

Тема 1. Электрорадиоматериалы радиоэлектронных средств

Лекция 4: Полупроводниковые материалы

1. Общие сведения о полупроводниках.
Технология их получения.
2. Структура полупроводников. Электронные процессы в полупроводниках.
3. Зависимость параметров полупроводников от температуры.

1 Общие сведения о полупроводниках. Технология их получения

К *полупроводникам* относятся вещества, в которых концентрация подвижных носителей заряда значительно меньше, чем концентрация атомов, и может изменяться под влиянием температуры, освещения или относительно малого количества примесей.

К полупроводникам относятся: кремний, германий, серое олово, карбид кремния, нитрид бора, нитрид алюминия и ряд других.

Различие между полупроводниками и диэлектриками носит условный характер.

По структуре полупроводники делятся на

- кристаллические,
- аморфные и стеклообразные,
- жидкие.

Особый класс составляют твердые растворы полупроводников, у которых атомы разных сортов хаотически распределены по узлам кристаллической решетки.

При этом полупроводники могут быть простыми (одноэлементными, у которых решетка состоит из атомов одного химического элемента) и сложными (решетка состоит из атомов двух и большего числа химических элементов. Кроме того, сложный полупроводник может быть химическим соединением или сплавом).

Электронный полупроводник – полупроводник, электропроводность которого обусловлена, в основном, перемещением электронов.

Дырочный полупроводник - полупроводник, электропроводность которого обусловлена перемещением дырок проводимости.

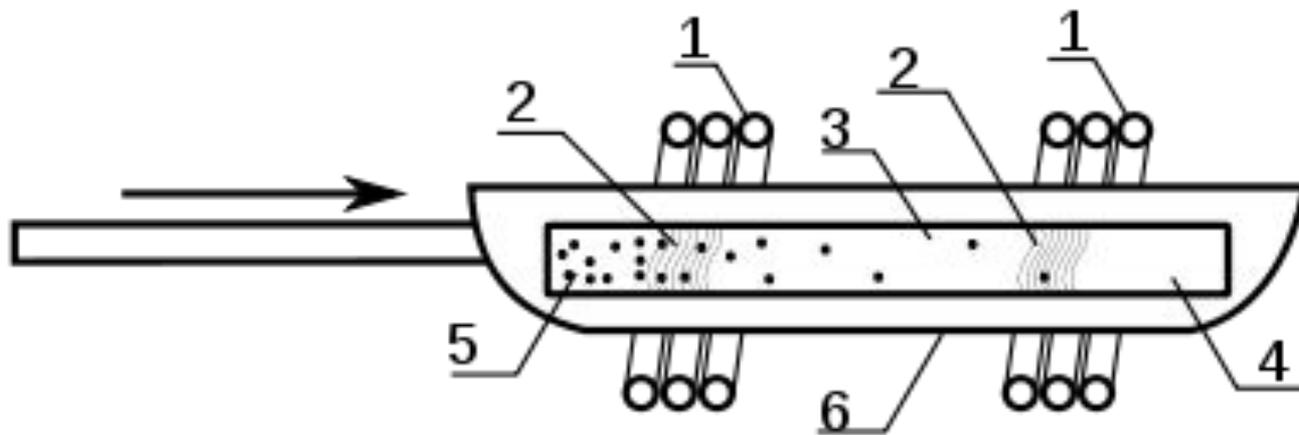
Технология получения полупроводников

По своей структуре полупроводники представляют либо монокристаллы, например, кремний, галлий, либо эпитаксиальные пленки. Технологии их получения различаются.

*Для получения чистых и примесных монокристаллических полупроводниковых материалов наиболее совершенным и широко применяемым способом очистки полупроводниковых материалов является **способ зонной плавки (зонной перекристаллизации)**.*

Метод представляет собой метод очистки, основанный на различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазах.

В каждый момент времени расплавленной является некоторая небольшая часть образца. Расплавленная зона передвигается по образцу, что приводит к перераспределению примесей. Если примесь лучше растворяется в жидкой фазе, то она постепенно накапливается в расплавленной зоне, двигаясь вместе с ней. В результате примесь скапливается в одной части исходного образца.



- 1 – индукционная катушка; 2 – расплавленные зоны;
 3 – очищенный германий; 4 – сверхчистый германий;
 5 – германий с повышенным содержанием примесей;
 6 – графитовая лодочка

Рисунок 1 – Схема устройства зонной плавки

По трубе проходит инертный газ, что препятствует попаданию в трубу извне нежелательных примесей и воздуха. На границе твердой и жидкой фаз большинство примесей диффундирует из твердой фазы в жидкую за счет большей растворимости в жидкой фазе и уносятся расплавленной зоной к концу слитка.

Метод Чохральского - вытягивание монокристаллов из расплава. Данный метод используется для тех материалов, которые не могут быть получены методом зонной плавки.

При использовании данного метода затравку (кусочек монокристалла полупроводника), помещенную в расплав (примесный полупроводник), медленно вытягивают из него. Полупроводник в инертном газе постепенно выкристаллизовывается на поверхности затравки, образуя при этом монокристалл.

Эпитаксиальные (пленочные) полупроводники, например, арсенид-галлиевые структуры, могут быть получены путем выращивания на полуизолирующих подложках *методом осаждения из газовой фазы* или *методом молекулярно-лучевой эпитаксии*, т.е. ионным легированием слоев кремния широким спектром примесей путем облучения поверхности роста низкоэнергетическими ионами кремния.

2 Структура полупроводников.

Электронные процессы в полупроводниках

Основные положения теории твердого тела.

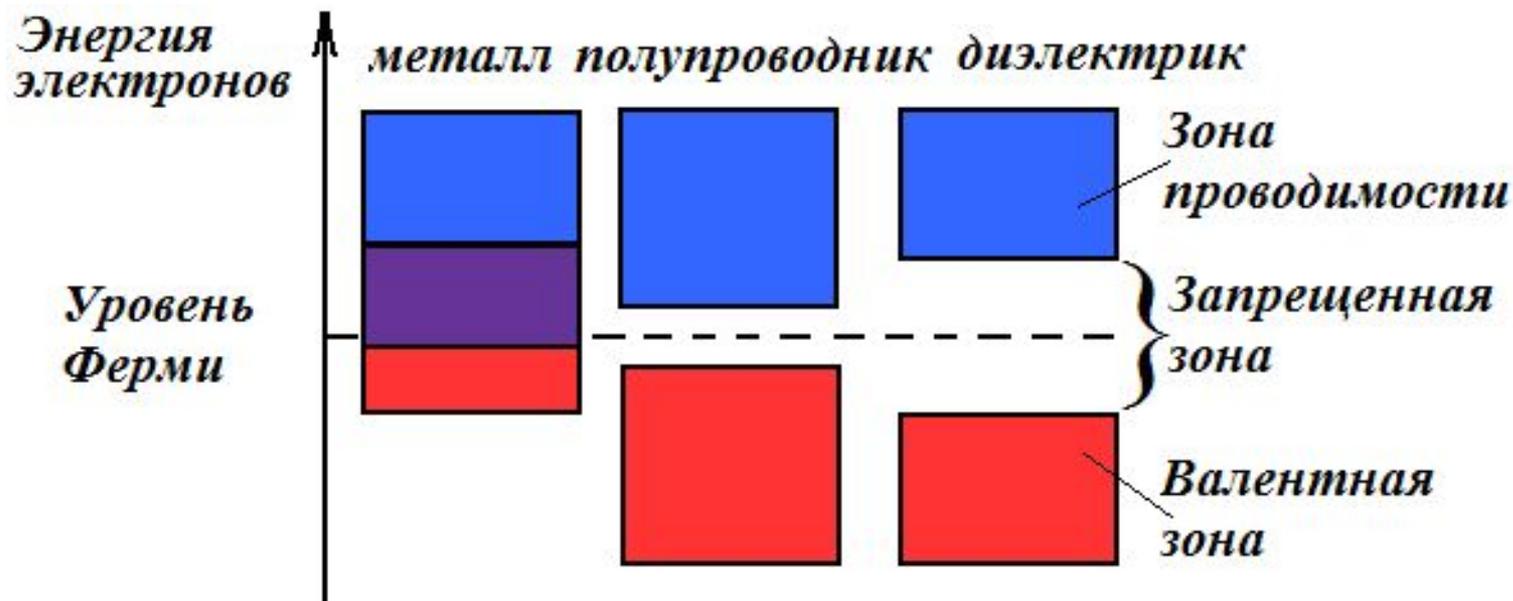
В изолированном атоме энергия электрона может принимать строго дискретные значения (электрон находится на одной из орбиталей).

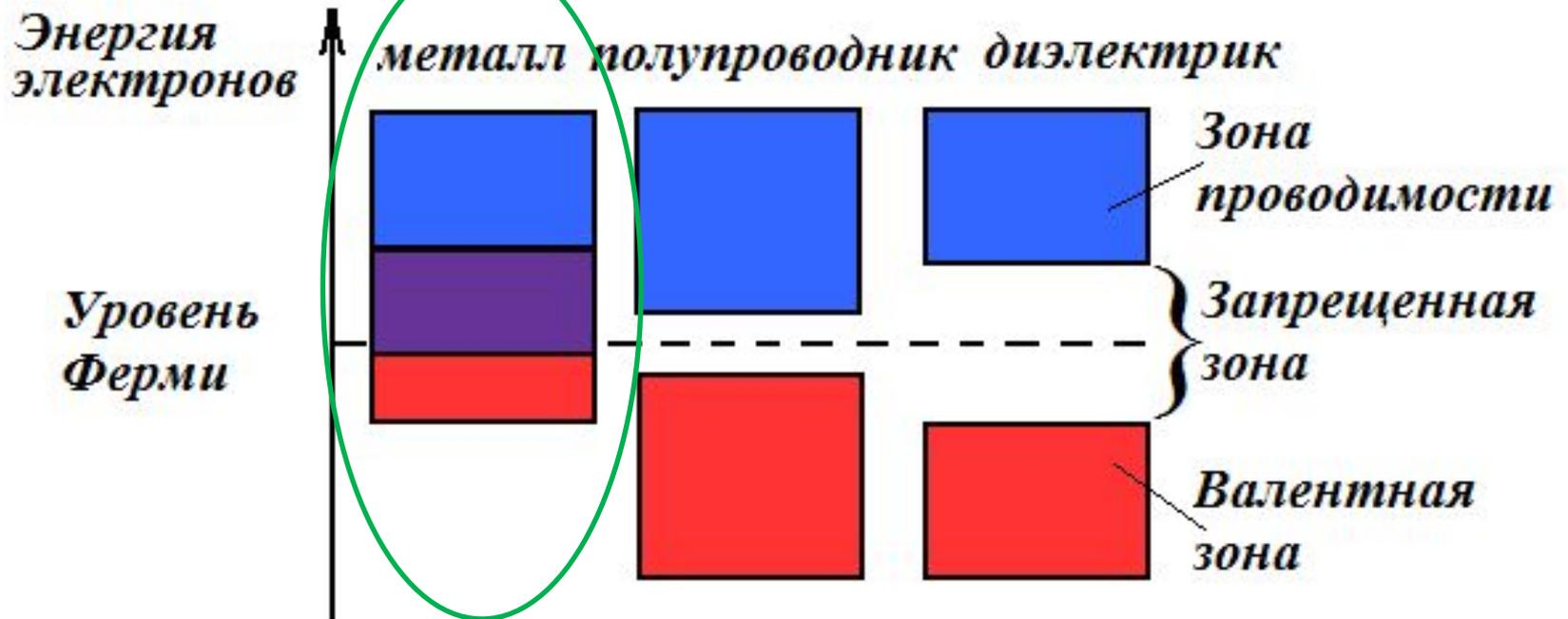
В случае нескольких атомов, объединенных химической связью, электронные орбитали расщепляются в количестве, пропорциональном количеству атомов, образуя так называемые молекулярные орбитали. Наиболее высокий из занятых уровней называется *уровнем Ферми*.

Основные положения теории твердого тела.

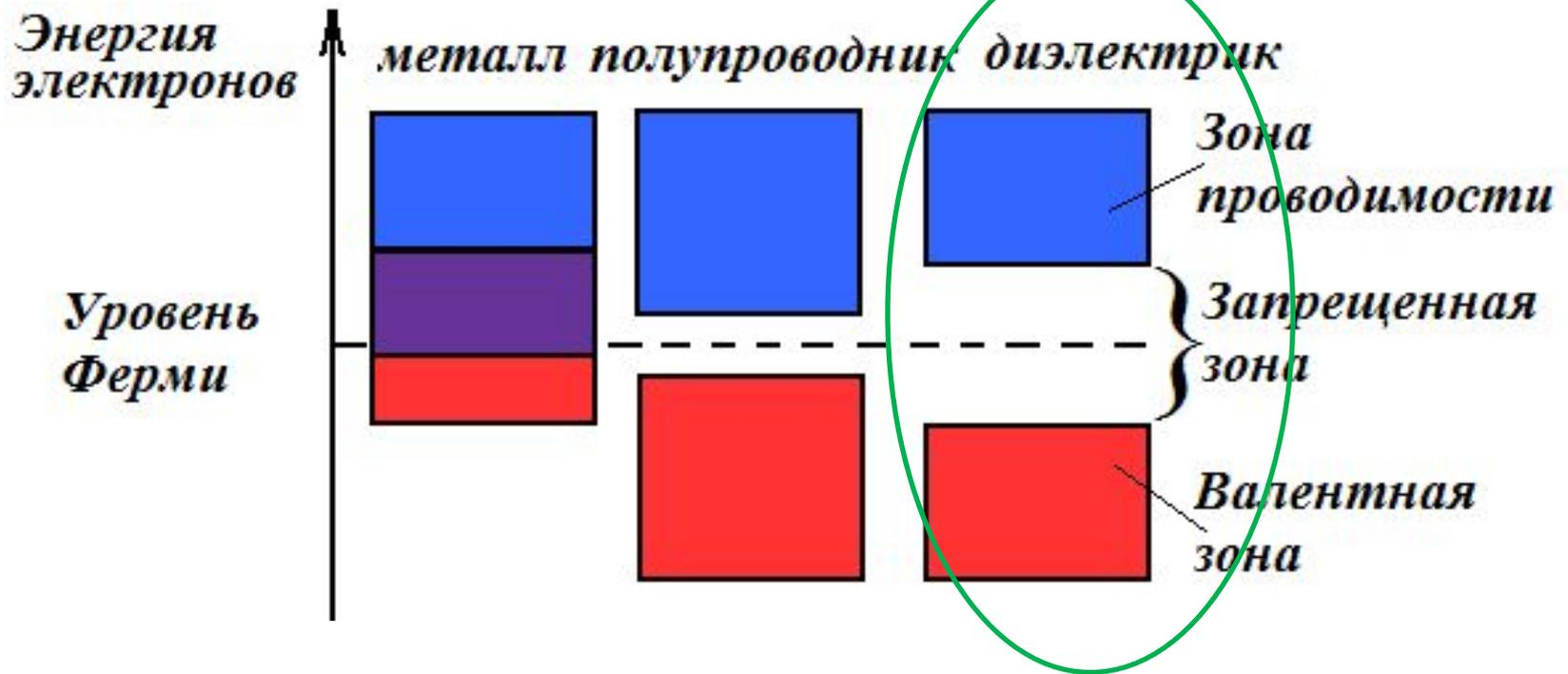
При дальнейшем увеличении системы до твердого тела, количество орбиталей становится велико, а разница энергий на соседних орбиталях очень маленькой. Энергетические уровни расщепляются до двух практически непрерывных дискретных наборов - *энергетических зон*.

Энергетическая зона, содержащая энергии электрона, находящегося ближе к ядру атома, называется *валентной зоной*, дальше от ядра зоной *проводимости*.

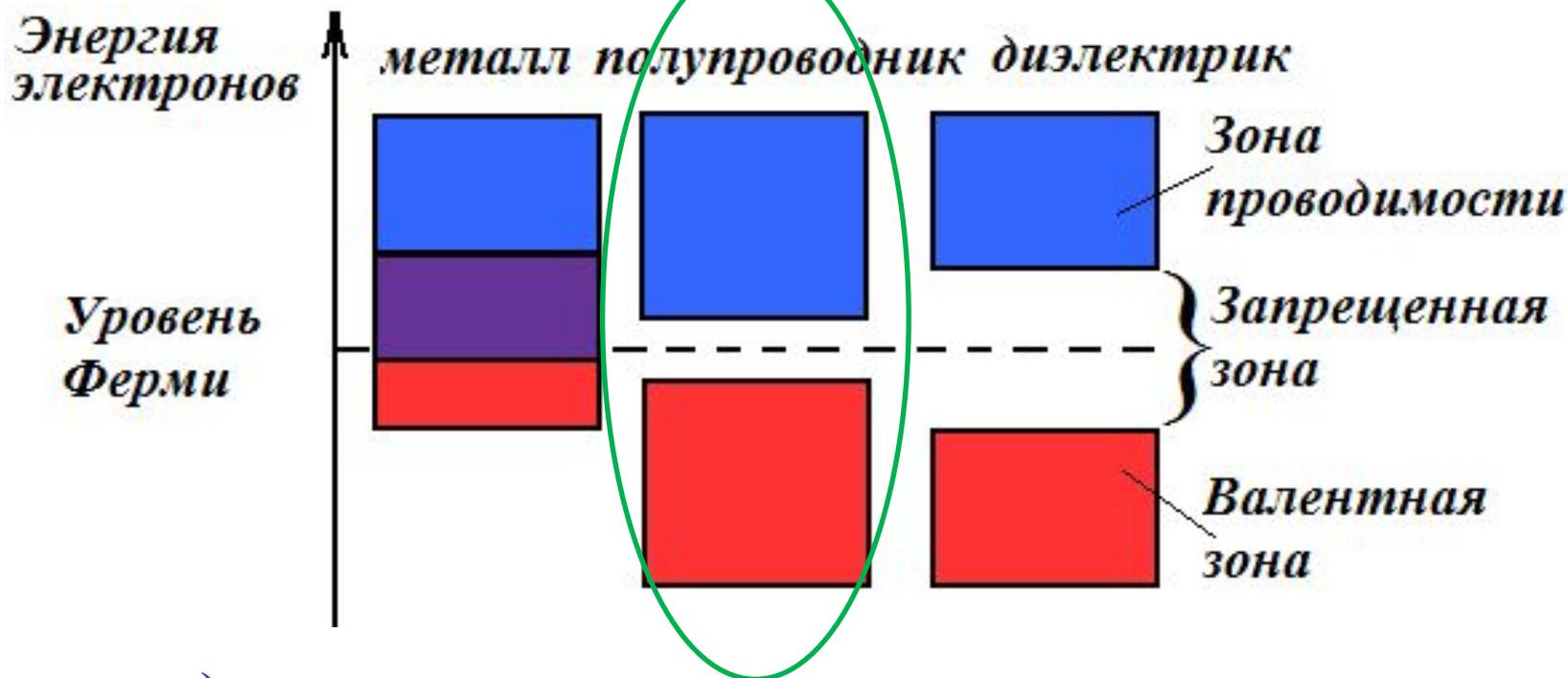




У проводников в следствие перекрытия зон валентности и зон проводимости электрон может свободно перемещаться между ними, получив любую допустимо малую энергию. Таким образом, при приложении к твердому телу разности потенциалов электроны смогут свободно двигаться из точки с меньшим потенциалом в точку с большим, образуя электрический ток.



У диэлектриков зоны не перекрываются и расстояние между ними составляет более 4 эВ. Для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости требуется значительная энергия, поэтому диэлектрики ток практически не проводят.



У полупроводников зоны не перекрываются и расстояние между ними составляет менее 4эВ. Для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости требуется энергия меньшая, чем для диэлектрика, поэтому чистые (собственные, нелегированные) полупроводники слабо пропускают ток.

Переход электронов из валентной зоны в запрещенную может происходить под воздействием тепловой или световой энергии, под действием электрического поля.

Для такого перехода энергия воздействия должна быть равна или превосходить ширину запрещенной зоны ΔW_3 .

Вероятность перехода электрона в запрещенной зоне под воздействием тепла определяется выражением

$$w \approx \exp\left(-\frac{\Delta W_3}{k_B T}\right),$$

где $k_B = 1.38067 \cdot 10^{-23}$ - Дж/К - постоянная Больцмана.

При переходе электронов в зону проводимости в валентной зоне образуются валентные квантовые состояния – дырки, которые ведут себя в кристаллической решетке подобно положительно заряженной частице с той же эффективной массой и зарядом, что и электрона. Концентрации электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне одинаковы.

3 Зависимость параметров полупроводников от температуры

- Полупроводники различаются *по характеру проводимости*:
- с *собственной проводимостью* (Полупроводники, в которых свободные электроны и "дырки" появляются в процессе ионизации атомов, из которых построен весь кристалл. Концентрация свободных электронов равняется концентрации "дырок");
 - с *примесной проводимостью*. Для создания полупроводниковых механизмов используют кристаллы с примесной проводимостью (легирование). Примесь нарушает периодичность кристаллической решетки и образует в энергетическом спектре полупроводника дополнительные уровни, которые располагаются в запрещенной зоне.

Основные параметры полупроводников:

1. Электропроводность.

В зависимости от проводимости электропроводность может быть электронной (*n*-типа) или дырочной (*p*-типа).

Тип проводимости зависит от типа внесенных в них примесей.

Один и тот же элемент может обладать как электронной, так и дырочной проводимостью.

Общая проводимость полупроводника определяется суммой проводимости электронов σ_n и проводимости дырок σ_p , а также их подвижности (γ_n, γ_p) и концентрации n_n :

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p + n_n e (\gamma_n + \gamma_p)$$

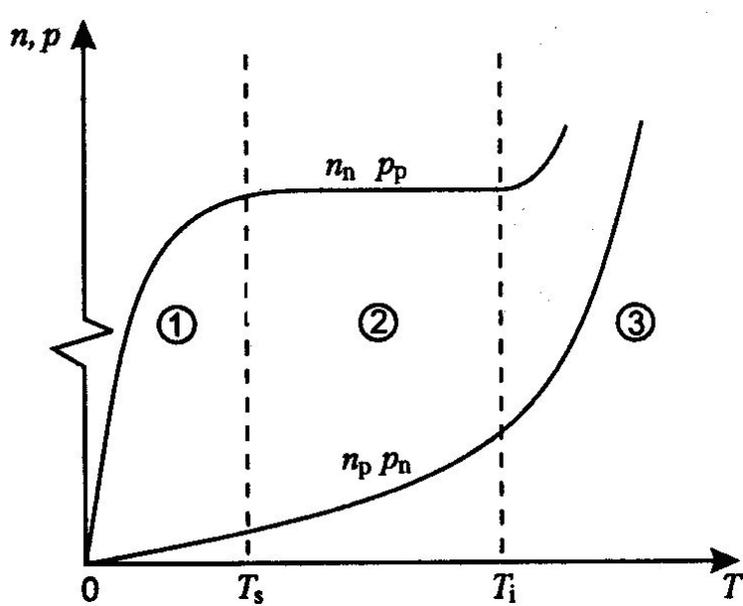
Подвижность носителей в полупроводнике определяется

соотношениями Эйнштейна: $\gamma_e = \frac{eD_e}{kT}$ $\gamma_p = \frac{eD_p}{kT}$

D_e , D_p - коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно;

$$n_e = n_p = n_i = A(T) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) = A(T) \cdot \exp\left(-\frac{\Phi}{2\varphi_T}\right) \quad \Phi = \frac{\Delta E}{e} \quad \varphi_T = \frac{kT}{e}$$

$A(T)$ - «медленная» функция температуры.

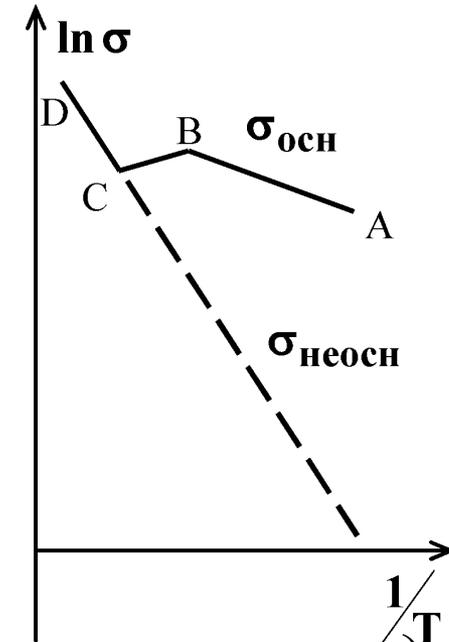


Зависимость концентрации зарядов от температуры

Область 1 - все валентные электроны заняты в ковалентных связях, валентная зона полностью заполнена электронами, а в зоне проводимости электроны отсутствуют.

Область 2 - концентрация основных носителей заряда сохраняется приблизительно постоянной и равной концентрации примесей.

Область 3 - более интенсивная тепловая генерация электронов и дырок. Концентрация носителей заряда резко уменьшается. Собственная проводимость.



Зависимость проводимости зарядов от температуры