенной внутри него подложке (рис. 9.1). Подложка находится на держателе. Выращивание кремния проводится в непрерывном потоке парогазовой смеси при высоких температурах. По существу – это газотранспортная химическая реакция.

Для выращивания эпитаксиального кремния можно использовать один из четырехкремнийсодержащих веществ-реагентов (тетрахлорид кремния - SiCl_4 , трихлорсилан - SiHCl_3 , дихлорсилан- SiH_2Cl_2 и силан- SiH_4) и водород, как газ – восстанавливающий перечисленные газы до кремния Si . При таких условиях возможно протекание химических реакций типа $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 = \text{Si}_{\text{ТВ}} + 4\text{HCl}$.

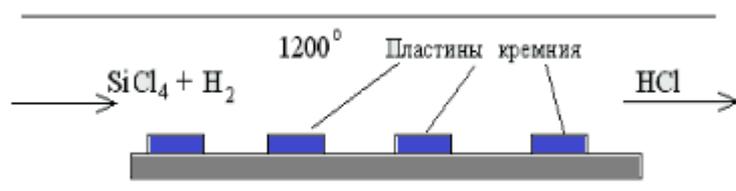


Рис. 9.1. Схема реактора для эпитаксии из парогазовой смеси.

Газ разлагается на поверхности пластины и на нее осаждаются атомы кремния. Все вещества, поступающие в реактор, являются газами, отсюда происходит название "химическое осаждение из газовой фазы".

Задание №10 – вопрос (10 баллов)

10.1	Объясните температурную зависимость положения уровня Ферми в примесном полупроводнике
10.2	Пробой p – n перехода. Анализ туннельного пробоя.
10.3	Методы определения проводимости полупроводниковых материалов.
10.4	Типы полупроводников. Элементарные полупроводники. Бинарные соединения.
10.5	Распределение квантовых состояний в зонах. Распределение Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах.
10.6	Диффузия неравновесных носителей. Длины диффузии.
10.7	Различные типы процессов рекомбинации. Время жизни при излучательной рекомбинации.
10.8	Магнитные эффекты в полупроводниках. Эффект Холла.
10.9	Край собственного поглощения полупроводников. Причины прозрачности и непрозрачности в видимой области спектра диэлектриков и полупроводников соответственно.
10.10	Зонная структура кремния, германия и арсенида галлия и их особенности

Пример выполнения Задания 10.5

Стационарные состояния электрона в идеальном кристалле характеризуются квазиимпульсом p . Для расчета концентраций носителей заряда выделим внутри кристалла единичный объем $dV = 1 \text{ см}^3$. Тогда, согласно квантовой механике, получим $dp \leq h^3$. Это означает, внутри объема $dp = h^3$ в зоне Бриллюэна может иметь место только одно квантовое состояние, которое размыто по всему этому объему. h^3 - это объем, в который можно поместить только два электрона с разными спинами. Поэтому число квантовых состояний на единицу объема кристалла равно dp/h^3 . Согласно принципу Паули, не может быть двух электронов с одним импульсом, если у них одинаковые спины. При заполнении зоны проводимости электронами заполняются вначале самые нижние уровни. Заполнение зоны Бриллюэна начинается с самых малых значений квазиимпульса p . Поэтому dp - элемент объема, заключенный между двумя очень близкими изоэнергетическими поверхностями (см. рис. 10.1.б). Внутри этого тонкого шарового слоя радиусом p и толщиной dp число квантовых состояний dN будет равно:

$$dN = \frac{4\pi p^2 dp}{h^3}$$

Можно показать, что плотность состояний подчиняется закону \sqrt{E} .

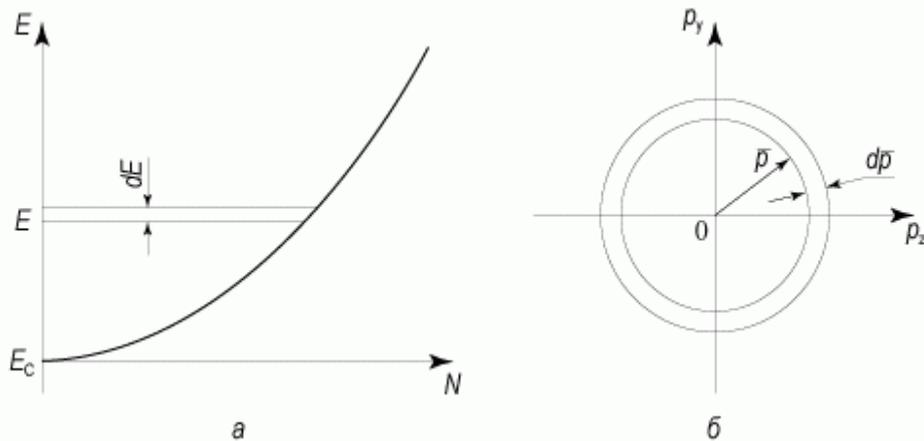


Рис. 10.1. Диаграмма для расчета плотности квантовых состояний:
 а) - распределение электронов по энергии в зоне проводимости;
 б) - зона Бриллюэна для расчета плотности состояний

Распределение Ферми-Дирака

Электроны, как частицы, обладающие полуцелым спином, подчиняются статистике Ферми-Дирака. Вероятность того, что электрон будет находиться в квантовом состоянии с энергией E , выражается функцией Ферми-Дирака:

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

Здесь E_F – электрохимический потенциал, или уровень Ферми. Из последней формулы видно, что уровень Ферми можно определить как энергию такого квантового состояния, вероятность заполнения которого равна 1/2.

Концентрация электронов и дырок в зонах

Концентрация электронов в зоне проводимости равна:

$$n = 2 \int_{E_c}^{\infty} N_c(E) f(E, T) dE,$$

Здесь множитель 2 в предыдущем выражении появляется из-за спина электрона. Можно показать, что для концентрации n электронов

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

а концентрация дырок в валентной зоне

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right),$$

где E_v – энергия, соответствующая потолку валентной зоны, а E_c – энергия, соответствующая дну зоны проводимости.

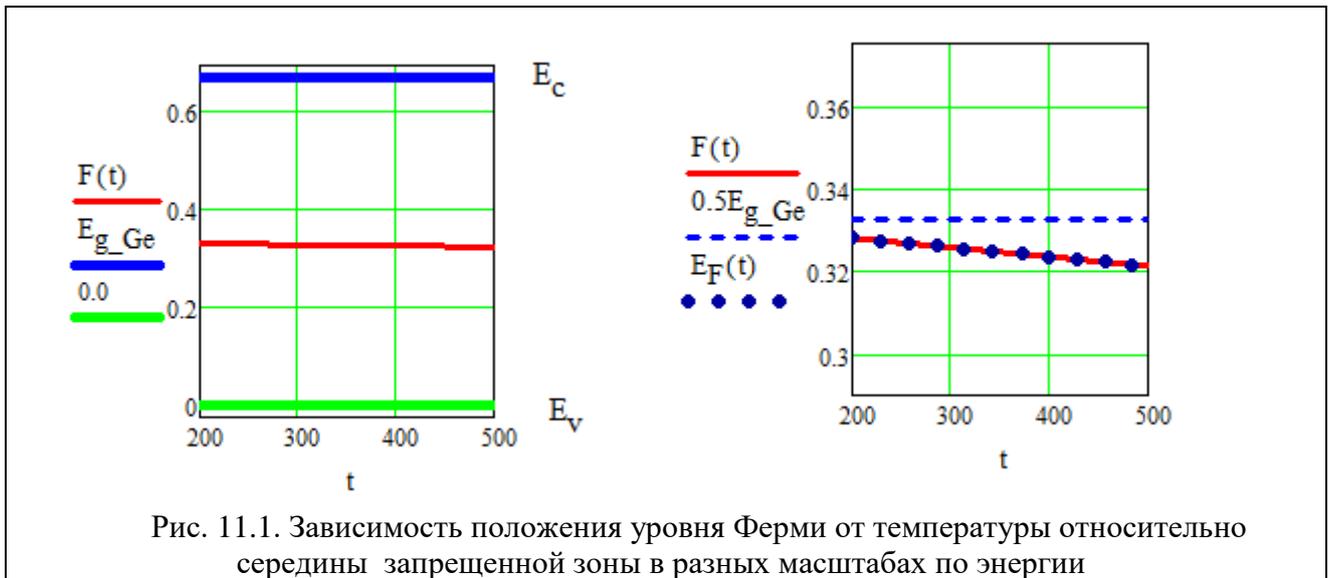
Задание №11 – задача (10 баллов)	
11.1	Вычислить положение уровня Ферми при $T = 300$ К в кристаллах кремния, $E_g=1,12$ эВ, содержащих $2 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ атомов мышьяка и 10^{16}см^{-3} атомов галлия ($N_C(300)=2,8 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
11.2	Вычислите вероятность нахождения электронов в собственном кремнии, $E_g=1,12$ эВ, на уровнях $E_F + 0,6$ эВ и $E_F - 0,6$ эВ при температуре 300К. Ответ можно представить в общем виде ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
11.3	Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300 К, если известно, что ширина его запрещенной зоны $E_g=0,67$ эВ, а эффективные массы для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны: $m_p=0,388m_0$, $m_n=0,55m_0$, где $m_0=9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса свободного электрона. Можно воспользоваться тем, что плотности состояний $N_V(300)=6,051 \cdot 10^{24} \text{м}^{-3}$, $N_C(300)=1,021 \cdot 10^{25} \text{м}^{-3}$, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж*с
11.4	p и n области кремниевого диода с резким переходом имеют удельное сопротивление 0,013 и 44,5 [Ом·см] соответственно. Изобразите схематически энергетическую диаграмму такой структуры ($n_i(300)=0,7 \cdot 10^{10} \text{см}^{-3}$, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
11.5	Определить положение уровня Ферми при $T=300$ К в кристаллах германия, $E_g=0,67$ эВ, легированных мышьяком до концентрации 10^{23}м^{-3} ($N_C(300)=1,021 \cdot 10^{25} \text{м}^{-3}$, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
11.6	В собственном германии ширина запрещенной зоны при температуре 300 К равна 0,665 эВ. Насколько надо повысить температуру, чтобы число электронов в зоне проводимости увеличилось в два раза? Температурным изменением эффективной плотности состояний для электронов и дырок при расчете пренебречь ($N_V(300)=6,051 \cdot 10^{24} \text{м}^{-3}$, $N_C(300)=1,021 \cdot 10^{25} \text{м}^{-3}$, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
11.7	Найти концентрацию собственных носителей заряда в полупроводниках: Si, Ge, GaAs. Как влияет температура на положение этого уровня? Для германия: $N_V(300)=6,051 \cdot 10^{24} \text{м}^{-3}$, $N_C(300)=1,021 \cdot 10^{25} \text{м}^{-3}$, для кремния $N_V(300)=1,0 \cdot 10^{25} \text{м}^{-3}$, $N_C(300)=2,8 \cdot 10^{25} \text{м}^{-3}$, Для GaAs $N_V(300)=9,8 \cdot 10^{23} \text{м}^{-3}$, $N_C(300)=5,8 \cdot 10^{22} \text{м}^{-3}$ ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
11.8	Определить вероятность заполнения электронами энергетического уровня, расположенного на $10 kT$ выше уровня Ферми.
11.9	Определить, на сколько различаются вероятности заполнения электронами нижнего уровня зоны проводимости в собственном германии и собственном кремнии: при 300 К. Ширина запрещенной зоны при температуре 300 К германия равна 0,665 эВ, кремния – 1,12 эВ.
11.10	Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при $T=300$ К, если ширина его запрещенной зоны $E_g=1,12$ эВ, а эффективные массы $m_n=1,05m_0$, $m_p=0,56m_0$. $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
Пример выполнения Задания 11.3	
Если известны плотности состояний, то:	
$N_C(300) = 1,021 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$	Эффективная плотность состояний в зоне проводимости при комнатной температуре (300К)

$N_V(300) = 6,051 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	Эффективная плотность состояний в валентной зоне при комнатной температуре (300K)
$\varphi_T(T) = \frac{k \cdot T}{q}, \text{ эВ}$	Тепловой потенциал $\varphi_T(300) = 0,026 \text{ эВ}$
$E_F(T) = \frac{E_{g_Ge}}{2} + \frac{\varphi_T(T)}{2} \cdot \ln\left(\frac{N_V(T)}{N_C(T)}\right)$	Формула для расчета зависимости уровня Ферми от температуры
$\frac{\varphi_T(T)}{2} \cdot \ln\left(\frac{N_V(T)}{N_C(T)}\right) = -6,771 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$	Ответ: отклонение положения уровня ферми от середины запрещенной зоны
Задача решена	

Если воспользоваться значениями эффективных масс:

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$	Постоянная Больцмана
$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$	Масса электрона
$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж*с}$	Постоянная Планка
$E_{g_Ge} = 0,665 \text{ эВ}$	Ширина запрещенной зоны в германии
$m_{n_Ge} = 0,55 \text{ отн. ед.}$	Эффективная масса электронов в германии в относительных единицах (относительно массы свободного электрона)
$m_{p_Ge} = 0,388 \text{ отн. ед.}$	Эффективная масса дырок в германии в относительных единицах (относительно массы свободного электрона)
$N_C(T) = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot m_{n_Ge} \cdot m_e \cdot k \cdot T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$	Эффективная плотность состояний в зоне проводимости
$N_V(T) = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot m_{p_Ge} \cdot m_e \cdot k \cdot T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$	Эффективная плотность состояний в валентной зоне
$E_F(T) = \frac{E_{g_Ge}}{2} + \frac{\varphi_T(T)}{2} \cdot \ln\left(\frac{N_V(T)}{N_C(T)}\right)$	Формула для расчета зависимости уровня Ферми от температуры
$F(T) = \frac{E_{g_Ge}}{2} + \frac{3 \cdot k \cdot T}{4 \cdot q} \cdot \ln\left(\frac{0,388}{0,55}\right), F(300) = 0,326$	Преобразованная формула для расчета зависимости уровня Ферми от температуры

На рис. 11.1 показаны зависимости положения уровня Ферми от температуры относительно дна зоны проводимости и середины ширины запрещенной зоны



Задание №12 – вопрос (10 баллов)	
12.1	Объясните физические принципы работы униполярных приборов
12.2	Полупроводниковые структуры, содержащие два и более р-п переходов. Физические явления в них, энергетические диаграммы, характеристики, свойства.
12.3	Объясните понятие невырожденные полупроводники.
12.4	Контактные явления. Работа выхода, термоэлектронная эмиссия, контактная разность потенциалов, контакт металл-металл.
12.5	Охарактеризуйте диффузию и дрейф неравновесных носителей в полупроводниках.
12.6	Анализ р – п перехода в равновесном состоянии. Математическая модель р – п перехода.
12.7	Объясните температурную зависимость положения уровня Ферми в примесном полупроводнике
12.8	Объясните процессы рекомбинации носителей заряда в полупроводниках.
12.9	Модели биполярных транзисторов. Модель Эберса-Мола.
12.10	Анализ идеальной МДП-структуры. Физические принципы работы униполярных приборов.

Пример выполнения задания 12.7

Положение уровня Ферми в легированных или примесных полупроводниках может быть найдено из условия электронейтральности кристалла. Если полупроводник донорный, то при наличии малого количества акцепторных примесей, поскольку полупроводник никогда нельзя очистить полностью от малого количества любых примесей $N_d \gg N_a$. Для донорного полупроводника это условие при температуре 0 К приводит к заполнению акцепторных уровней электронами, перешедшими с донорных уровней (рис. 12.1). Количество электронов на донорных уровнях равно $N_d - N_a$. Остальные донорные атомы не ионизированы.

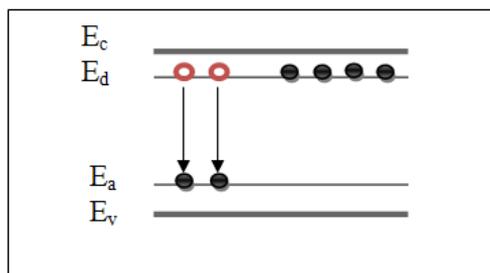


Рис. 12.1. Переход электронов с донорных уровней на акцепторные

При ненулевой температуре ($T > 0\text{K}$) условие электронейтральности имеет вид

$$(n_0 + n_d) - (p_0 - p_a) = N_d - N_a,$$

где n_0 – концентрация электронов в зоне проводимости, обусловленная переходами электронов из валентной зоны, не показаны на рис. 12.1;

p_0 – концентрация дырок в валентной зоне, обусловленная переходами электронов из валентной зоны, не показаны на рис. 12.1;

n_d – концентрация электронов в зоне проводимости, перешедших с донорных уровней;

p_a – концентрация дырок в валентной зоне, перешедших с акцепторных уровней.

Условие $N_d \gg N_a$ упрощает расчеты, можно принять, что $N_a = 0$, тогда при достаточно низких температурах только донорные атомы передадут электроны в зону проводимости (рис. 12.2).

$$n = n_d = N_d^+.$$

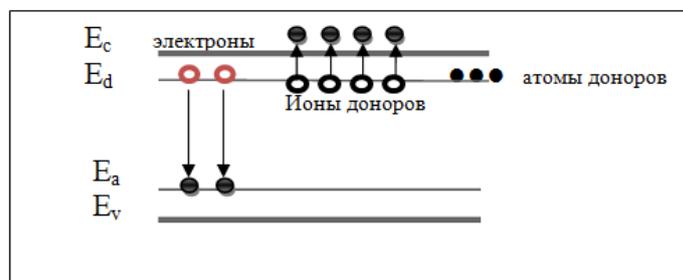


Рис. 12.2. Переход электронов с донорных уровней в зону проводимости

Концентрация электронов на уровне донорной примеси (неионизированных атомов доноров) определяется с помощью распределения Ферми-Дирака, количество положительных ионов донорной примеси дополняет это значение до общего количества атомов донорной примеси.

При полной ионизации атомов донорной примеси $N_d^+ = N_d$, т.е. при более высокой температуре

$$(n_0 + n_d) - (p_0) = N_d$$

Концентрации n_0 и p_0 выражаются через плотности состояний N_C и N_V .

Подстановка в условие электронейтральности концентраций электронов и дырок, а также концентрации электронов на донорных уровнях приводит к уравнению относительно положения уровня Ферми E_F .

Уравнение ввиду его сложности обычно в общем виде не решают, а ограничиваются рассмотрением частных случаев. Общий вид зависимости уровня Ферми E_F от температуры представлен на рис. 12.3.

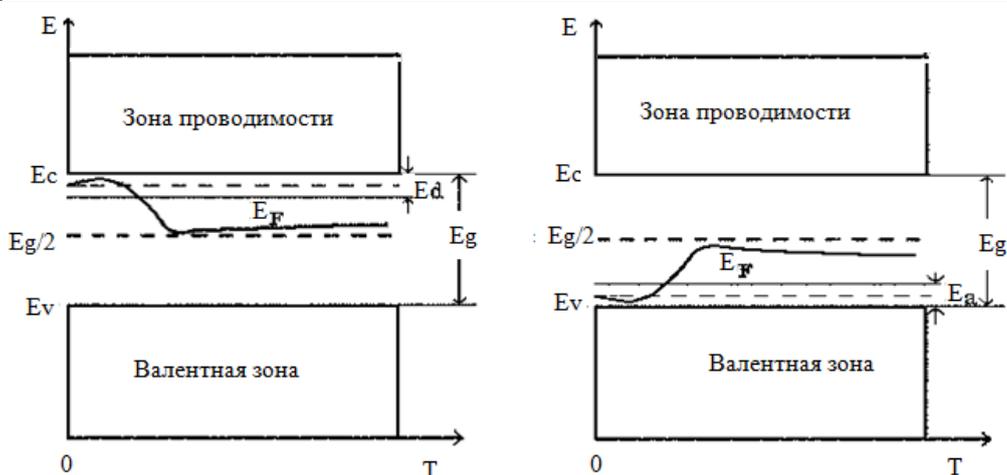


Рис. 12.3. Зависимости положения уровня Ферми от температуры для полупроводников n – а) и p – б) типов

Из уравнения следует, что при абсолютном нуле температуры энергия Ферми донорного полупроводника находится строго посередине между дном зоны проводимости и донорными уровнями.

Уровень Ферми с повышением температуры сначала смещается к зоне проводимости, а затем – к валентной зоне (рис.12.3).

Аналогично можно получить выражение для температурной зависимости уровня Ферми в акцепторном полупроводнике.

Задание №13 – задача (10 баллов)

13.1	Уровень Ферми в полупроводнике находится на 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости. Какова вероятность того, что при комнатной температуре энергетические уровни, расположенные на $3kT$ выше зоны проводимости, заняты электронами? ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
13.2	Найти, чему равна собственная концентрация свободных носителей заряда в кремнии Si при комнатной температуре $T=300$ К ($E_g=1,12$ эВ, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $N_V=1,0 \cdot 10^{25}$ м ⁻³ , $N_C=2,8 \cdot 10^{25}$ м ⁻³).
13.3	Кремний Si и легирован донорной примесью до концентрации $N_D=10^{17}$ см ⁻³ . Считая примесь полностью ионизованной, найти концентрацию основных и неосновных носителей заряда при температуре $T=300$ К ($n_i=1,01 \cdot 10^{10}$ см ⁻³).
13.4	Рассчитать положение уровня Ферми ϕ_0 относительно середины запрещенной зоны ϕ_{i0} в кремнии собственной проводимости при температурах $T_1=300$ К и $T_2=77$ К (с учетом различия эффективных масс электронов и дырок) ($m_n=1,08m_0$, $m_p=0,56m_0$, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).
13.5	Найти положение уровня Ферми ϕ_0 в германии p – типа $G_{\text{ср}} \rho=10$ Ом•см при температуре $T=300$ К ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $\mu_p=0,19$ м ² /В•с, $n_i=2,37 \cdot 10^{13}$ см ⁻³).
13.6	Рассчитать положение уровня Ферми ϕ_0 в приближении полностью ионизованной примеси в кремнии n – типа, $\rho=4,5$ Ом•см при температуре $T=300$ К ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $\mu_n=0,13$ м ² /В•с, $n_i=1,01 \cdot 10^{10}$ см ⁻³).
13.7	Найти удельное сопротивление ρ электронного и дырочного кремния Si с легирующей примесью $N_{DA}=10^{16}$ см ⁻³ при комнатной температуре ($\mu_p=0,05$ м ² /В•с, $\mu_n=0,13$ м ² /В•с, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).
13.8	Рассчитать собственное удельное сопротивление ρ_i монокристаллов кремния Si, германия Ge при комнатной температуре ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

	Для Si: $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_n = 0,13 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n_i = 1,01 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Для Ge: $\mu_p = 0,19 \text{ [м}^2/\text{В} \cdot \text{с]}$, $\mu_n = 0,39 \text{ [м}^2/\text{В} \cdot \text{с]}$, $n_i = 7,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.
13.9	Найти концентрацию легирующей акцепторной примеси для кремния Si, при которой наступает вырождение концентрации свободных носителей заряда при комнатной температуре $T = 300 \text{ К}$ (критерием вырождения является соотношение $E_F - E_V \leq kT$) (для кремния $N_V = 1,0 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $N_C = 2,8 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$).
13.10	Кремний Si легирован донорной примесью до концентрации $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Найти граничную температуру $T_{гр}$ при которой собственная концентрация носителей заряда n_i еще ниже концентрации основных носителей заряда n_0 . ($E_g = 1,12 \text{ эВ}$, $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$, $N_V = 1,0 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $N_C = 2,8 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$).

Пример выполнения задания 13.1

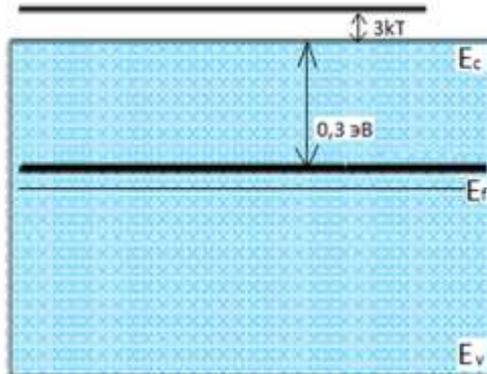


Рис. 13.1. Условие задачи

$f(T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{0,3 + k \cdot \frac{3 \cdot T}{q}}{kT/q}}}$ <p>Ответ $f(300) = 4,59 \cdot 10^{-7}$</p>	<p>Вероятность того, что электрон будет находиться в квантовом состоянии с энергией E, выражается функцией Ферми-Дирака:</p> $f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT/q}\right)}$
<p>Искомый уровень выше дна зоны проводимости, поэтому складываем 0,3 эВ и $3kT/q$.</p>	