

Полупроводники и их свойства.

По характеру электропроводности - три типа твердых тел :

проводники (обычно - металлы)

полупроводники

диэлектрики (изоляторы)

Заметная проводимость есть у проводников и полупроводников.

Но : существенные различия в некоторых свойствах

1) электропроводность полупроводников обычно существенно ниже, чем металлов

2) электропроводность полупроводников обычно быстро растет с ростом температуры - у металлом обычно снижается (и зависимость слабее)

3) электропроводность полупроводников исключительно сильно зависит от их чистоты (от концентрации примесей) - и обычно растет с ведением примесей (у металлов зависимость слабая и обычно другого знака)

4) на электропроводность полупроводников влияет облучение светом или ионизирующей радиацией - для металлов подобное влияние практически отсутствует

Причем эти свойства полупроводников точно соответствуют соответствующим свойствам изоляторов; причина - эквивалентность электронных структур полупроводников и изоляторов - отличная от структур металлов.

⇒ иногда полупроводники характеризуют как полуизоляторы

Электронная структура твердого тела - результат взаимодействия структур отдельных атомов.

Для изолированного атома - набор дискретных состояний энергий электронов + непрерывный спектр энергий для "оторванного" электрона.



Li - в ядре 3 протона \Rightarrow всего 3 e^- - из них 2 e^- с $n = 1$ (K-слой) и 1 e^- с $n = 2$ (L-слой)

Всего в слое могут находиться не более $2n^2$ электронов - причина - **принцип Паули** : в атоме не могут присутствовать два (или более) электронов с одинаковым набором квантовых чисел (электроны - т.н. ферми-частицы)

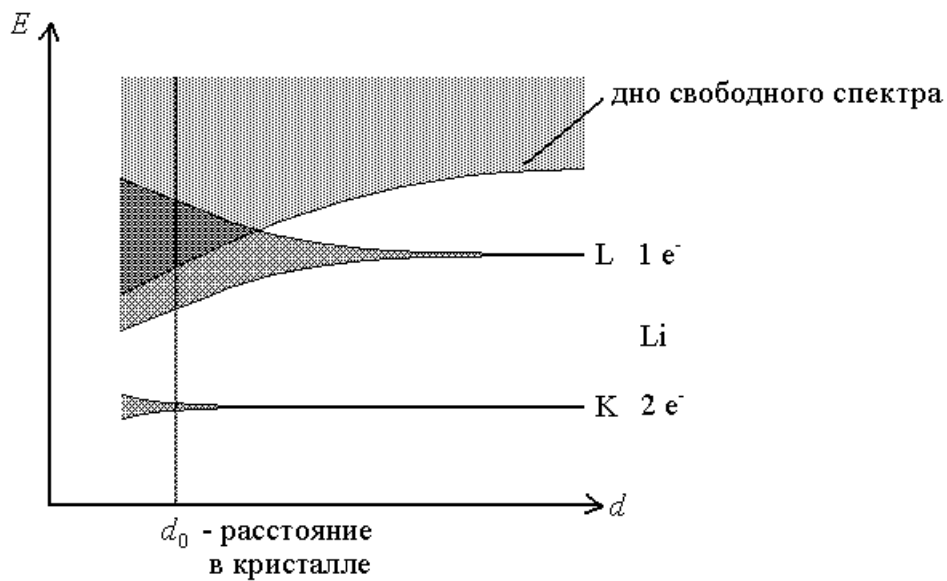
Квантуются :

- 1) **главное квантовое число** n - квантование по энергии e^-
- 2) **побочное** (иначе - орбитальное, азимутальное) **квантовое число** l - квантование орбитального момента e^-
- 3) **магнитное** (иначе - внутреннее) **квантовое число** m_l - квантование ориентации орбитального момента
- 4) **спиновое квантовое число** m_s - квантование ориентации спина электрона

Минимум энергии атома - как правило - при заполнении ближайших к ядру атомных **орбиталей** - с набором минимально возможных n, l, m_l (но есть исключения !)

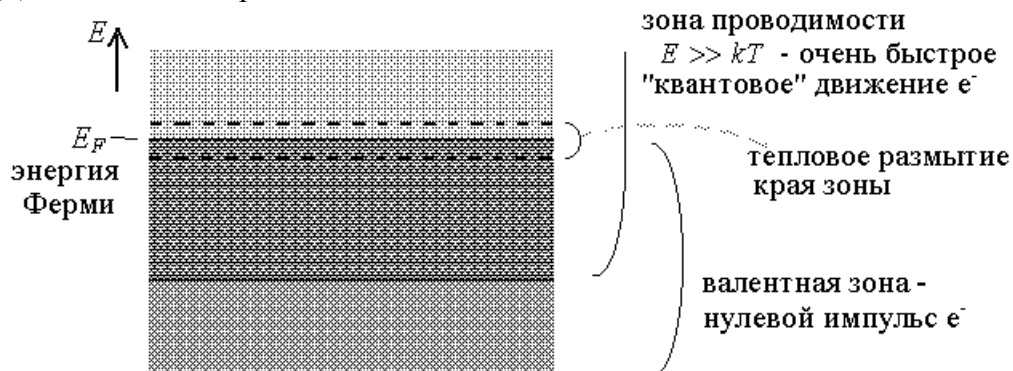
Энергия связи e^- внутренних слоев велика \Rightarrow как правило, эти e^- не влияют на электропроводность твердых тел

Существенно поведение электронов внешней (т.н. **валентной**) оболочки при сближении атомов - при переходе от газа к твердому телу : узкие уровни расщепляются в **полосы**, заполненные множеством подуровней (практически слитых).



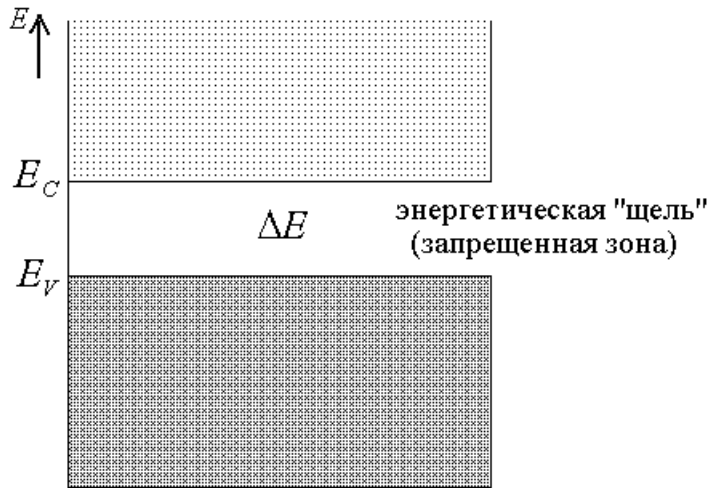
⇒ части e^- выгодно перейти в "свободные" (общественные e^- проводимости)

Для металла изображают :



Протекание тока через металл - наложение медленного дрейфа в электрическом поле на быстрое (квантовое) движение

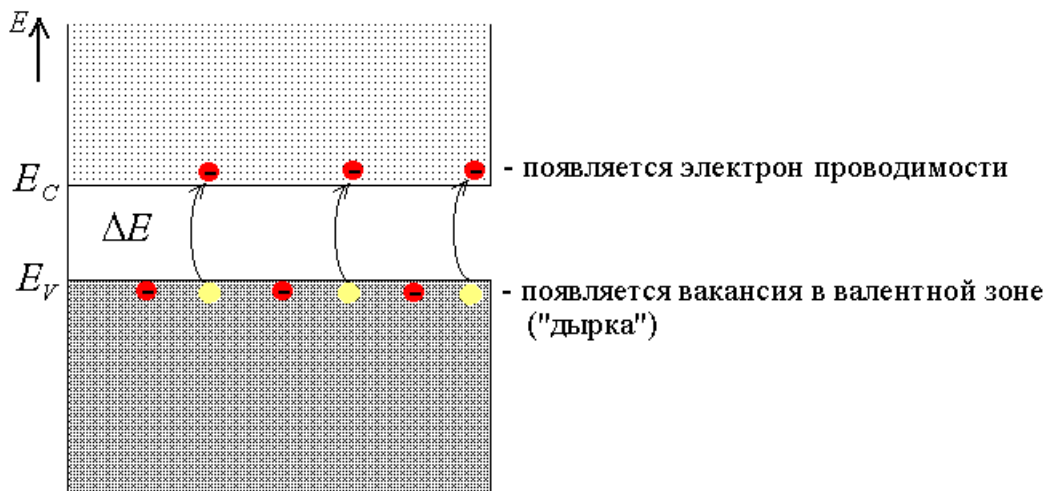
Для диэлектриков и полупроводников зоны не перекрываются и валентная зона заполнена полностью (при абсолютном нуле температуры) :



Различие диэлектриков и полупроводников - в ширине щели - для диэлектриков

$\Delta E \gg kT$, для полупроводников $\Delta E \sim kT$ (точнее, соизмеримо с kT)

\Rightarrow в диэлектрике при рабочей температуре практически нет e^- , способных перейти в зону проводимости; в полупроводнике такой процесс возможен



Дырки - т.н. **квазичастицы** - могут иметь определенную массу, энергию, импульс, набор квантовых чисел, т.д. - положительный подвижный носитель заряда

Реально : движение дырки - последовательный перенос связанных электронов в обратном направлении - как в игре в "15"

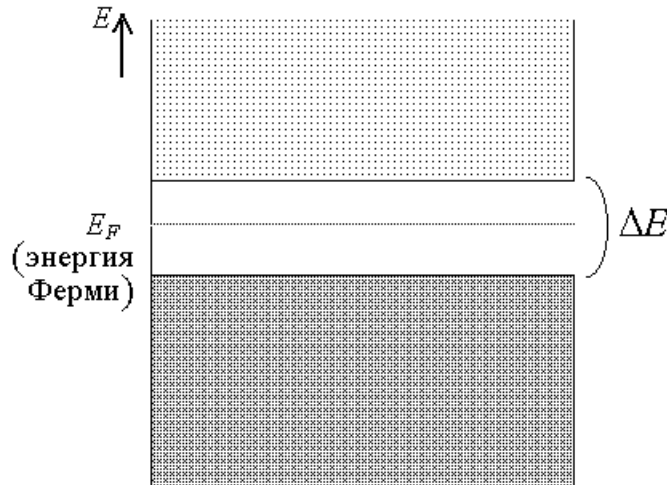
Но так же реально : дырка - положительная частица - например, с e^- проводимости образует аналог атома - **экситон** (переходы в котором - как и в атоме - излучают !)

Более того : e^- проводимости - практически квазичастица - имеет отличные от свободного e^- массу, сложную связь энергия-импульс, т.д.

Вероятность перескока e^- из валентной зоны в зону проводимости - статистика Ферми-Дирака :

$$f = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} - \text{вероятность обнаружить электрон в состоянии с энергией } E$$

Для нормальных - не вырожденных (т.е. не очень горячих) и собственных (т.е. чистых и бездефектных) - вероятность перескока $\ll 1 \Rightarrow f \approx e^{-\frac{E-E_F}{kT}}$



Уровень Ферми в таких полупроводниках в середине запрещенной зоны $\Rightarrow f_{\Delta E} \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$ - практически статистика Максвелла-Больцмана (для вырожденных полупроводников - Ферми-Дирака)

Число электронно-дырочных пар в единице объема

$$n_e = n_p = n_i = A(T) \cdot e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} = A(T) \cdot e^{-\frac{\Phi}{2\varphi_T}} \quad \text{где } \Phi = \frac{\Delta E}{q_e} [V], \quad \varphi_T = \frac{kT}{q_e} [V]$$

φ_T - т.н. тепловой потенциал ; при комнатной температуре $\varphi_T(300K) \approx 0.025V$

$A(T)$ - "медленная" функция температуры

Примеры : $\frac{\Delta E}{q_e}$

алмаз 5.4 eV - $n_i \sim 0 \Rightarrow$ обычно - изолятор

Si 1.15 eV - $n_i \sim 1.4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Ge 0.744 eV - $n_i \sim 2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

A III B V

GaAs 1.25 eV

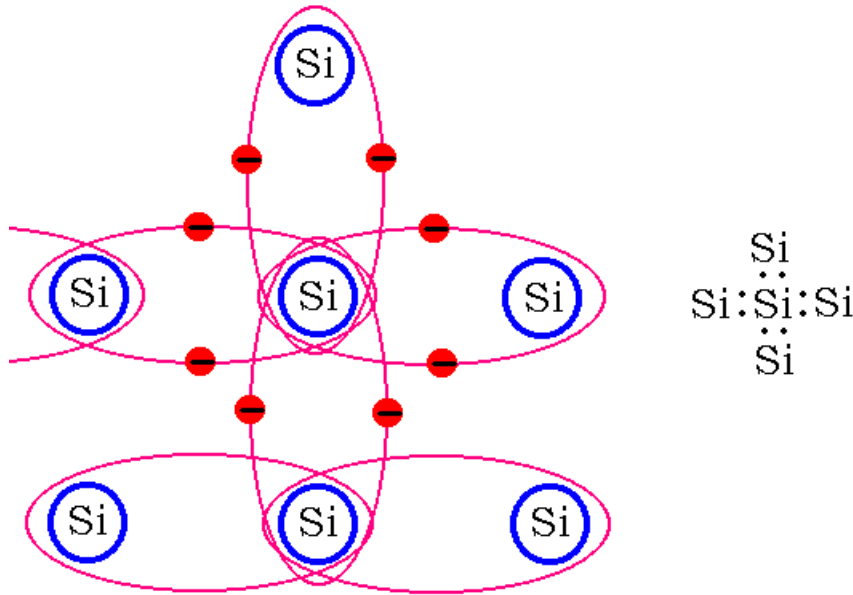
A IV B IV

SiC 2.68 eV

Так же Se (лазерные принтеры), PbS (фотоприемники), HgI₂ (детекторы ионизирующего излучения), т.д.

Влияние примесей

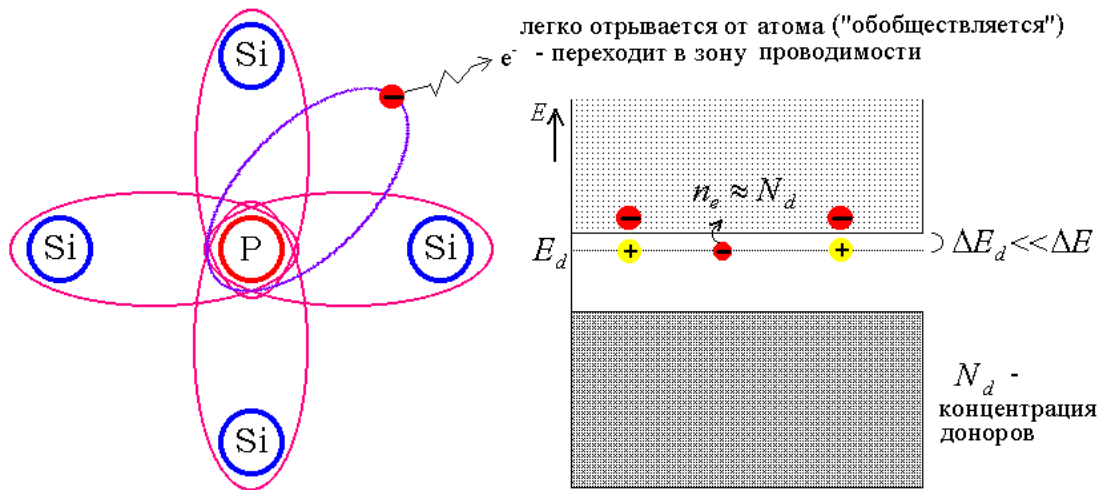
Обычно : валентная зона заполнена за счет образования связей между атомами - т.н. "спаривания" электронов (образование ковалентной связи)



Si - элемент 4^й группы с 4 электронами во внешнем слое (Si, Ge, серое Sn) - связи с 4 соседними атомами достраивают оболочку до **октета** - устойчивой 8-электронной конфигурации (как у инертных газов исключая He)

Вероятность теплового разрыва связи - мала (появление пар "на хвосте" распределения Максвелла-Больцмана)

При замене в узле Si на элемент V группы (P, As, Sb - т.н. **донорные примеси**) - лишний, не спаренный e⁻ :



⇒ вместо атома примеси остается **положительный неподвижный ион** и отрицательный носитель (электрон)

Т.н. **донорные уровни** :

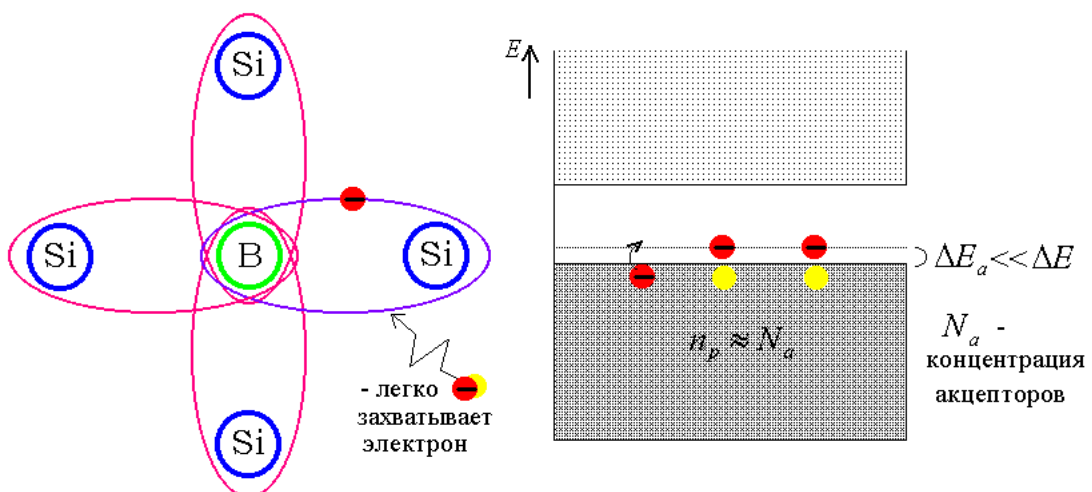
P в Si - $\Delta E_d = 0.044 \text{ eV}$

P в Ge - $\Delta E_d = 0.012 \text{ eV}$

Т.к. $kT \sim 0.025 \text{ eV}$, такие примеси полностью ионизованы

Причем : возникает только e^- проводимости - но не дырка ! - образуется т.н. полупроводник **n-типа** (с **электронной проводимостью**)

Аналогично - при введении элементов III группы (B, Al, Ga - т.н. **акцепторные примеси**) :



⇒ вместо атома примеси остается **отрицательный неподвижный ион** и положительный носитель (дырка)

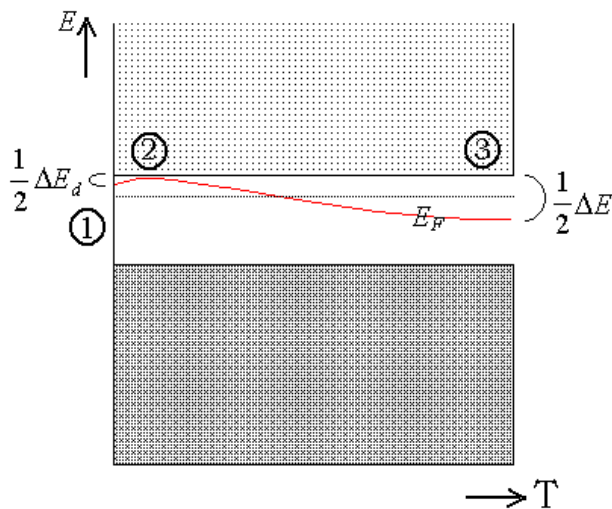
Т.н. **акцепторные уровни** :

В в Si - $\Delta E_a = 0.046 \text{ eV}$

В в Ge - $\Delta E_a = 0.01 \text{ eV}$

- при ионизации атомов акцепторной примеси генерируются дырки в валентной зоне (но не электроны проводимости) - образуются полупроводник **p-типа** (с **дырочной проводимостью**)

Уровень Ферми в примесном полупроводнике зависит от температуры - например, для n-типа



1) все выморожено - диэлектрик

2) все доноры ионизованы
- примесная проводимость

3) концентрация примеси
не влияет на проводимость
($n_i \gg N_d$)

Важнейшее свойство **примесных полупроводников** - связь концентраций n_p и n_e :

$n_p \cdot n_e = n_i^2$ - т.е. рост концентрации акцепторной примеси N_a не только увеличивает n_p , но и уменьшает n_e (аналогично, рост N_d увеличивает n_e и уменьшает n_p)

При двух типах примесей при условии $N_d = N_a$ - концентрация носителей практически не меняется и равна $n_e = n_p = n_i$ - т.н. **компенсированный полупроводник**

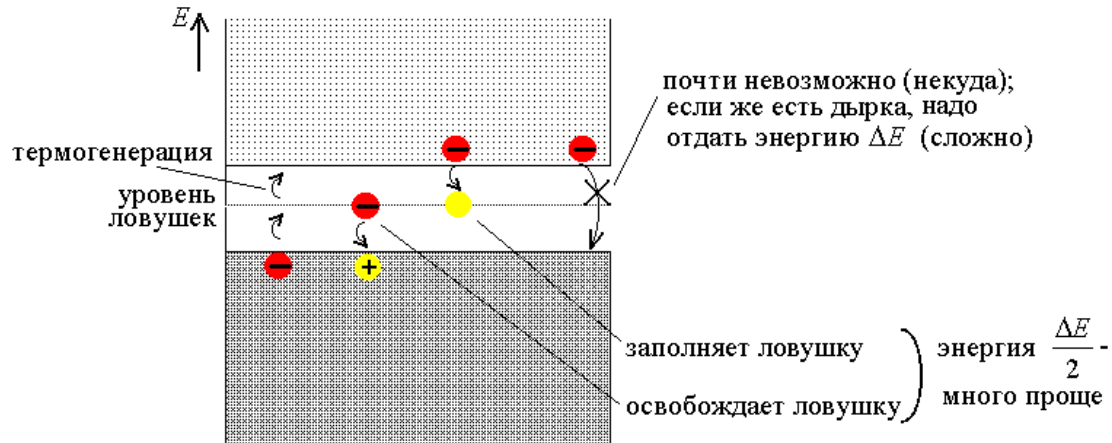
Реально высокоомные Si и Ge - компенсированные (сверхчистый Si обычно n-типа - т.к. не удаляется до конца P, сверхчистый Ge - обычно p-типа - не удаляется В)

Выполнение соотношения $n_p \cdot n_e = n_i^2$ обеспечивают **процессы рекомбинации** -

в основном - через **рекомбинацию на ловушках** (прямая "аннигиляция" дырки и электрона через образование экситона маловероятна)

Ловушки - слабоионизованные примеси, дефекты решетки (дислокации, т.д.),

кластеры (группы атомов примеси)



Концентрация ловушек так же влияет на темп термогенерации носителей - т.к. доноры и акцепторы ионизованы полностью (уже не генерируют), щель ΔE - велика \Rightarrow низкая скорость, зато для щели $\frac{\Delta E}{2}$ - скорость много выше (экспоненциально) - т.к. генерация - на "хвосте" распределения Больцмана и $\frac{\Phi}{\varphi_T} \approx \frac{1eV}{0.025eV} = 40 \Rightarrow$ выше в $\sim e^{40} = e^{20}$ раз

Концентрация ловушек так же влияет на **время жизни** носителей - характерное время существования носителя в полупроводнике до захвата или рекомбинации

τ_e - для электронов

τ_p - для дырок

Диффузионная длина l_d - расстояние, на которое носитель "отдиффундирует" за время жизни



$$l_e = D_e \tau_e^2 \text{ - для электронов и } l_p = D_p \tau_p^2 \text{ - для дырок}$$

где D_e и D_p - коэффициенты диффузии электронов и дырок

С коэффициентами диффузии связана **подвижность носителей** (соотношение

Эйнштейна): $\mu = \frac{q_e D}{kT}$, т.е.

$$\mu_e = \frac{q_e D_e}{kT} \text{ - для электронов и } \mu_p = \frac{q_p D_p}{kT} \text{ - для дырок}$$

Ранее для металлов удельная проводимость $\sigma = nq\mu$

Для полупроводников - две составляющие $\sigma = n_e q_e \mu_e + n_p q_p \mu_p$

$$\text{Для Si } \mu_e = 1200 \frac{\text{cm/sec}}{\text{V/cm}} \quad \mu_p = 500 \frac{\text{cm/sec}}{\text{V/cm}}$$

$$\text{Для Ge } \mu_e = 3600 \frac{\text{cm/sec}}{\text{V/cm}} \quad \mu_p = 1700 \frac{\text{cm/sec}}{\text{V/cm}}$$

Значение подвижности : определяет скорость перемещения носителей в электрическом поле \Rightarrow влияет на быстродействие приборов - на СВЧ применяют GaAs (повышенная подвижность)

Проблема полупроводников - **чистота**

Высокочистый (собственный) полупроводник - при условии, что $N_a, N_d \ll n_i$ - т.е. примеси не определяют проводимость

Очень жесткое условие :

в $1 \text{ cm}^3 \text{ Ge} \sim 5 \cdot 10^{22}$ атомов, и для $N_a, N_d \sim 0.1 n_i = 0.1 \cdot 2.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

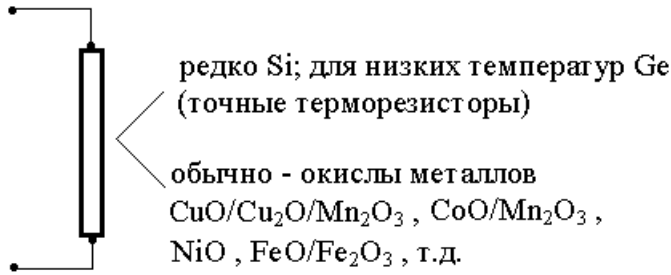
\Rightarrow допустимая доля примеси $< \frac{2.5 \cdot 10^{12}}{5 \cdot 10^{22}} \approx 5 \cdot 10^{-11} = 5 \cdot 10^{-9}\%$

Для Si еще жестче - $< 10^{-11}\%$ (т.к. ΔE больше и n_i меньше)

Другая проблема - **бездефектность** (совершенство кристалла)
(минимальная концентрация ловушек)

Простейшие полупроводниковые приборы : терморезистор, фоторезистор, варистор.

Терморезистор (термистор, термосопротивление) - зависимость сопротивления от температуры

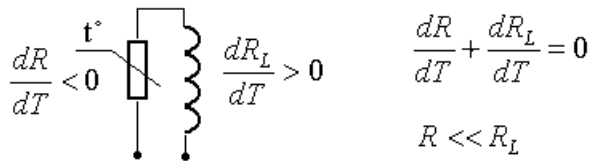


$$R \approx R_0 e^{B \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$$

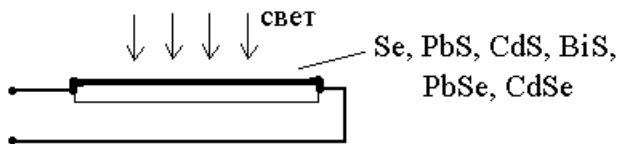
- экспоненциально падает с ростом абсолютной температуры

Основные применения - измерение температуры и термокомпенсация

Пример: компенсация ОС в цветных телевизорах и в дисплеях:



Фоторезисторы (фотосопротивления) - зависимость сопротивления от освещенности



$$R_\phi = R_0 \frac{I_{\phi 0}}{I_\phi}$$

- т.е. $i \propto I_\phi$ в большинстве случаев

Обычно $R_{ТЕМН} \sim 100K\Omega - 1G\Omega$ $R_{СВЕТ} \sim 100\Omega - 10K\Omega$

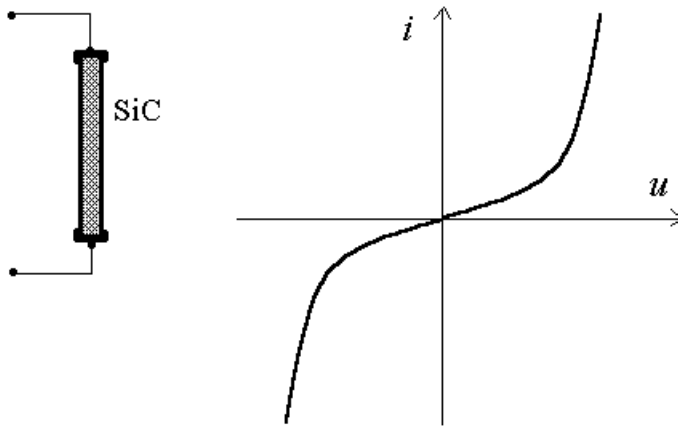
Применение - измерение и регулировка освещенности, фотодатчики

Недостаток - инерционность

Достоинство - обычно линейная зависимость $i(u) = \frac{u}{R(I_\phi)}$ (закон Ома) и

высокое внутреннее усиление

Варистор (нелинейное сопротивление)



Применение : стабилизация высоких напряжений (телевизоры, дисплеи), защита от перенапряжения