

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

к.т.н., доцент, Шкаев А.Г.

- Объем дисциплины и виды учебной работы в часах и зачетных единицах**

Вид занятий	час.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		семестры									
Всего аудиторных занятий:	54				54						
Лекции	36				36						
Лабораторные работы	18				18						
Самостоятельная работа:	90				90						
Домашнее задание	10				10						
Проработка лекций, подготовка к лекциям	80				80						
Часы на экзамен	36				36						
Всего по дисциплине	180/5				180/ 5						
Вид аттестации за семестр (экзамен)	экз.				экз.						

Литература

Литература по лекциям

- **Гуртов В.А. Твердотельная электроника. М.: Техносфера, 2007. – 408 с. (ОУЛ 13 экз.)**
- **Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. - М.: Высш. Шк., 1986. – 304 с. (ОНЛ 5 экз., 8-К 1 экз.)**
- **З и С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. - М.: Мир, 1984. – 430 с. (ОНЛ 3 экз., 8-К 1 экз.)**
- **Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 570 с. (ОУЛ 21 экз. ОНЛ 5 экз., 8-К 1 экз.)**

Литература для лабораторных работ

- **Физические основы электроники: лабораторный практикум / В.А. Захаренко, А.Г. Шкаев. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 68 с. (ОУЛ 40 экз.)**
- **Шкаев А.Г. Твердотельная электроника. Методические указания. Омск: ОмГТУ, 2009. – 27 с. (ОУЛ 70 экз.)**

Литература для домашних работ

- **Степанченко И.П. Основы микроэлектроники. 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Лаб. Базовых Знаний ; СПб. : Нев. Диалект, 2001. - 488 с. (8-К 1 экз.)**
- **Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. - М.: Сов. Радио, 1989. – 360 с. (ОНЛ 1 экз., 8-К 2 экз.)**
- **Гребнев А.К., Гридин В.Н., Дмитриев В.П. Оптоэлектронные элементы и устройства. - М.: Радио и связь, 1998. – 336 с. (ОУЛ 14 экз.)**
- **Алексеев П.Д., Колесникова Т.П. Физика твердого тела в задачах: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. – 80 с. (ОУЛ 8 экз.)**
- **Степанченко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. - М.: Энергия, 1977. – 280 с. (ОУЛ 40 экз.)**

Периодическая литература

- **Сенсор: Ежекварт. научн.-техн. журн. – М.: Ред. журн. АНО «ИРИСЭН», - Выходит ежеквартально.**
- **Датчики и системы: Ежемес. научн.-техн. и произв. журн. - М.: Ред. журн. ООО «СенСиДат», - Выходит ежемесячно.**

Лабораторный практикум:

Номер	Темы курса лабораторных работ	Час.
1	Исследование реальной структуры кристаллов металлографическим методом.	2
2	Определение контактной разности потенциалов между металлом и полупроводником.	2
3	Определение ширины запрещенной зоны полупроводника.	2
4	Изучение туннельного диода.	2
5	Изучение полупроводников с помощью эффекта Холла.	2
6	Изучение полупроводниковых диодов.	2

- **Примерные темы домашних работ**

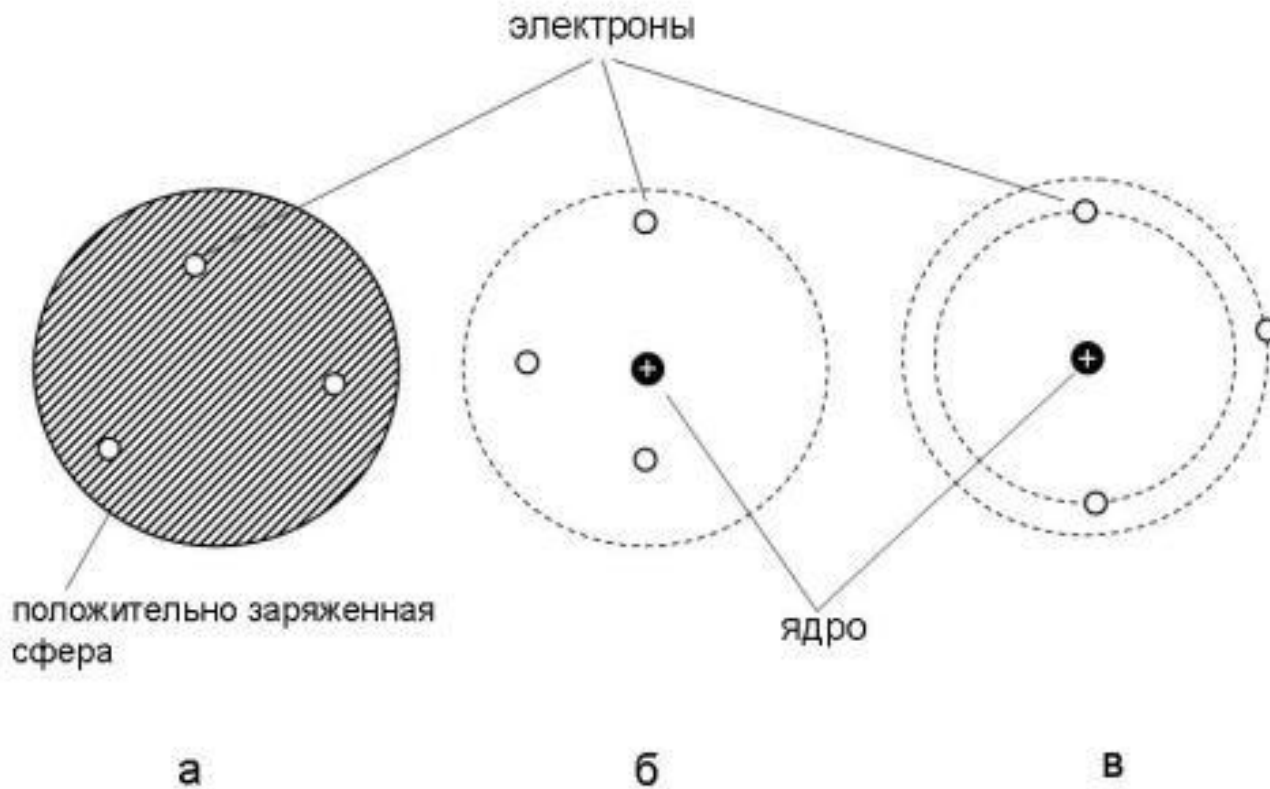
- Кремниевые диоды.
- Германиевые диоды.
- Диоды шотки.
- Туннельные диоды.
- Биполярные транзисторы.
- Полевые транзисторы.
- Тиристоры.
- Семисторы.
- Варисторы.
- Варикапы.
- Фотодиоды.
- Фоторезисторы.
- Фототранзисторы.
- Светодиоды.
- Лазерные диоды.

Контрольные вопросы по дисциплине:

- Электронное строение атома. Модель Бора.
- Орбитали. Расчет количества электронов на оболочке.
- Собственный полупроводник. Уровень Ферми. Собственная проводимость.
- Примеси в полупроводниках. Электронная и дырочная проводимость.
- Эффекты легирования. Температурная зависимость изменения концентрации основных носителей.
- Рекомбинация электронов и дырок. Уравнение непрерывности.
- Термодинамическая работа выхода.
- Контактные явления в полупроводниках.
- Электронно-дырочный переход. Энергетические диаграммы. Принцип работы.
- ВАХ, эквивалентная схема и характеристики диода (p-n – переход).
- Стабилитрон. ВАХ. Устаб. Рдиф.
- Виды пробоя, характеристики.
- Обращенный диод. ВАХ.
- Туннельный диод. Энергетические диаграммы. Принцип работы. ВАХ.
- Лавинный пробой. Энергетические диаграммы. Принцип работы.
- Барьер Шоттки. Энергетические диаграммы. Принцип работы. ВАХ.
- Контактные явления метал-полупроводник.
- Гетеропереходы. Энергетические диаграммы. Принцип работы. ВАХ.
- Полупроводниковая емкость.
- Варикап. Параметры. Принцип работы. Эквивалентные схемы.
- Тиристоры. Принцип работы. Параметры.
- Симисторы. Принцип работы. Параметры.
- Биполярный транзистор. Энергетические диаграммы. Принцип работы. ВАХ.
- Параметры транзистора как четырехполюсника.
- Полевой транзистор. Зонная структура. Принцип работы. ВАХ.
- Фоторезисторы. Принцип работы. Параметры.
- Фотодиоды. Энергетическая диаграмма. Принцип работы. Параметры.
- Фотоэлементы. Принцип работы. Параметры.
- Эффект Холла.
- Эффект Зеебека.
- Эффект Пельтье.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

- В 1883 году Эдисон, экспериментируя с лампами накаливания, изобрел первый ламповый диод.
- Первый шаг на пути к твердотельной электронике был сделан, когда перед второй мировой войной для детектирования сигналов начали использовать нелинейные свойства контакта металл/полупроводник. Однако официальной датой ее рождения принято считать 1948 г - год первой публикации об изготовлении биполярного транзистора, за изобретение которого Шокли, Бардин и Братейн были удостоены нобелевской премии.
- В начале 70х годов начали выпускаться интегральные схемы (ИС), в которых на одном кристалле изготавливались все основные элементы электронной схемы. С тех пор это направление можно считать основным в развитии твердотельной электроники.
- Твердотельная электроника - наука об электронных процессах в твердом теле и их применении для преобразования энергетических потоков и обработки информации.



Модели

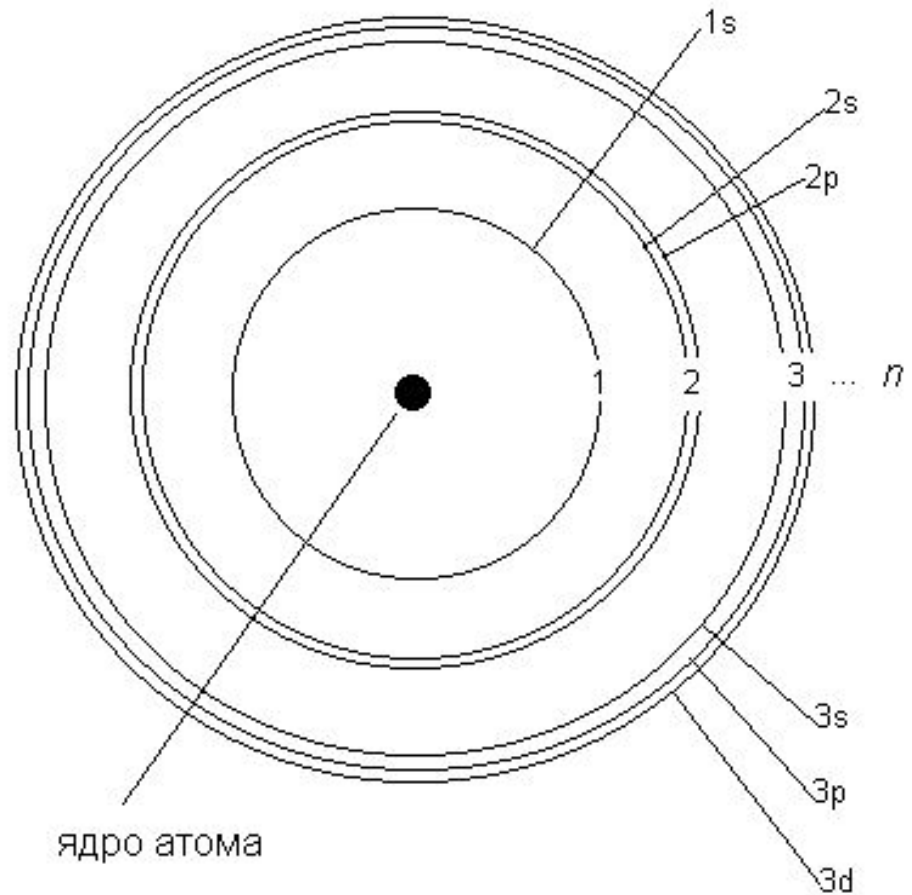
а) Томсона ("сливовый пудинг"),

б) Резерфорда ("электронный рой" в пространстве вокруг ядра),

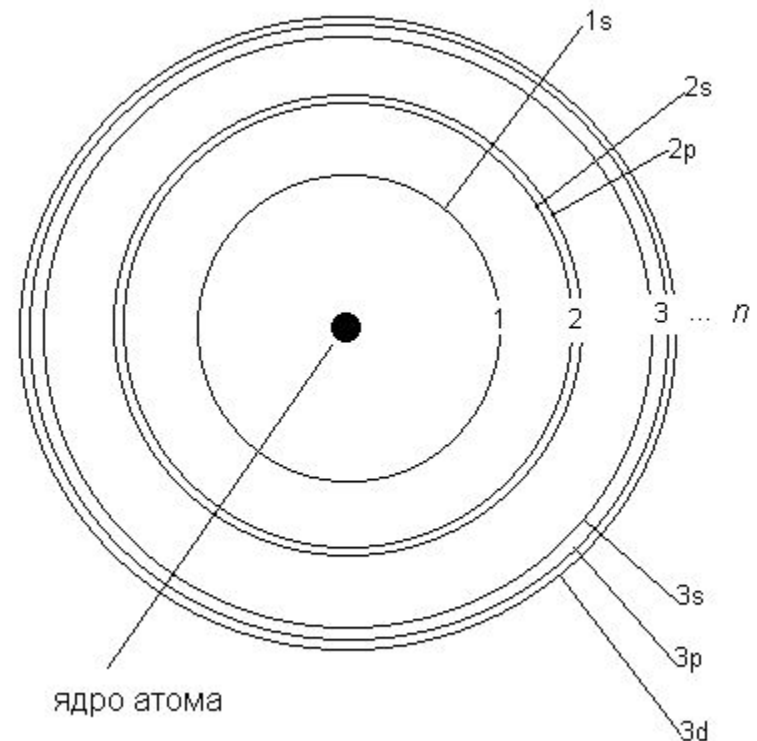
в) планетарная модель Бора.

Квантовая теория строения атома

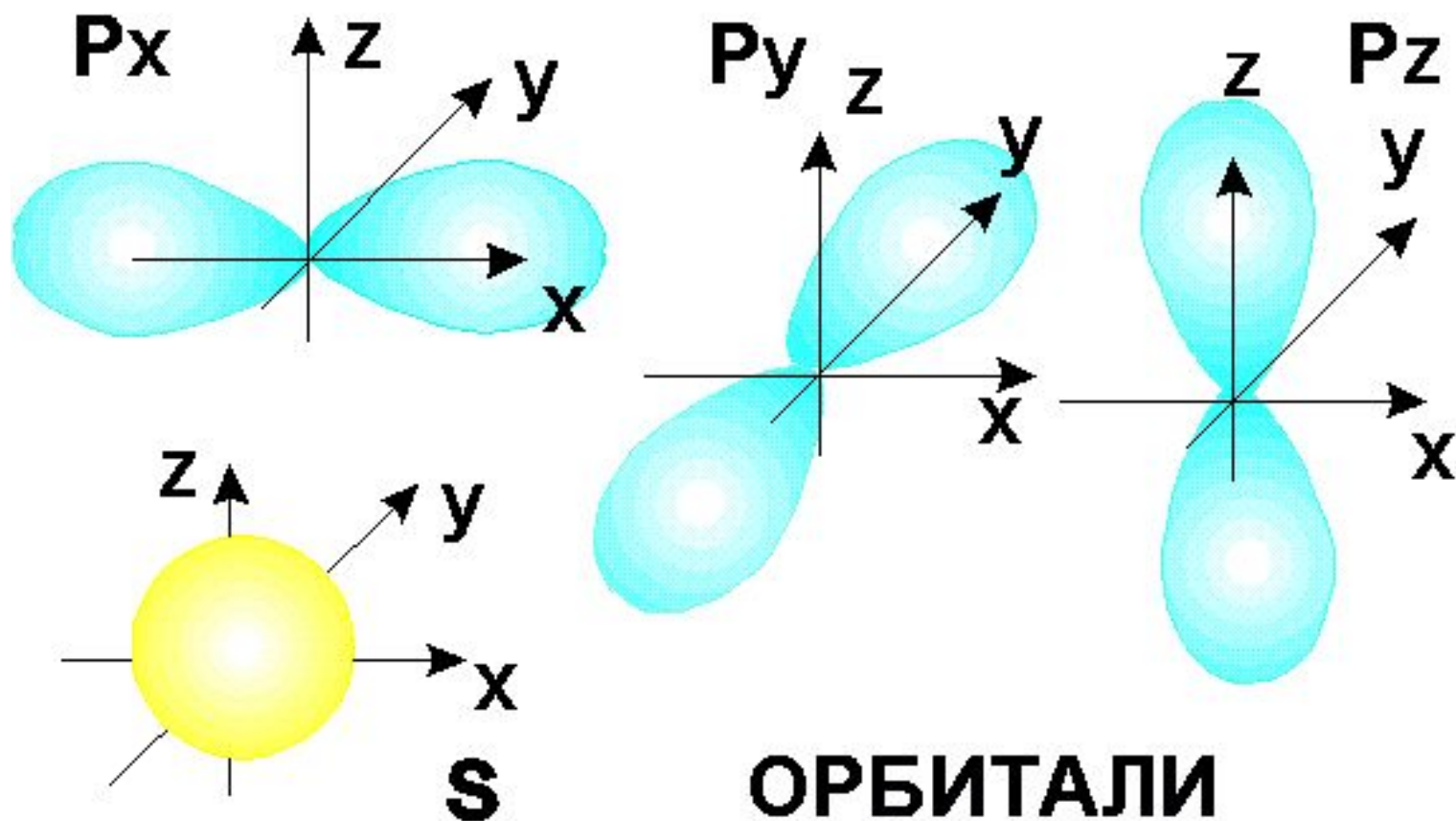
- Согласно современным представлениям электрон обладает волновыми свойствами. Для описания его поведения используют волновую функцию $\Phi(x,y,z)$. Квадрат модуля этой функции характеризует вероятность найти электрон в заданной точке. Область пространства, в которой высока вероятность обнаружить электрон (не менее 0.95), называют орбиталью. Основные типы орбиталей обозначают буквами s, p, d, f (от слов sharp, principal, diffuse, fundamental).



- Орбитали часто называют подоболочками оболочек (характеризующихся **квантовым числом N**), поскольку они характеризуют формы разных орбит, на которых можно обнаружить электроны, находящиеся в одной оболочке.
- Каждая подоболочка характеризуется своим, **орбитальным квантовым числом L** . Оно, так же как и N , целое и может изменяться в пределах от 0 до $(N-1)$. Орбитали одной подоболочки в обычных условиях имеют одинаковые значения энергии.
- **Магнитное квантовое число M** этих дискретных энергетических уровней может принимать целочисленное значение в пределах от $-L$ до L (включительно), т.е. оно может принимать $2L+1$ значений. **Четвертое квантовое число S (спин)** характеризует вращение отдельного электрона и может принимать значения: $+1/2$ и $-1/2$.



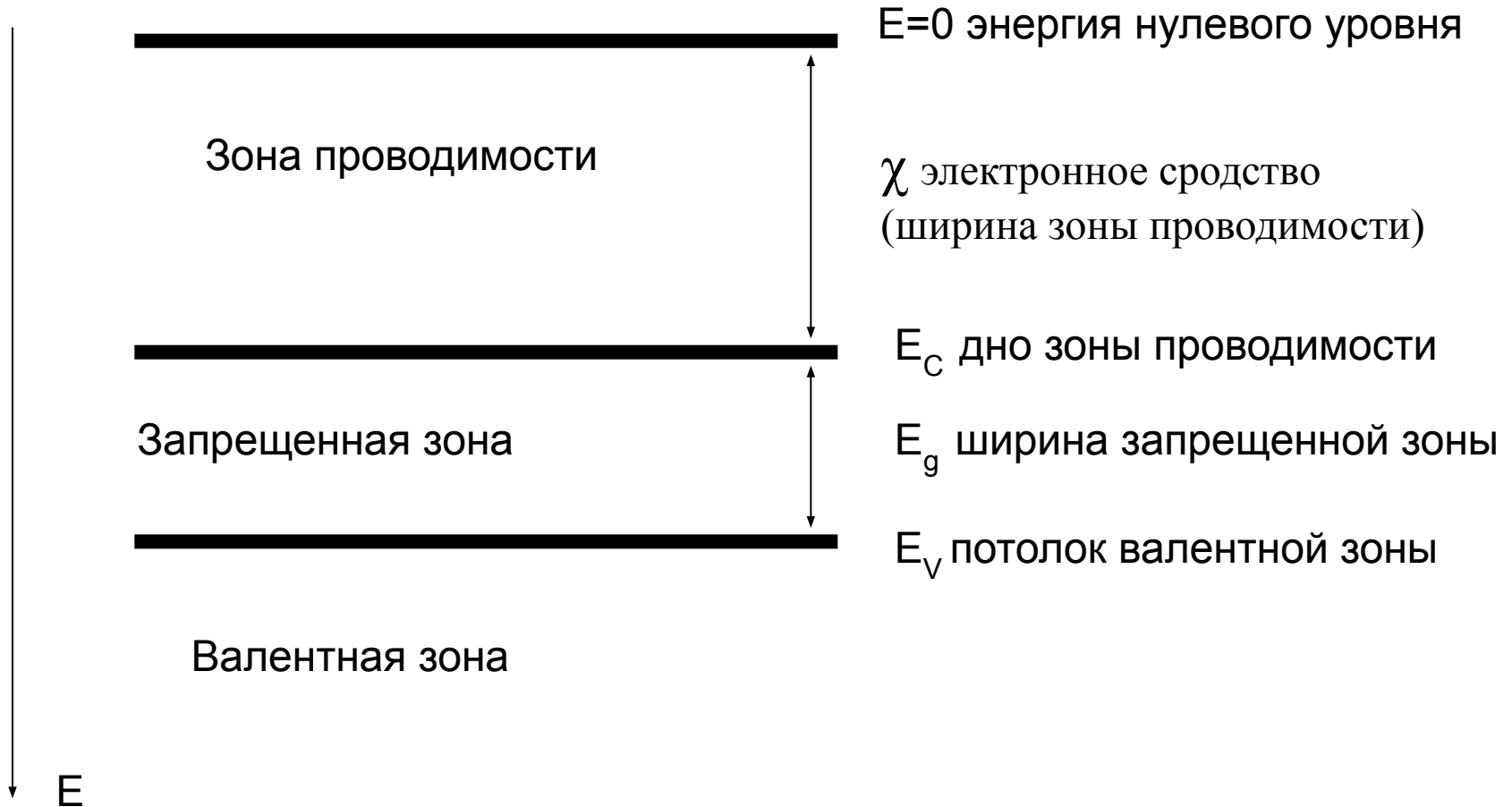
- Вид двух основных типов орбиталей s (она одна), p (их три), по которым размазан электронный заряд, показан на рисунке.



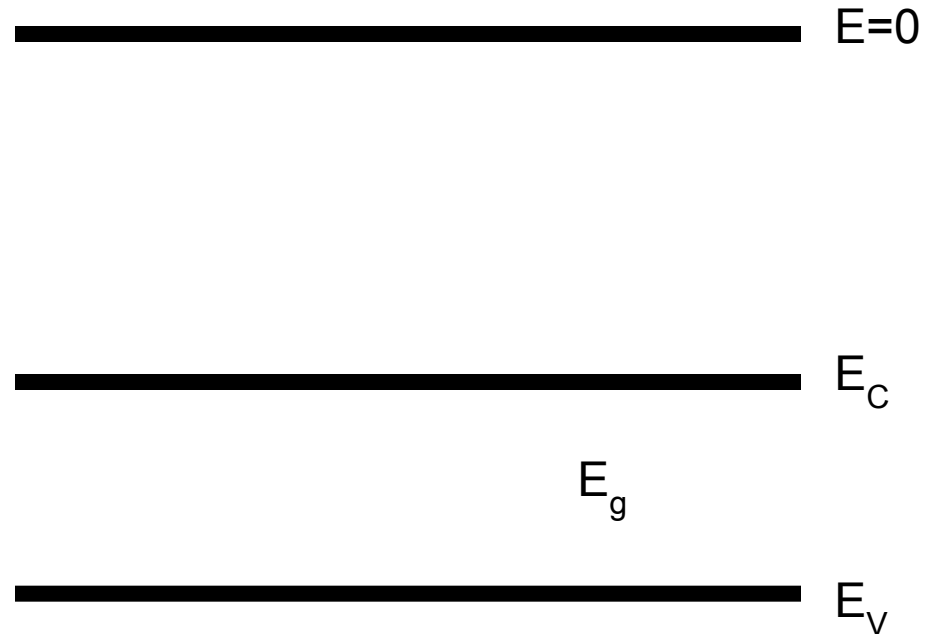
- Каждый электрон в атоме должен иметь свой индивидуальный набор квантовых чисел. Зная главное квантовое число N , легко рассчитать, сколько электронов может находиться на той или иной оболочке и оценить форму возможных орбиталей

Оболочка, N	Подоболочка L=0,..,N-1	Орбитали, M=-L,..,0,..,L	Спин: -1/2, +1/2	Максимальное число электронов подоболочки	Максимальное число электронов оболочки
K (N=1)	S (L=0)	0	+1/2, -1/2	2	2
L (N=2)	S (L=0)	0	+1/2, -1/2	2	8
	P (L=1)	-1	+1/2, -1/2	6	
		0	+1/2, -1/2		
		1	+1/2, -1/2		
M (N = 3)	S (L=0)	0	+1/2, -1/2	2	18
	P (L=1)	-1	+1/2, -1/2	6	
		0	+1/2, -1/2		
		1	+1/2, -1/2		
	D (L=2)	-2	+1/2, -1/2	10	
		-1	+1/2, -1/2		
		0	+1/2, -1/2		
		1	+1/2, -1/2		
		2	+1/2, -1/2		

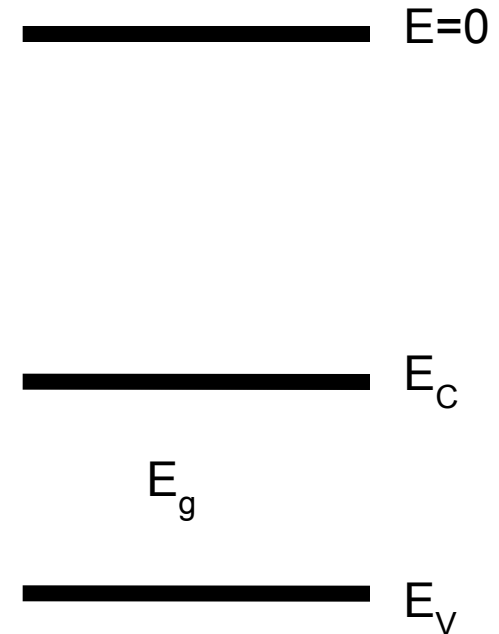
Зонная структура полупроводников



- Наибольшее значение для электронных свойств твердых тел имеют верхняя и следующая за ней разрешенные зоны энергий.
- В том случае, если между ними нет энергетического зазора, то твердое тело с такой зонной структурой является **металлом**.
- Если величина энергетической щели между этими зонами (обычно называемой запрещенной зоной) больше 3 эВ, то твердое тело является **диэлектриком**.
- Если ширина запрещенной зоны E_g лежит в диапазоне $(0,1 \div 3,0)$ эВ, то твердое тело принадлежит к классу **полупроводников**.

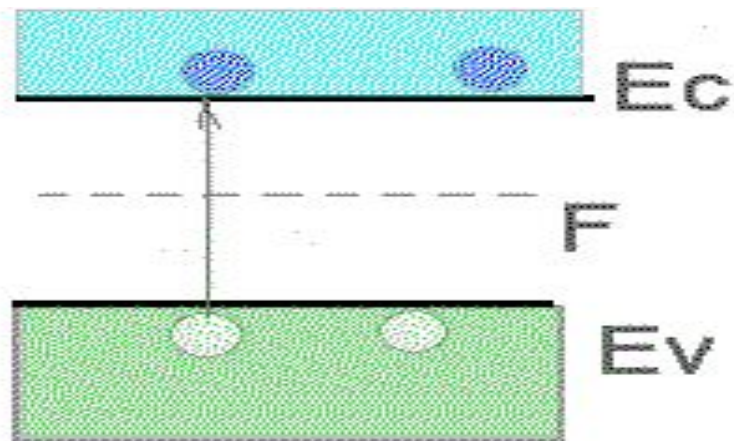


- Поскольку в полупроводниках ширина запрещенной зоны меняется в широком диапазоне, то вследствие этого в значительной мере меняется их удельная проводимость.
- По этой причине полупроводники классифицируют как вещества, имеющие при комнатной температуре удельную электрическую проводимость σ от 10^{-8} до $10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, которая зависит в сильной степени от вида и количества примесей, структуры вещества и внешних условий: температуры, освещения (радиации), электрических и магнитных полей и т.д.
- Для диэлектриков ширина запрещенной зоны $E_g > 3 \text{ эВ}$, величина удельной проводимости $\sigma < 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, удельное сопротивление $\rho = 1/\sigma > 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.
- Для металлов величина удельной проводимости $\sigma > 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

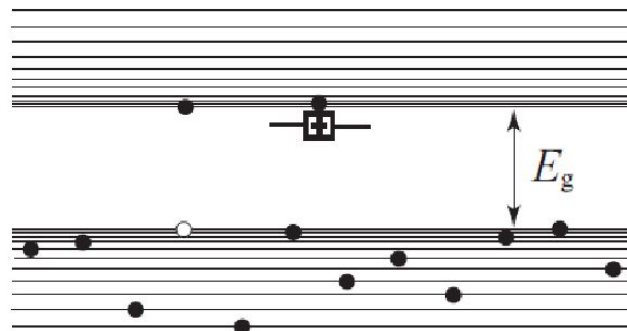


Терминология и основные понятия

- Полупроводники, или полупроводниковые соединения, бывают собственными и примесными.
- **Собственные полупроводники** – это полупроводники, в которых нет примесей (доноров и акцепторов).
- n – концентрация электронов.
- p – концентрация дырок.
- **Дырка** – это способ описания коллективного движения большого числа электронов (примерно 10^{23} см^{-3}) в неполностью заполненной валентной зоне. Электрон – это частица, дырка – это квазичастица. Электрон можно инжектировать из полупроводника или металла наружу (например, с помощью фотоэффекта), дырка же может существовать только внутри полупроводника.
- **Собственная концентрация (n_i)** – концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике (электронов в зоне проводимости n и дырок в валентной зоне p , причем $n = p = n_i$). При $T = 0$ в собственном полупроводнике свободные носители отсутствуют ($n = p = 0$). При $T > 0$ часть электронов забрасывается из валентной зоны в зону проводимости. Эти электроны и дырки могут свободно перемещаться по энергетическим зонам.
- **Легирование** – введение примеси в полупроводник, в этом случае полупроводник называется **примесным**. Если в полупроводник, состоящий из элементов 4 группы (например, кремний или германий), ввести в качестве примеси элемент 5 группы, то получим **донорный** полупроводник (у него будет **электронный тип проводимости**), или полупроводник n -типа. Если же ввести в качестве примеси элемент 3 группы, то получится **акцепторный** полупроводник, обладающий **дырочной проводимостью** (p -тип)



- Энергетическая схема собственного полупроводника

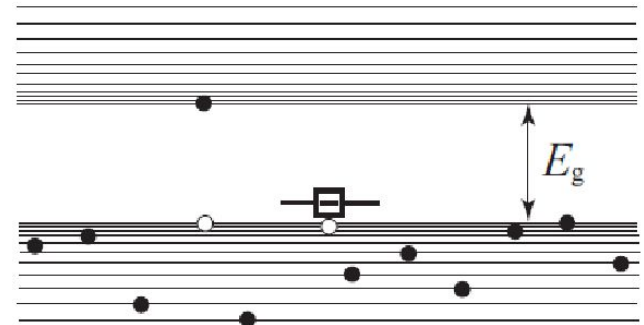


Зона проводимости

Валентная зона



a



б

- Энергетические схемы полупроводников *n*-типа (*a*) и *p*-типа (*б*)

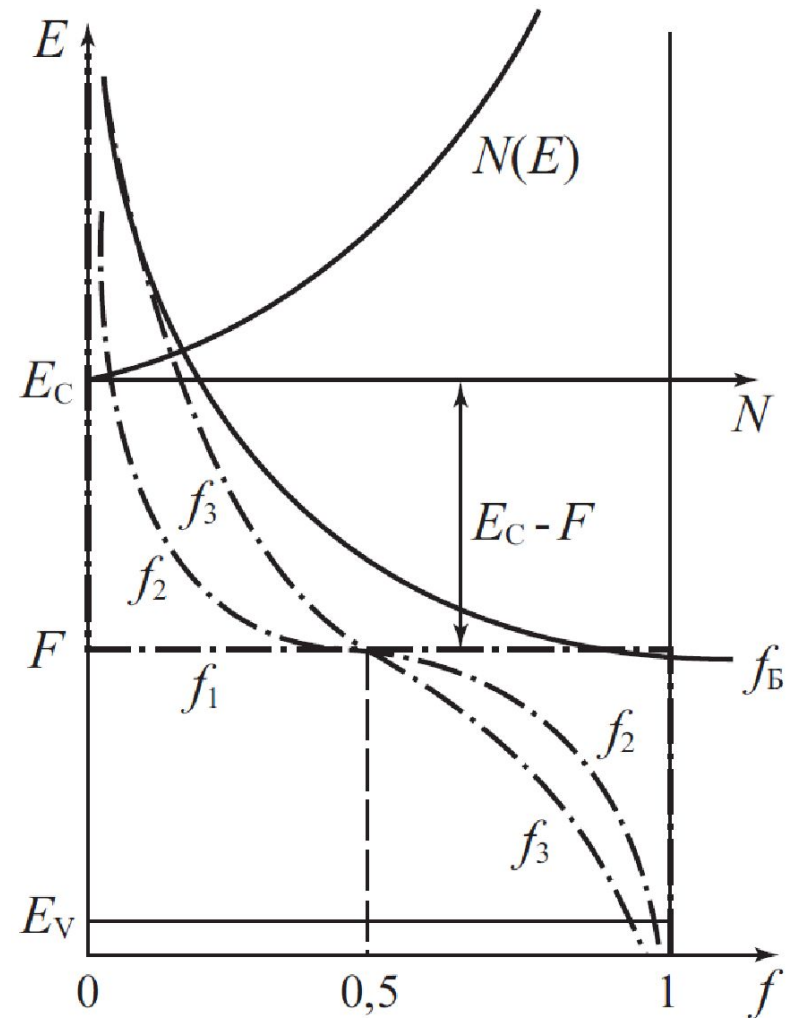
Концентрация носителей заряда и положение уровня Ферми

- 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:

$$f(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-F}{kT}}}$$

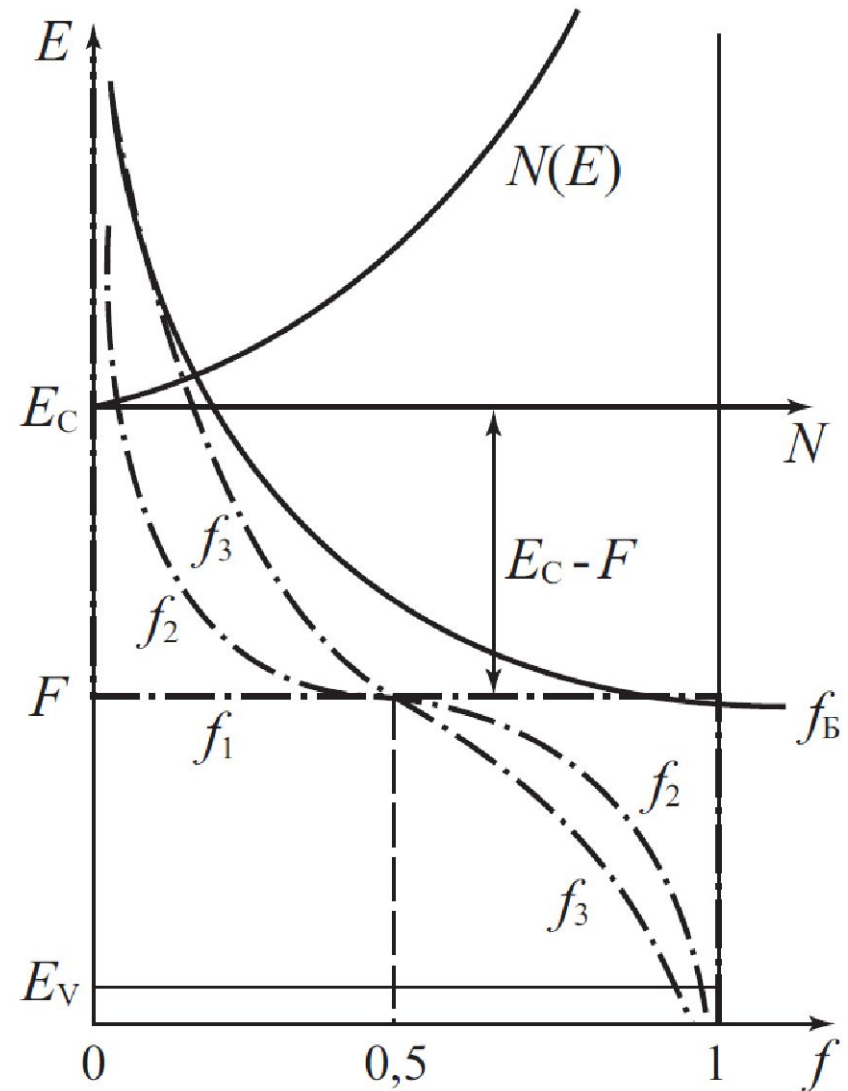
F – электрохимический потенциал, или уровень Ферми.

Уровень Ферми можно определить как энергию такого квантового состояния, вероятность заполнения которого равна 1/2.



- Вычисление различных статистических величин значительно упрощается, если уровень Ферми F лежит в запрещенной зоне энергий и удален от края зоны E_C хотя бы на $2kT$.
- Тогда в распределении Ферми – Дирака единицей в знаменателе можно пренебречь и оно переходит в распределение Максвелла – Больцмана классической статистики.
- Это случай невырожденного полупроводника:

$$f(E, T) = e^{-\frac{E-F}{kT}}.$$



Концентрация электронов в зоне проводимости

$$n = N_C \cdot e^{-\frac{E_C - F}{kT}},$$

Величина N_C получила название эффективной плотности состояний в зоне проводимости.

$$N_C = 2 \cdot \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}.$$

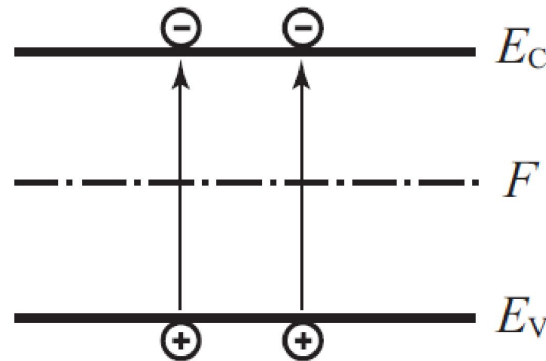
концентрация дырок в валентной зоне

$$p = N_V \cdot e^{-\frac{F - E_V}{kT}}$$

где E_V – энергия, соответствующая потолку валентной зоны, а N_V рассчитывается как N_C , если вместо m_n взять эффективную массу дырки m_p . Величина N_V – эффективная плотность состояний в валентной зоне.

Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике

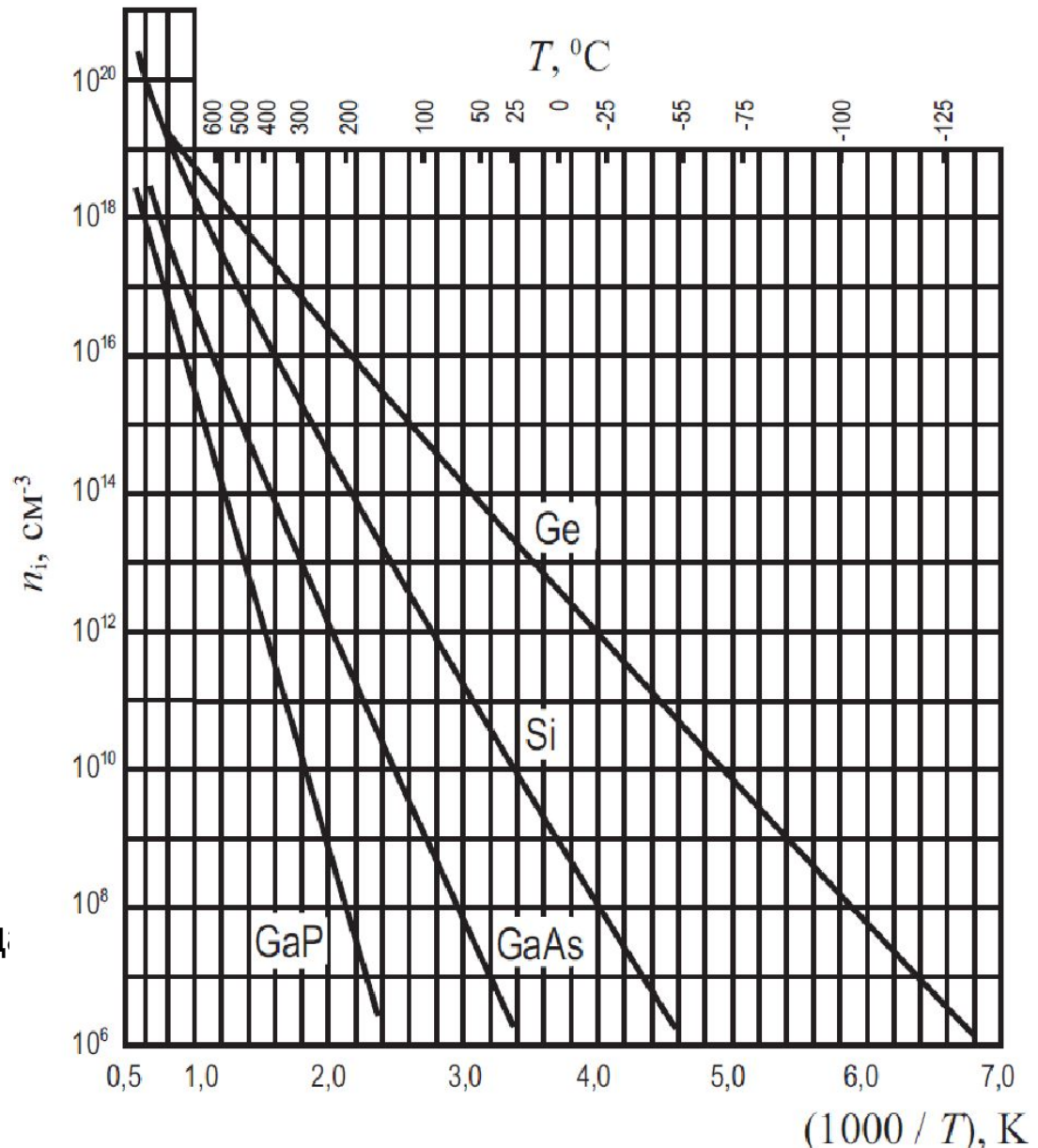
Напомним, что полупроводник называется собственным, если в нем отсутствуют донорные и акцепторные примеси. В этом случае электроны появляются в зоне проводимости только за счет теплового заброса из валентной зоны, тогда $n = p$



При отсутствии внешних воздействий (освещение, электрическое поле и т.д.) будем обозначать концентрации свободных электронов и дырок с индексом нуль, то есть n_0 и p_0 соответственно равновесная концентрация электронов и дырок.

$$n_0 = p_0 = n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

Таким образом концентрация собственных носителей определяется в основном температурой и шириной запрещенной зоны полупроводника. На рисунке представлена зависимость концентрации собственных носителей от температуры для наиболее распространенных полупроводников – кремния, германия, арсенида и фосфида галлия. Видно, что при изменении ширины запрещенной зоны в диапазоне от 0,6 эВ для германия до 2,8 эВ для фосфида галлия, собственная концентрация n_i при комнатной температуре изменяется от значения 10^{13} см^{-3} до 10 см^{-3} .

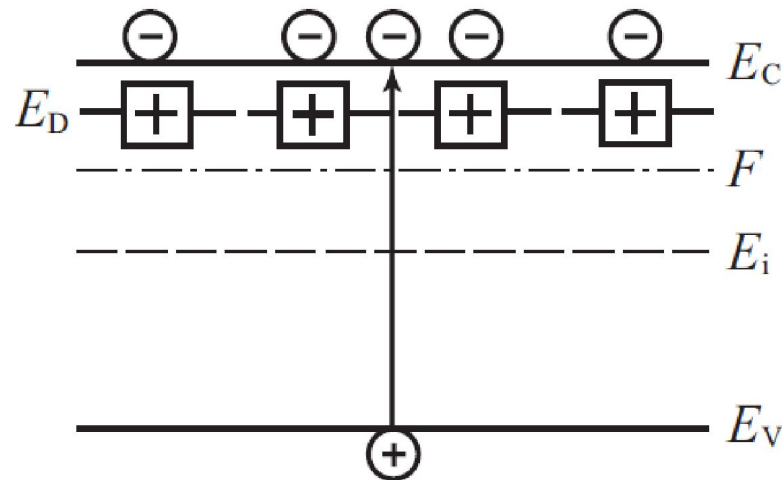


Концентрация электронов и дырок в примесном полупроводнике

Для собственного полупроводника $n_0 \cdot p_0 = (n_i)^2$.

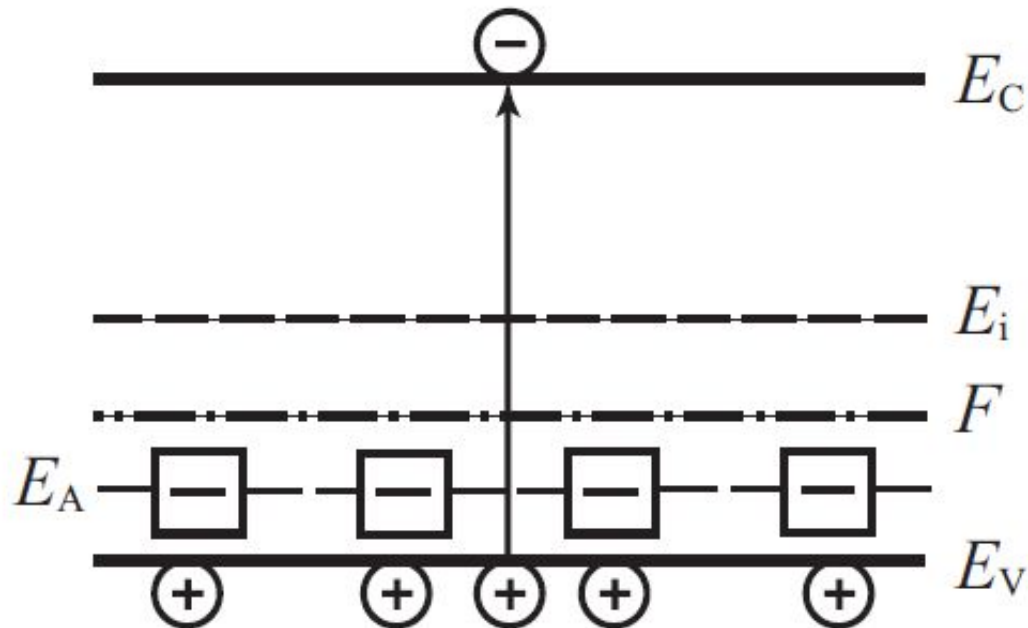
Пусть полупроводник легирован донорами с концентрацией N_D . При комнатной температуре в большинстве полупроводников все доноры ионизованы, так как энергии активации доноров составляют всего несколько сотых электронвольта. Тогда для донорного полупроводника

$$n_0 = N_D \quad p_0 = \frac{n_i^2}{N_D}$$



Соответственно если полупроводник легирован акцепторами с концентрацией N_A , то концентрации основных p_0 и неосновных n_0 носителей будут

$$p_0 = N_A \text{ и } n_0 = \frac{n_i^2}{N_A}$$

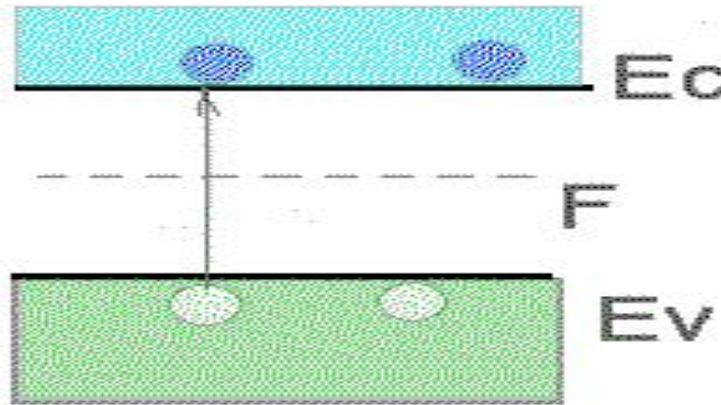


Определение положения уровня Ферми

Для собственного полупроводника уравнение электронейтральности приобретает вид $p - n = 0$ или $p = n$. Если ширина запрещенной зоны полупроводника достаточно велика (E_g много больше kT), и если эффективные массы электронов m_n и дырок m_p одного порядка, то уровень Ферми будет достаточно удален от краев зон ($E_C - F > 2kT$ и $F - E_V > 2kT$) и полупроводник будет невырожденным.

Для этого случая энергия Ферми в собственном полупроводнике находится посреди запрещенной зоны

$$F = \frac{E_C + E_V}{2}$$



При низких температурах уровень Ферми лежит около середины запрещенной зоны и с повышением температуры постепенно смещается к зоне проводимости так как подвижность электронов выше подвижности дырок.

Для невырожденного полупроводника n -типа имеем:

$$F = E_c - kT \cdot \ln \left(\frac{N_c}{n_0} \right)$$

Аналогично для невырожденного полупроводника p -типа

$$F = E_v + kT \cdot \ln \left(\frac{N_v}{p_0} \right)$$

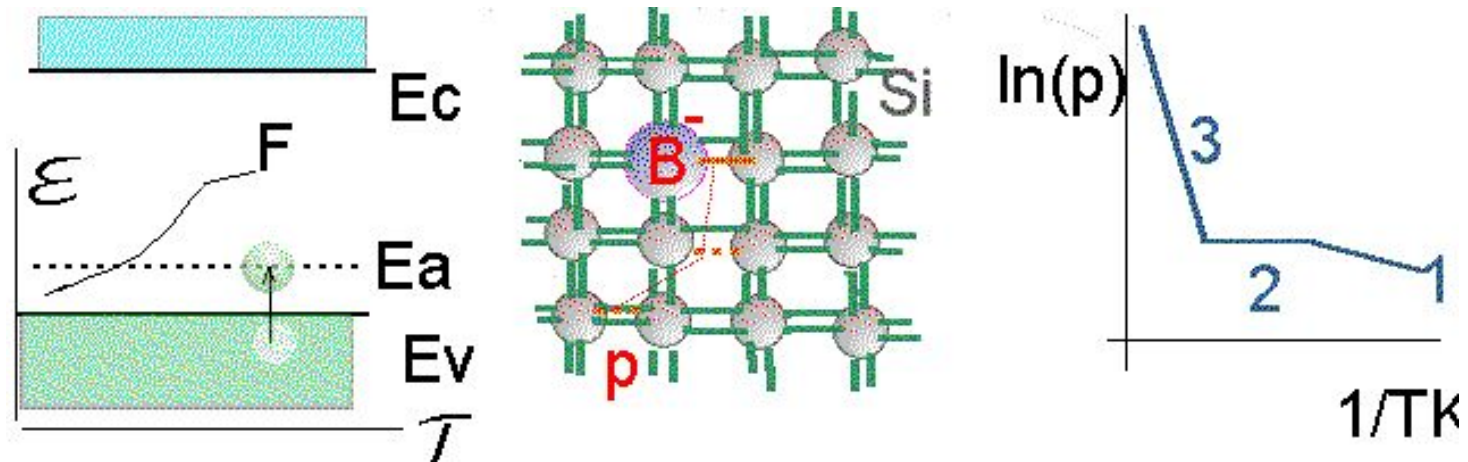
Из этих выражений видно, что чем больше концентрация основных носителей, тем ближе уровень Ферми к краю соответствующей зоны.

Для донорного полупроводника в случае полной ионизации примеси $n_0 = N_D$.

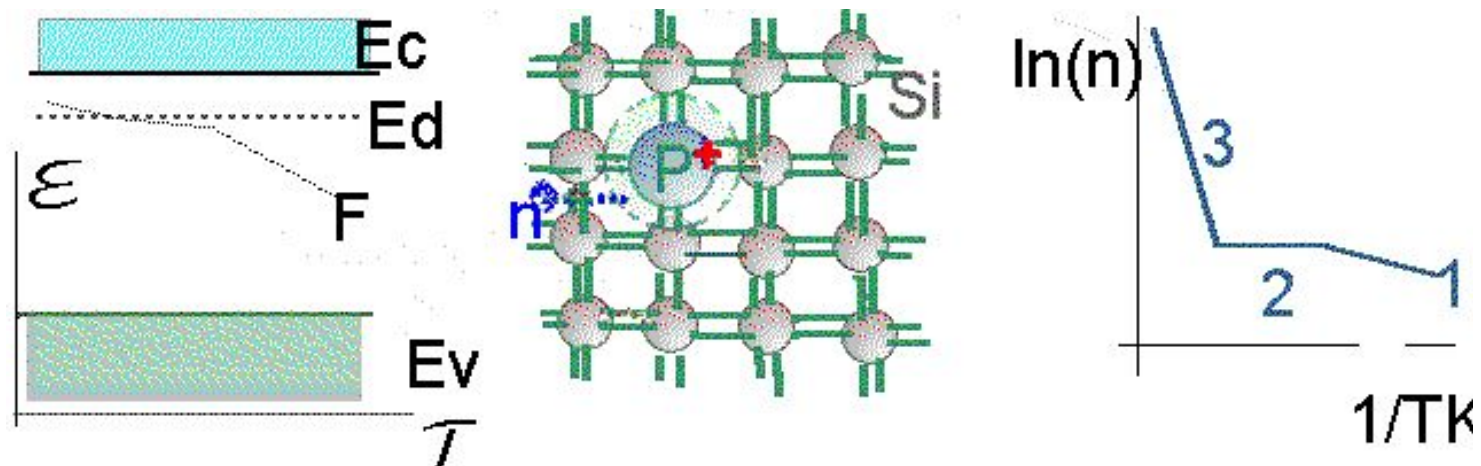
$$F = E_c - kT \cdot \ln \left(\frac{N_c}{N_D} \right)$$

Для акцепторного полупроводника $p_0 = N_A$, тогда

$$F = E_v + kT \cdot \ln \left(\frac{N_v}{N_A} \right)$$



Диаграммы, поясняющие эффект легирования полупроводникового кристалла атомами акцепторной примеси



Диаграммы, поясняющие эффект легирования полупроводникового кристалла атомами донорной примеси