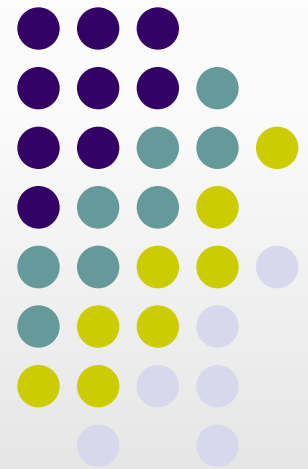
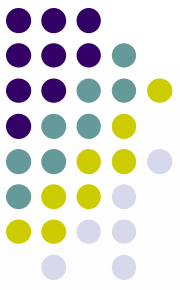


**Физика** , **весенний**  
**семестр 2020-2021 уч.**  
**года**

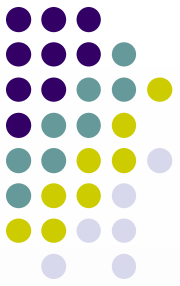
**Лекция 1.**  
**Зонная теория**  
**твёрдых тел**



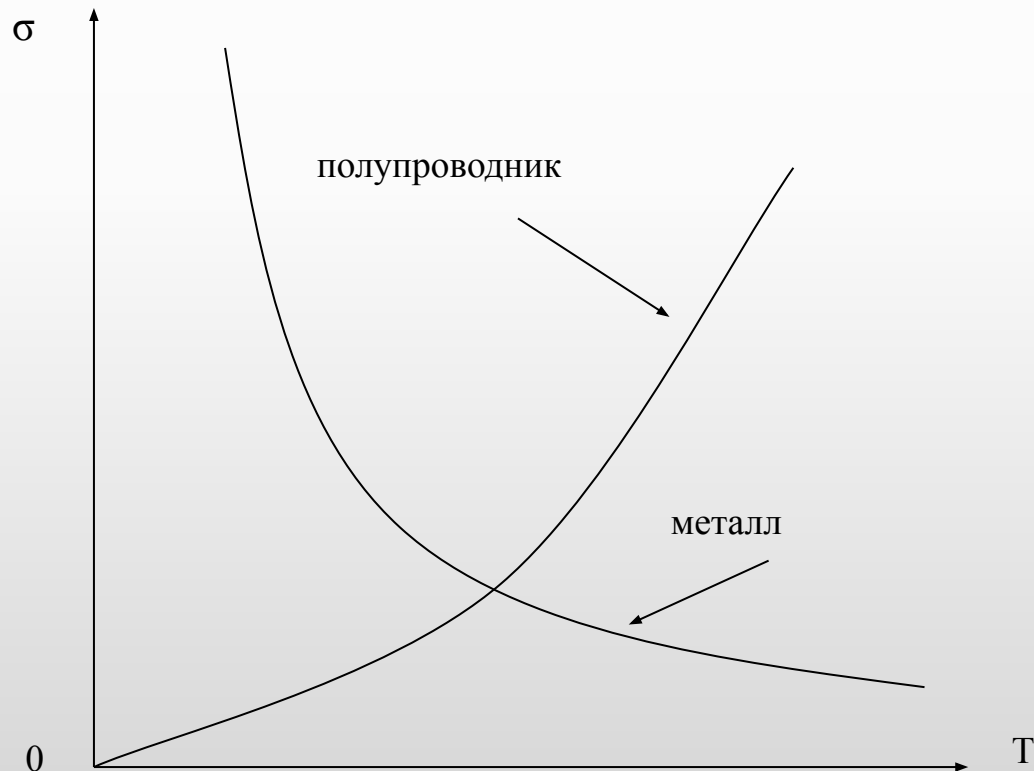


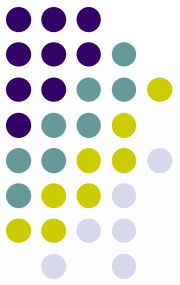
1. Общие сведения.
2. Простейшая модель кристаллического тела
3. Особенности зонной схемы
4. Теорема Блоха
5. Механизм электропроводности собственного полупроводника
6. Уровень Ферми в примесных полупроводниках
7. Примесные полупроводники
8. Фотопроводимость. Эффект Холла

# Общие сведения



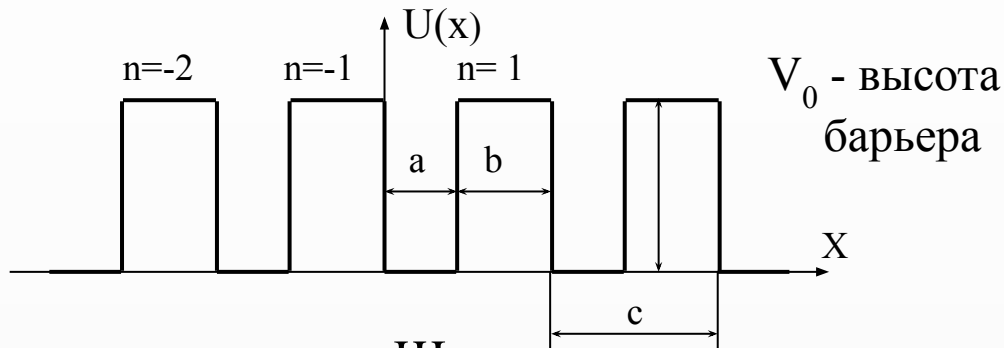
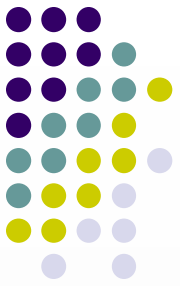
- Металлы, хорошо проводят электрический ток. Диэлектрики (изоляторы) плохо проводят ток.
- Различие полупроводников и металлов проявляется в характере зависимости электропроводности от температуры.





- В основе зонной теории лежат следующие предположения:
  1. При изучении движения валентных электронов положительные ионы кристаллической решетки, ввиду их большой массы, рассматриваются как неподвижные источники поля, действующего на электроны.
  2. Расположение положительных ионов в пространстве считается строго периодическим: они размещаются в узлах идеальной кристаллической решетки данного кристалла.

# Простейшая модель кристаллического тела



Решение уравнения Шредингера для потенциальной ямы:

$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n \quad (1)$$

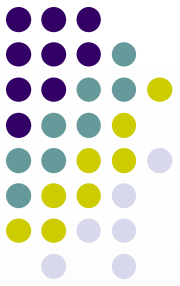
Решение для потенциального барьера:

$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n \quad (2)$$

где  $\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$   $\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$

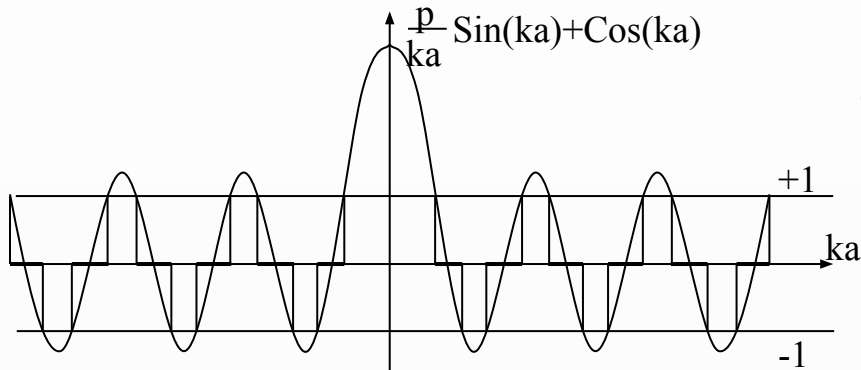
$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n \quad \Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

# Графическое изображение решения уравнения Шредингера по Крониугу – Пенни.

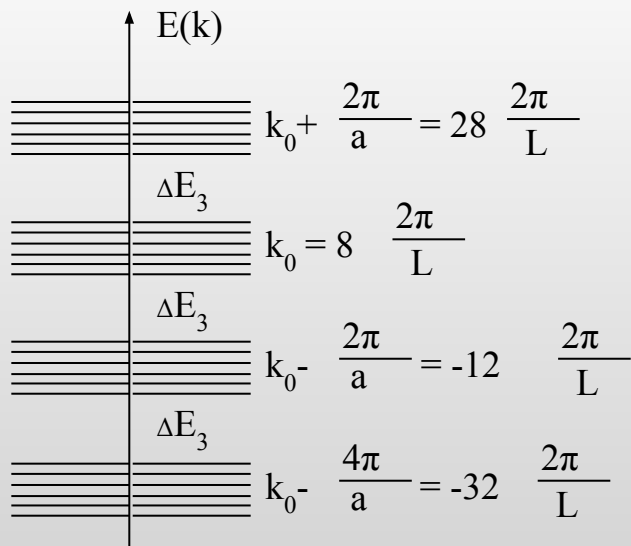


$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

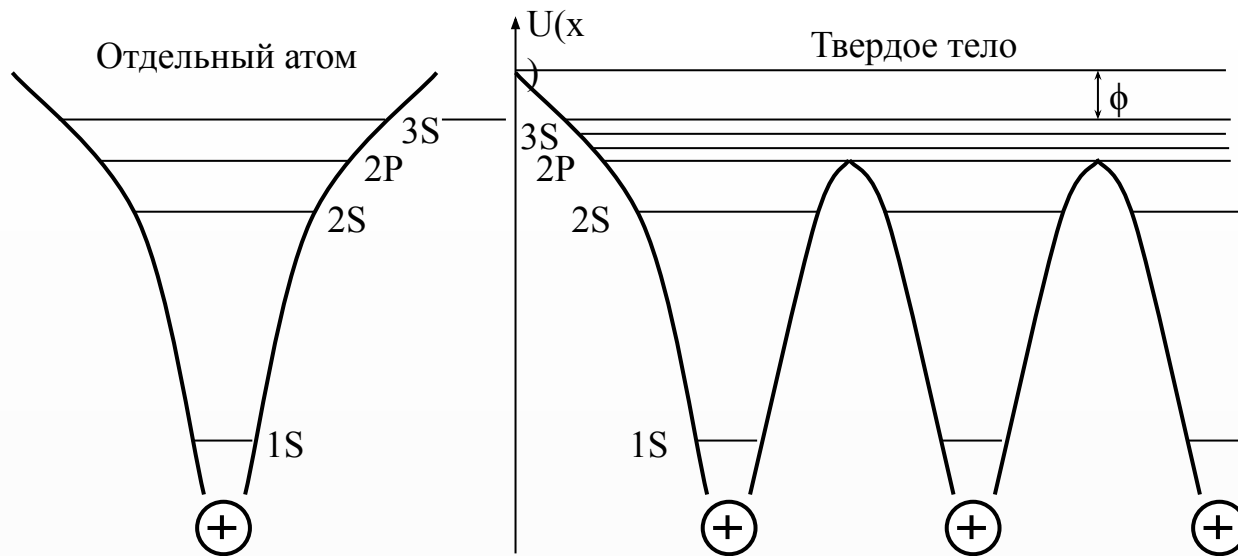
$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$



Cos ka может меняться в пределах от  $-1$  до  $+1$ .

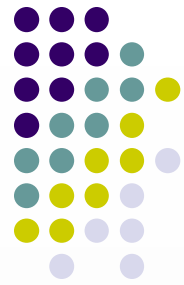


$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$



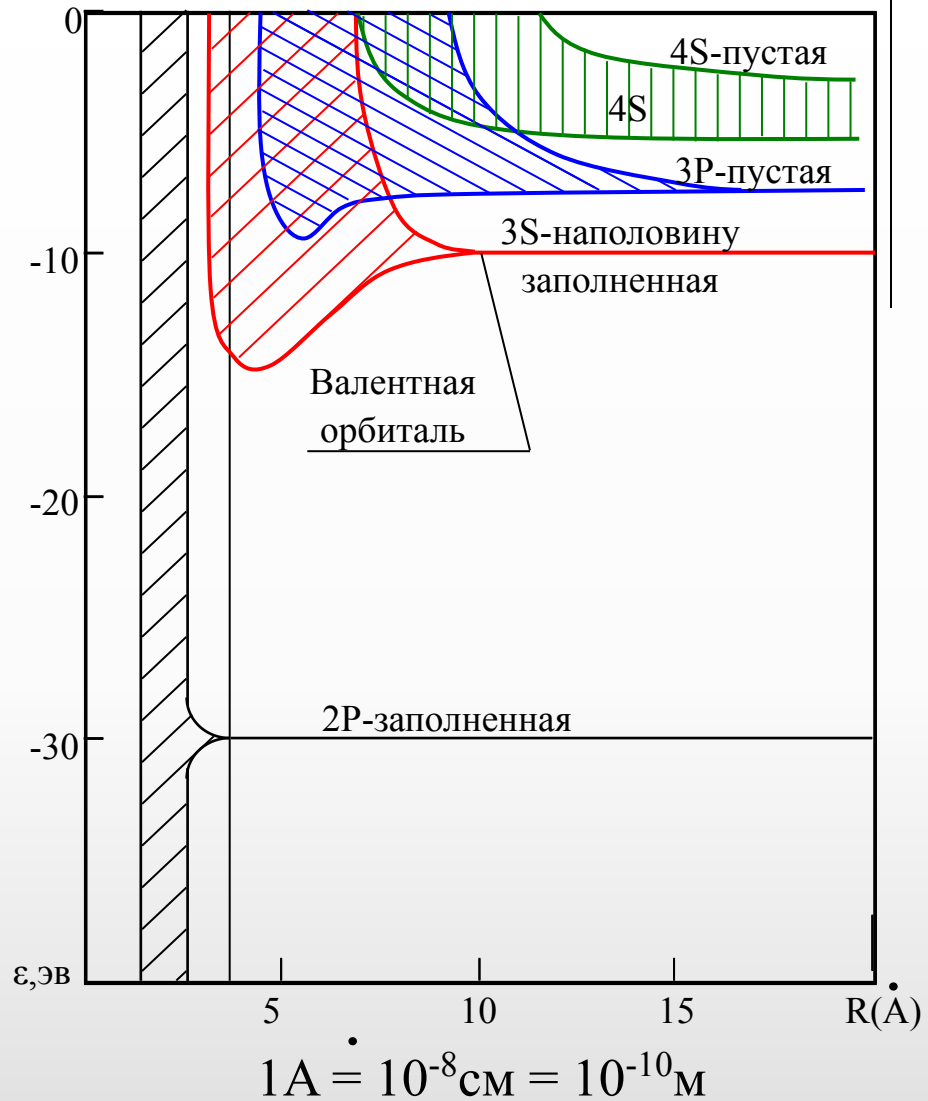
Потенциальная энергия электрона в изолированном атоме.

Потенциальная энергия электрона в кристалле

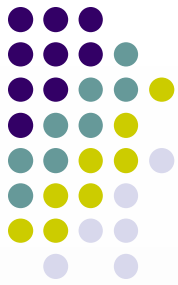


Наиболее слабо связаны 3S-электроны. При образовании твердого тела из отдельных атомов происходит перекрытие волновых функций этих электронов.

Пространственная протяженность электронных волновых функций зависит от квантовых чисел. Для больших квантовых чисел электронные волновые функции простираются на большие расстояния от ядра, для этих уровней взаимное влияние атомов будет проявляться при больших расстояниях между атомами. Что хорошо видно на рисунке.

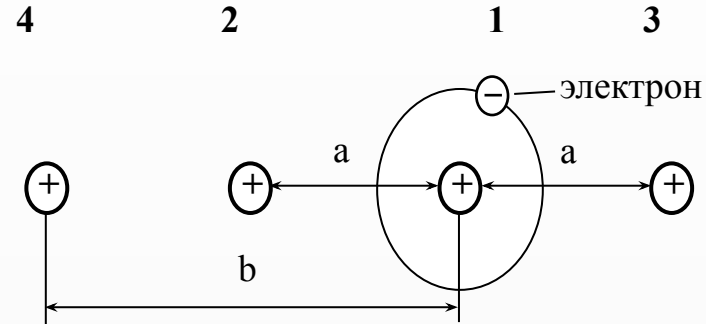
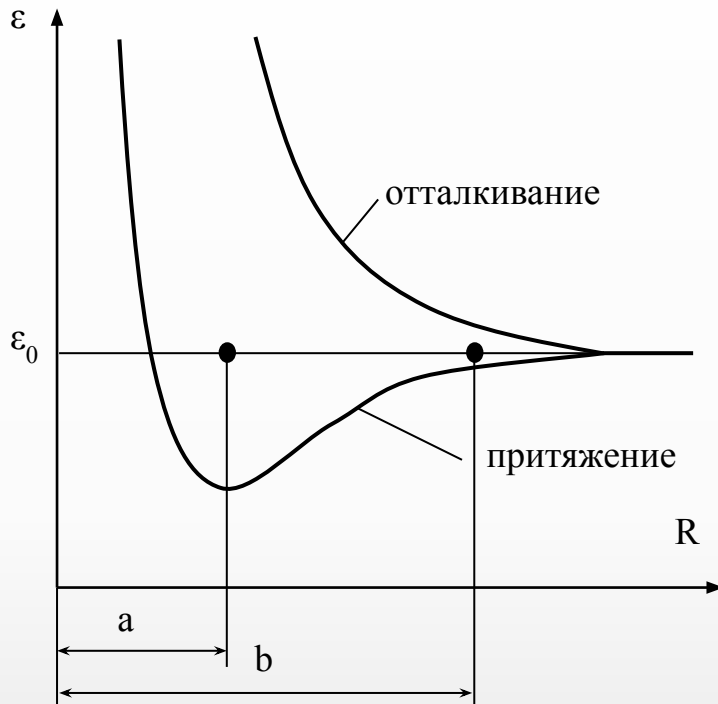
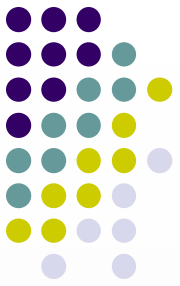


Зонная структура твердого натрия.



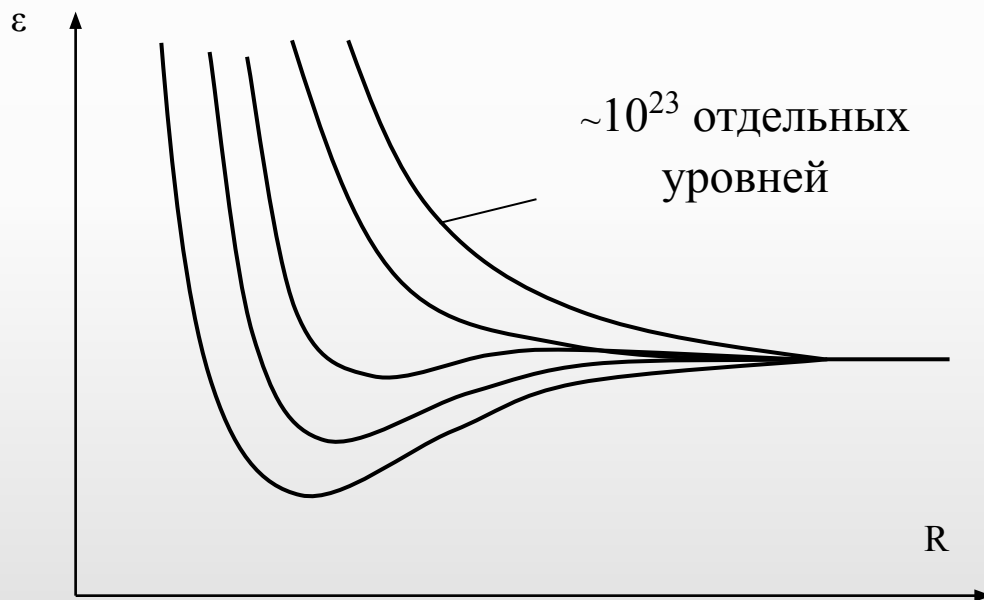


Твердое тело из четырех атомов будет иметь всего четыре уровня, распределенные по некоторому энергетическому интервалу.

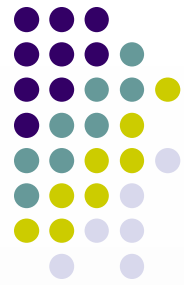


Эффект сближения атомов проявляется в изменении энергии отдельных состояний  $\psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$ , где  $\psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$  энергия изолированного атома,  $\psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$  - изменения энергии, связанные с влиянием соответствующих протонов 2, 3, 4.  $R$  – расстояние между атомами.

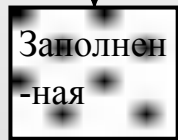
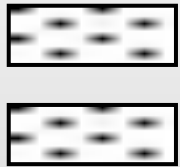
Эффект сближения атомов проявляется в увеличении общего числа уровней. В реальном теле содержится порядка  $10^{23}$  отдельных уровней, которые непрерывно распределяются внутри некоторого интервала, образуя зону разрешенных значений энергии. Такая же ситуация в основном имеет место для валентных электронов любого атома.



Зонная структура проводников (натрия). Верхняя зона – частично заполненная зона. Нижние зоны - заполненные электронами.



Зонная структура.



проводник

полупроводник

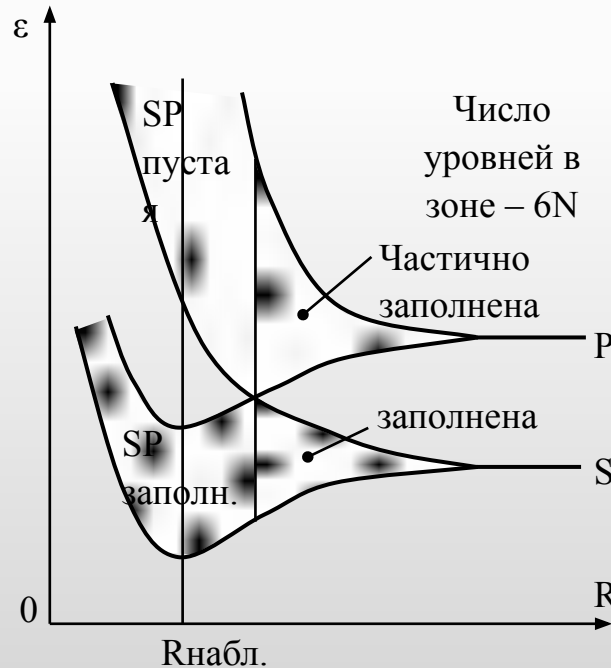
изолятор

Пустая  
заполненная

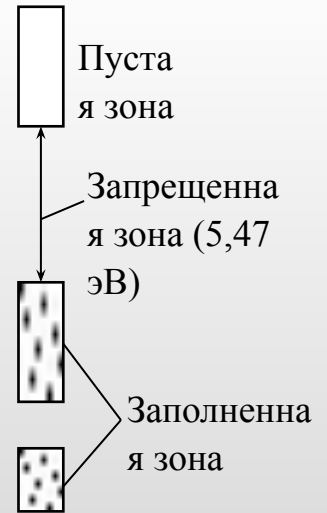
– зона проводимости,  
– валентная зона.

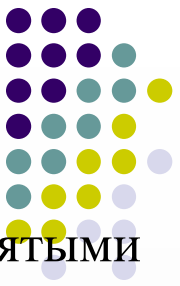
$\sim 0,1 \div 3$  эВ

$\geq 5$  эВ



Зонная структура алмаза.

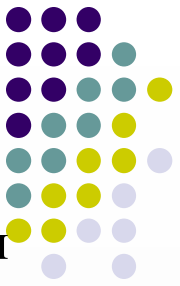




# Особенности зонной схемы

1. Зоны энергетических уровней образуются как уровнями, занятыми электронами, так и свободными уровнями.
2. В изолированном атоме дискретные уровни энергии разделены областями недозволенных значений энергии. Разрешенные энергетические зоны разделены зонами запрещенных значений энергии (запрещенными зонами). Ширина запрещенных зон соизмерима с шириной разрешенных зон. С увеличением энергии ширина разрешенных зон увеличивается, а ширина запрещенных зон уменьшается.
3. В изолированном атоме дозволенные энергетические уровни могут быть заняты электронами или свободны. В кристалле может быть различное заполнение зон. В отдельных случаях они могут быть целиком свободны или целиком заняты.
4. В изолированном атоме электроны могут переходить с одного уровня на другой. В кристалле электроны могут переходить из одной разрешенной зоны в другую, а также совершать переходы внутри одной и той же зоны.
5. Особенно сильно расщепляются вышележащие энергетические уровни, и особенно, уровни с внешним валентным электроном. Эта зона называется валентной. Зона, лежащая над валентной называется свободной.

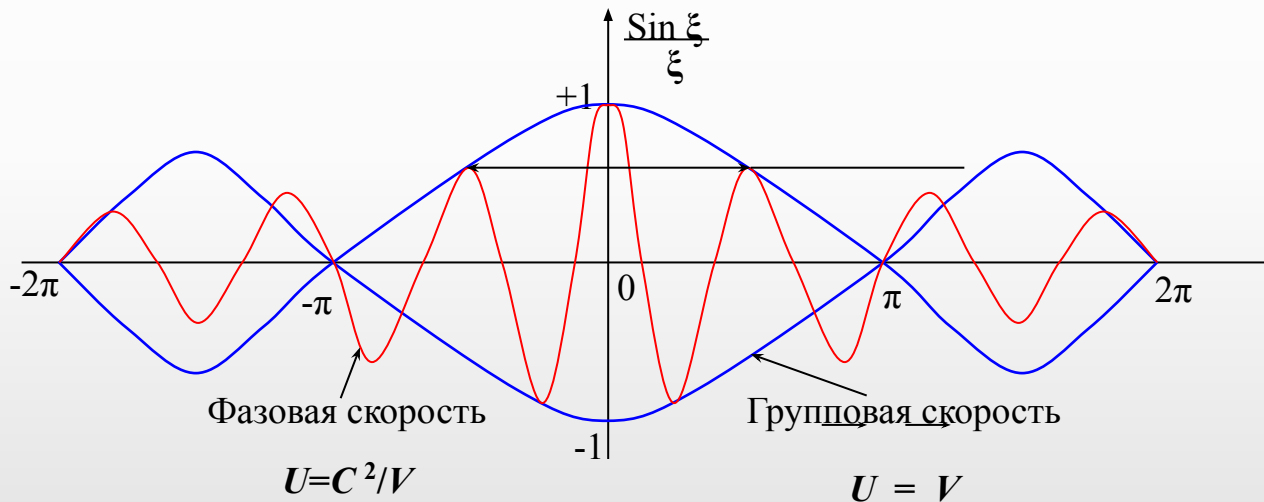
# Теорема Блоха



- Теорема Блоха утверждает, что собственные функции волнового уравнения с периодическим потенциалом имеют вид произведения функции плоской волны

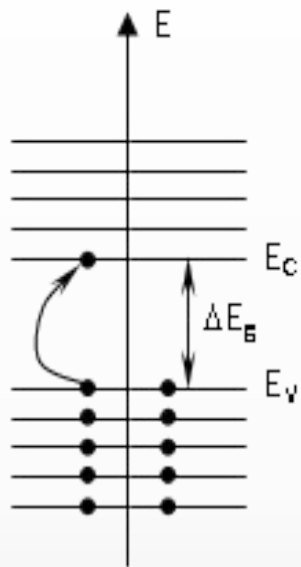
$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

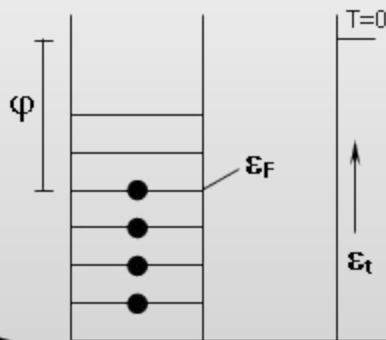
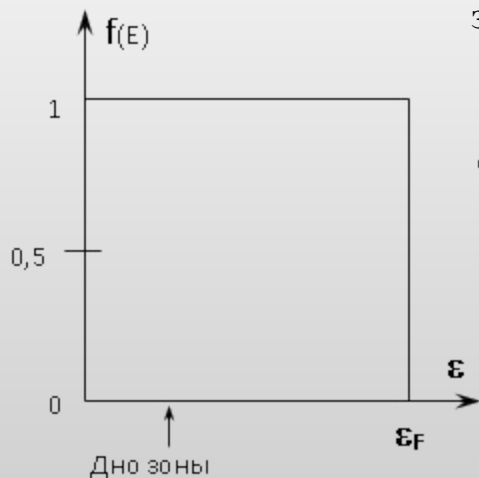


Форма волнового пакета при  $t=0$  для дебройлевских волн  $\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$

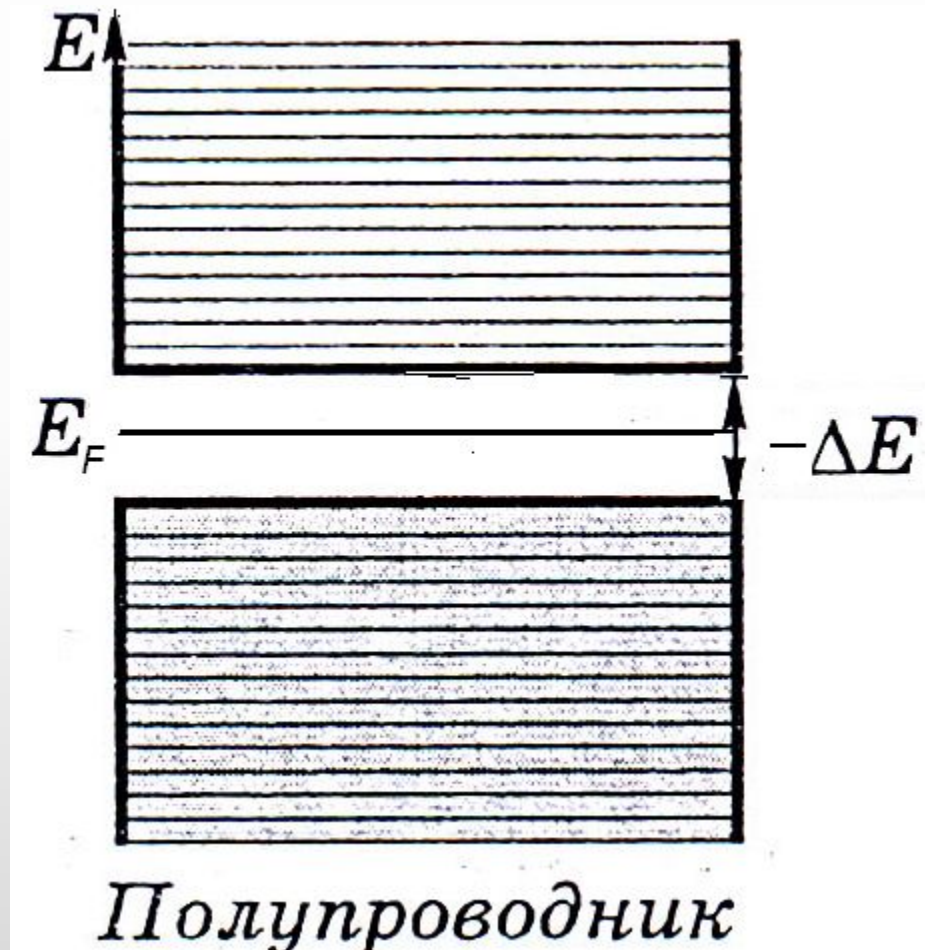
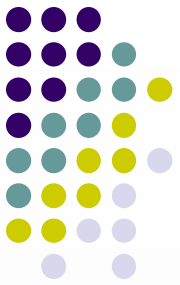
# Механизм электропроводности собственного полупроводника

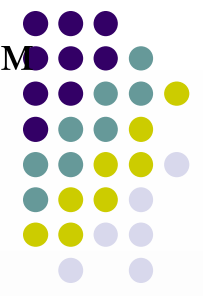


- Полупроводники – это вещества, проводимость которых сильно зависит от внешних условий: температуры, давления, внешних полей, облучения ядерными частицами.
- Полупроводники – это вещества, имеющие при комнатной температуре удельную электрическую проводимость в интервале от  $10^{-8}$  до  $10^6$  Сим  $\text{м}^{-1}$ , которая зависит сильно от вида и количества примеси, и структуры вещества, и от внешних условий.
- \* В полупроводнике с собственной проводимостью число электронов равно числу дырок, каждый электрон создает единственную дырку.
- Число возбужденных собственных носителей экспоненциально зависит от  $\Psi = A_1 \sin kx_{\eta_1} + B_1 \cos kx_{\eta_1}$ , где  $E_g$  – ширина энергетической запрещенной зоны.



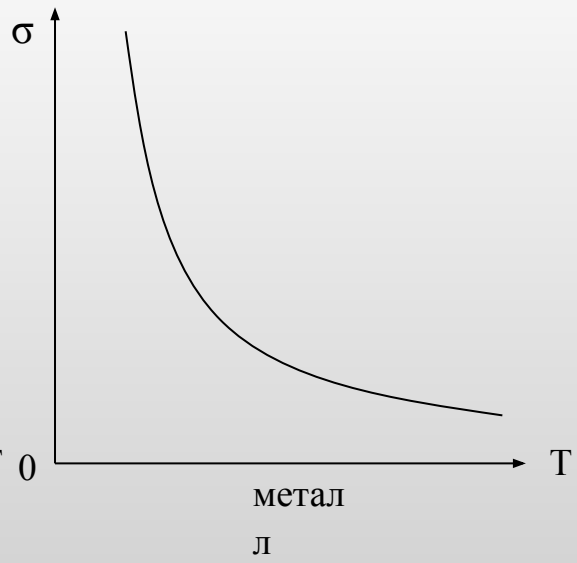
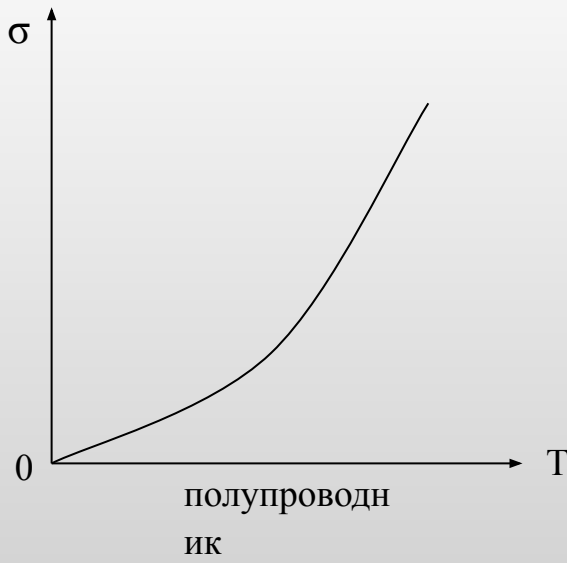
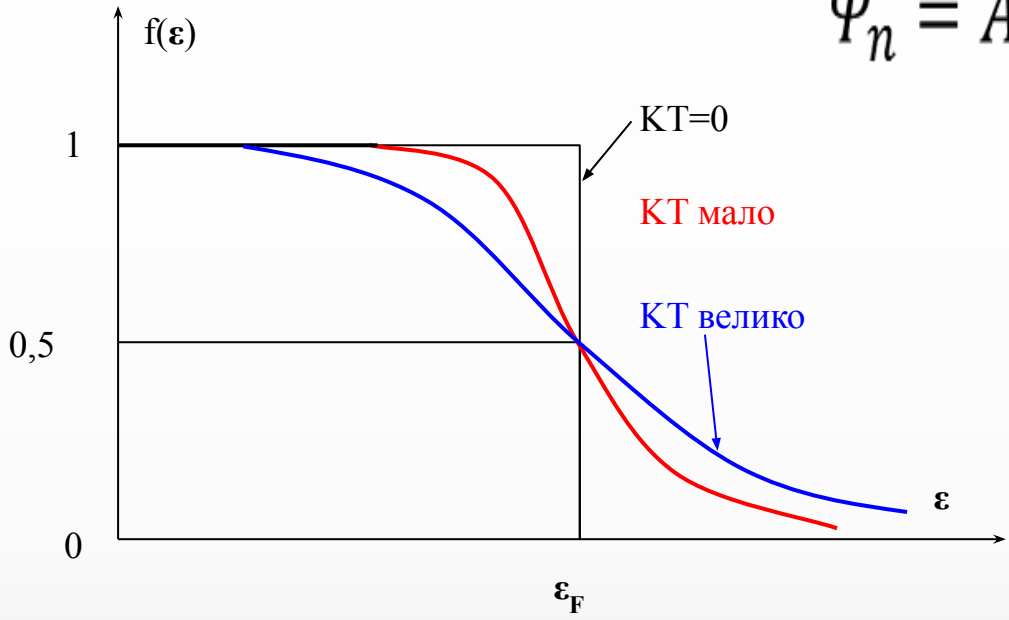
# Уровень Ферми в собственном полупроводнике





Распределение, учитывающее принцип Паули, называется распределением Ферми – Дирака

$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

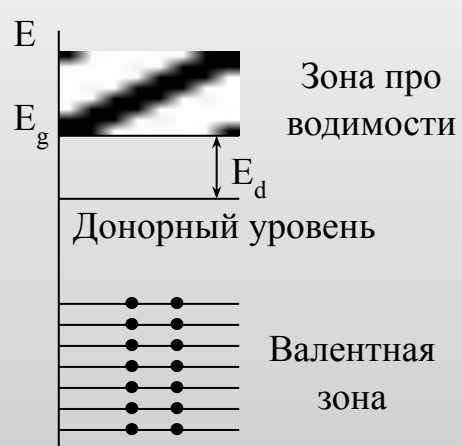
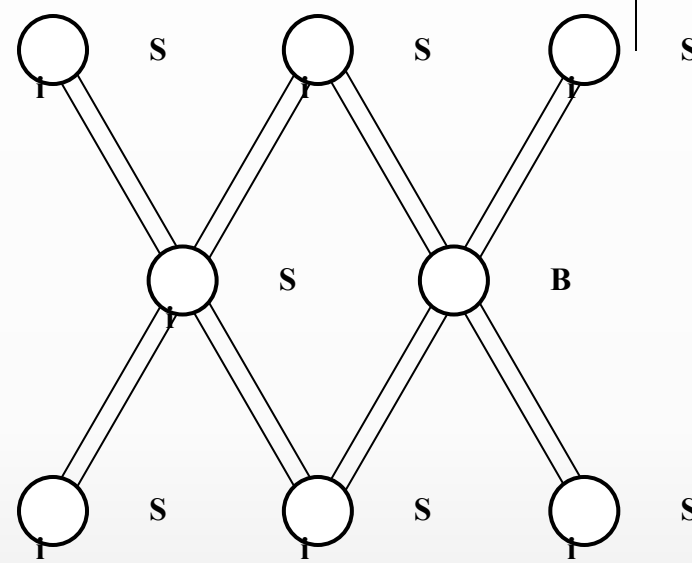
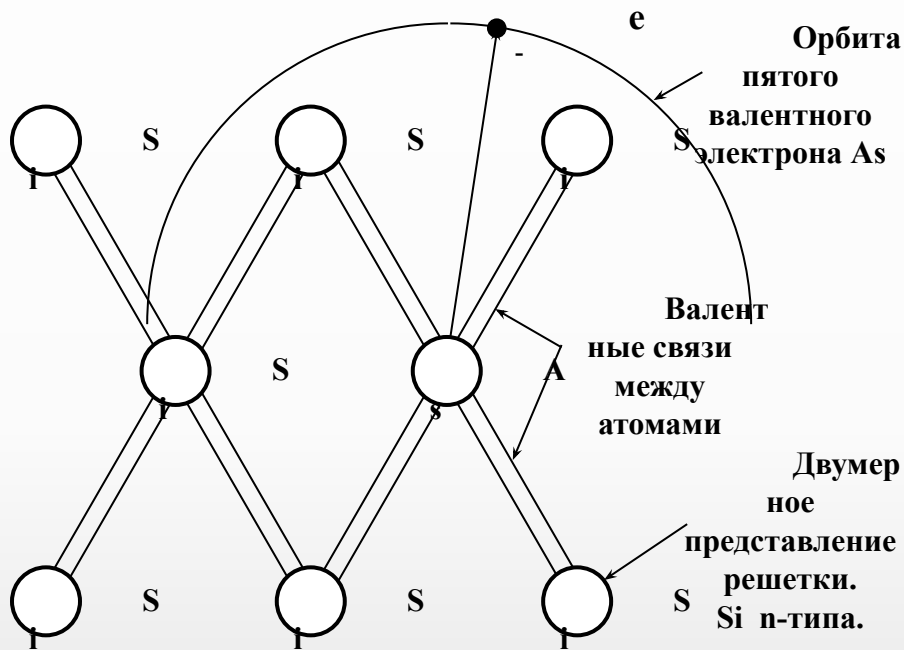
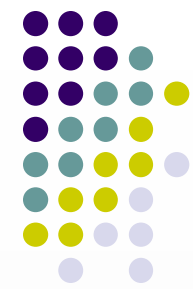


$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

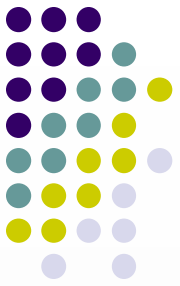


# Примесные полупроводники

Расположение зарядов в решетке кремния.



# Фотопроводимость. Эффект Холла



Это имеет место, если выполняется неравенство

$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

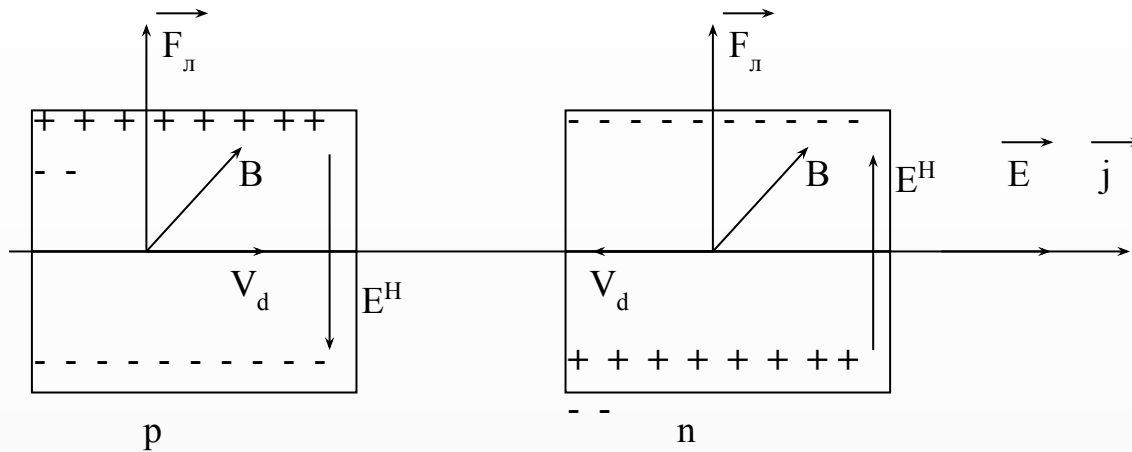
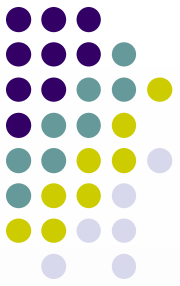
К гальваномагнитным явлениям относятся:

1. эффект Холла;
2. магниторезистивный эффект, или магнитосопротивление;
3. эффект Эттингсгаузена, или поперечный гальванотермомагнитный эффект;
4. эффект Нернота, или продольный гальванотермомагнитный эффект.

Эффект Холла называют также гальваномагнитным эффектом.

$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n \quad \Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

# Эффект Холла в электронном и дырочном полупроводниках.



$$\Psi_p = A_p \sin kx_p + B_p \cos kx_p \quad \Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

$$\Psi_n = A_n \sin kx_n + B_n \cos kx_n$$

сила Лоренца не зависит от знака носителей заряда, а определяется только направлением полей  $E$  и  $B$ .



**СПАСИБО**

**ЗА**

**ВНИМАНИЕ!**