

Сегодня среда, 6
декабря 2017 г.

Раздел 7

Зонная теория твердых тел

Лекция 7/4

Собственная и примесная проводимость полупроводников

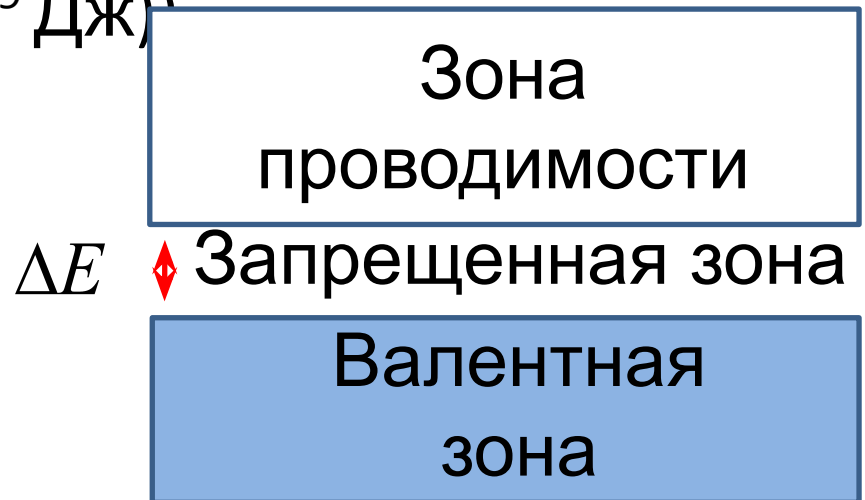
Лекция 7/4

Собственная и примесная проводимость полупроводников

1. Собственные полупроводники
2. Примесные полупроводники
3. Внутренний фотоэффект в полупроводниках

1. Собственные полупроводники. Электронная и дырочная проводимость.

Полупроводники – твердые тела, у которых, при $T=0$ К, валентная зона полностью занята электронами, а расстояние от нее до зоны проводимости (ширина запрещенной зоны) является сравнительно узким (ΔE порядка 1 эВ ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж))

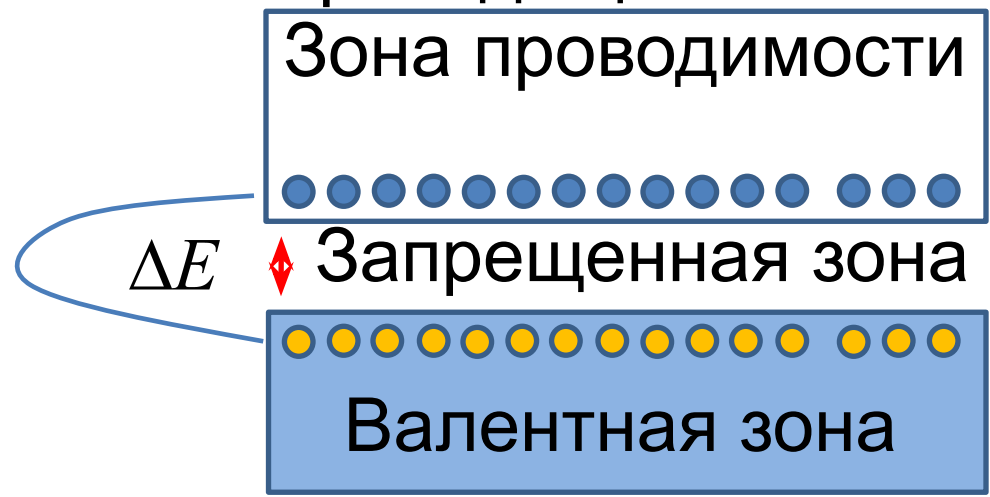
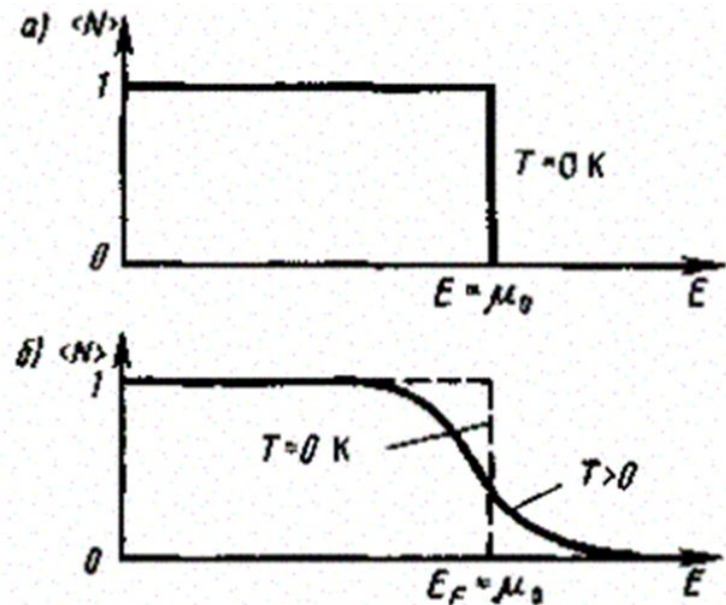


Собственные полупроводники – химически чистые (без примесей) элементы средней части таблицы Менделеева. Пример: Si, Ge, As, Te... (всего 12 элементов).

| | | | | |
|--|---|---|--|--|
| B 5 10,811 $2s^2 2p^1$ Бор | C 6 12,0107 $2s^2 2p^2$ Углерод | N 7 14,00674 $2s^2 2p^3$ Азот | O 8 15,9994 $2s^2 2p^4$ Кислород | F 9 18,9984 $2s^2 2p^5$ Фтор |
| Al 13 26,981538 $3s^2 3p^1$ Алюминий | Si 14 28,0855 $3s^2 3p^2$ Кремний | P 15 30,973761 $3s^2 3p^3$ Фосфор | S 16 32,066 $3s^2 3p^4$ Сера | Cl 17 35,4527 $3s^2 3p^5$ Хлор |
| Ga 31 69,723 $4s^2 4p^1$ Галий | Ge 32 72,61 $4s^2 4p^2$ Германий | As 33 74,9216 $4s^2 4p^3$ Мышьяк | Se 34 78,96 $4s^2 4p^4$ Селен | Br 35 79,904 $4s^2 4p^5$ Бром |
| In 49 114,818 $5s^2 5p^1$ Индий | Sn 50 118,710 $5s^2 5p^2$ Олово | Sb 51 121,76 $5s^2 5p^3$ Сурьма | Te 52 127,60 $5s^2 5p^4$ Теллур | I 53 126,90447 $5s^2 5p^5$ Иод |

При $T=0\text{K}$ полупроводник электричество не проводит.

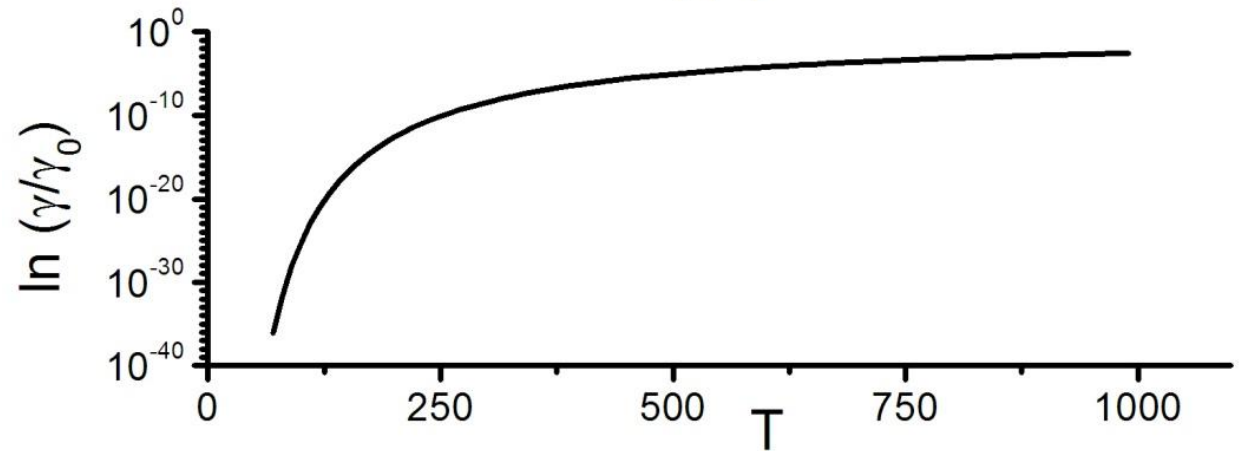
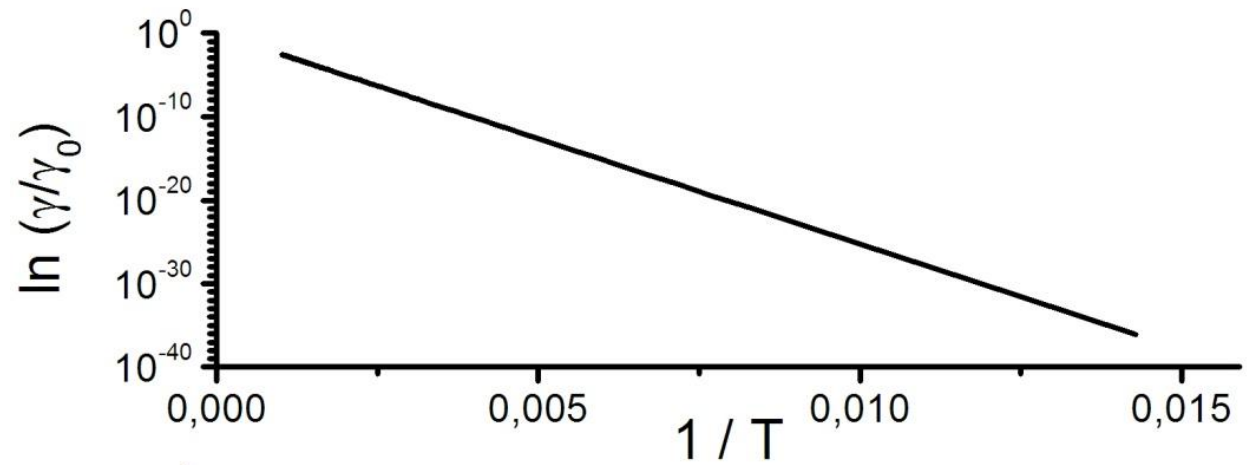
При повышении температуры часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости, и становится проводящим.



Полупроводник

Чем выше температура полупроводника, тем больше электронов в зоне проводимости, тем выше проводимость σ (ниже сопротивление).

$$\sigma \approx \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$



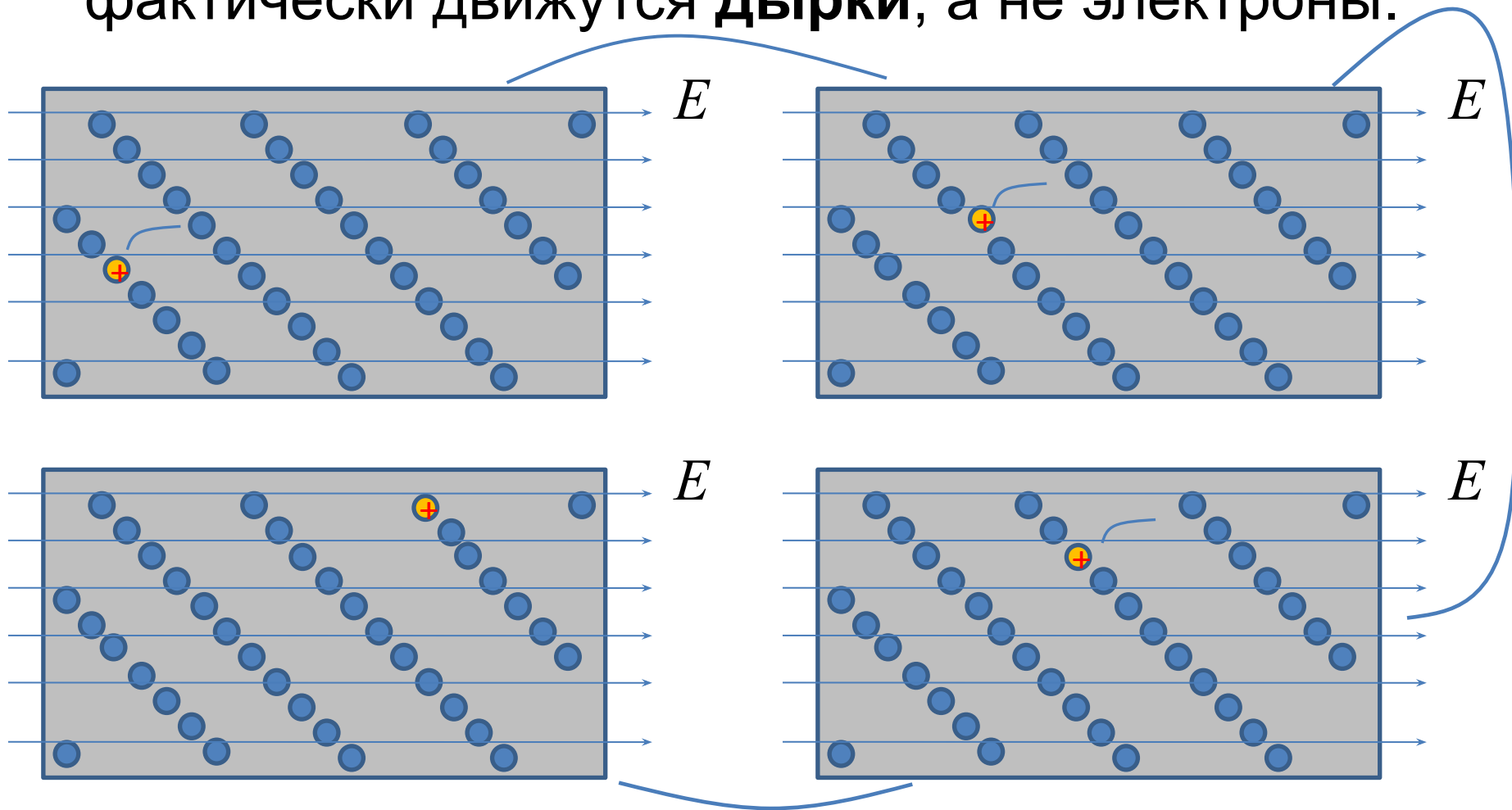
1.1 Электронная и дырочная проводимость

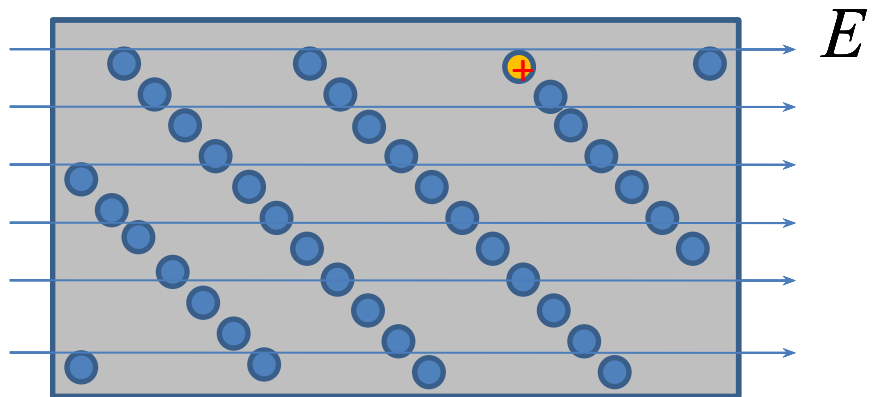
Проводимость, обусловленная наличием **электронов** в зоне проводимости, называется **электронной проводимостью** (или проводимостью **n-типа**).

После перехода части электронов в зону проводимости валентная зона остается не полностью заполненной, там появляются вакантные состояния (**дырки**).

Теперь электроны могут перемещаться и в валентной зоне.

На самом деле дырок в валентной зоне мало.
Поэтому, под действием внешнего поля,
фактически движутся **дырки**, а не электроны.





Дырка, как **отсутствие** электрона, передвигается так, будто она имеет положительный заряд ($|e|$).

Такая проводимость называется **дырочной** (или **p-проводимостью**).

В собственных полупроводниках наблюдается **два** типа проводимости: **электронная** и **дырочная**.

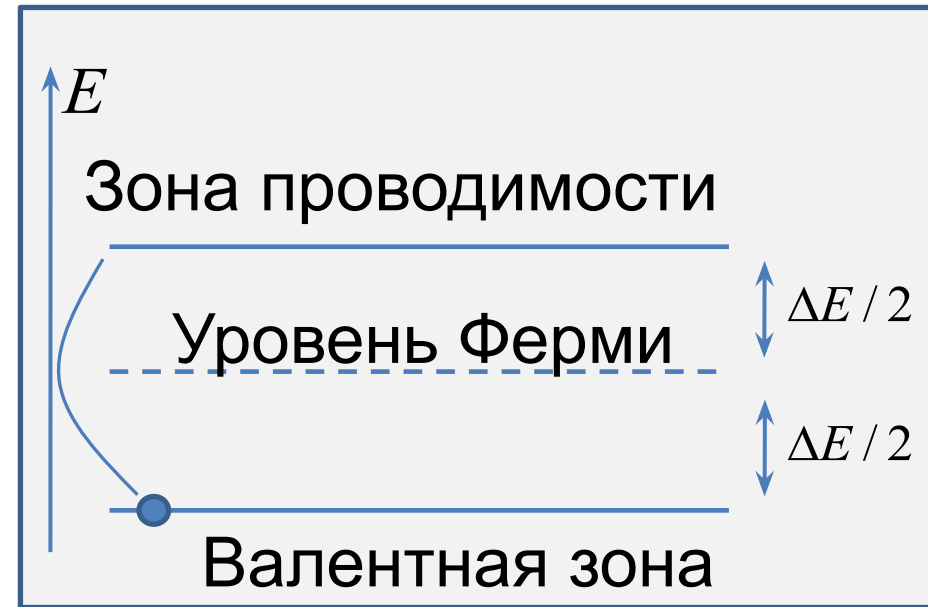
Концентрации носителей: $n_e = n_p$.

Рекомбинация — исчезновение пары электрон проводимости - дырка в результате перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону.

1.2 Энергия Ферми в полупроводниках

Энергия, необходимая для создания носителя тока (для перевода электрона в зону проводимости), отсчитывается от уровня Ферми. Но при переходе

электрона в зону проводимости создается два носителя (электрон и дырка). Получается, что на создание одного носителя тока уходит энергия $\Delta E/2$.



Но при переходе электрона в зону проводимости создается два носителя (электрон и дырка). Получается, что на создание одного носителя тока уходит энергия $\Delta E/2$.

Энергия Ферми (уровень ферми) в полупроводниках соответствует середине запрещенной зоны.

Из распределения Ферми-Дирака следует, что количество перешедших в зону проводимости электронов зависит от энергии конечных состояний E_i , значения энергии ферми E_F и температуры T полупроводника:

$$N_i = \frac{1}{e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} + 1} = \frac{1}{e^{\frac{\Delta E}{2kT}} + 1} \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

где $E_i - E_F = \Delta E/2$.

$$\sigma = \sigma_0 N_i \approx \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

Для $T=273\text{K}$ (0°C) получаем:

$$N_i = \frac{1}{e^{\frac{\Delta E}{2kT}} + 1}$$

$$kT = 3,7 \cdot 10^{-21} \text{ Дж};$$

$$\Delta E/2 = 0,5 \text{ эВ} = 0,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 80 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

$$N_i = \frac{1}{e^{21,6} + 1} \approx \frac{1}{2,5 \cdot 10^9} \approx 4 \cdot 10^{-10}.$$

Если в валентной зоне находится 10^{10} электронов, то при $T=273\text{K}$, четыре из них перейдут в зону проводимости.

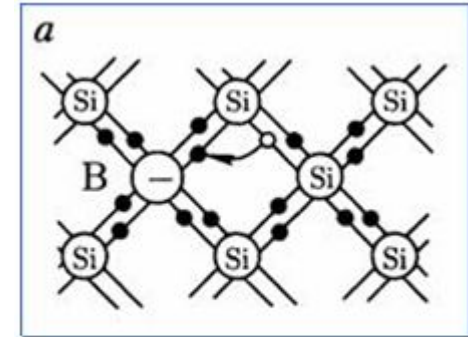
При температуре $T=373\text{K}$ – 13000 шт из 10^{10} .

При температуре $T=473\text{K}$ – 380000 шт из 10^{10} .

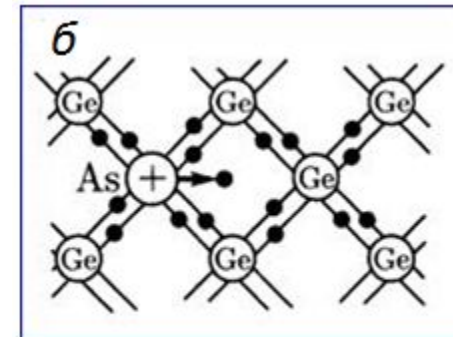
2. Примесные полупроводники

Примесная проводимость – проводимость полупроводников, обусловленная примесями (атомами посторонних элементов).

Для получения примесного полупроводника в полупроводник из Si или Ge вводят атомы с валентностью, отличной от валентности основных атомов на единицу.

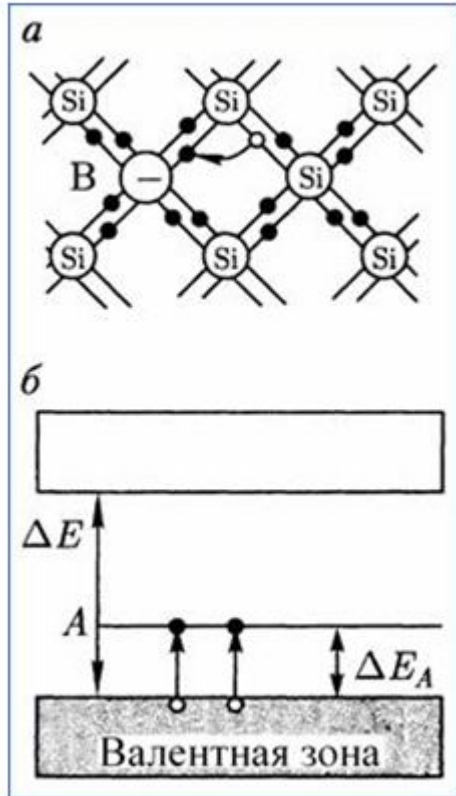


Si-IV, B-III.



Ge-IV, As-III.

Si-IV, B-III.

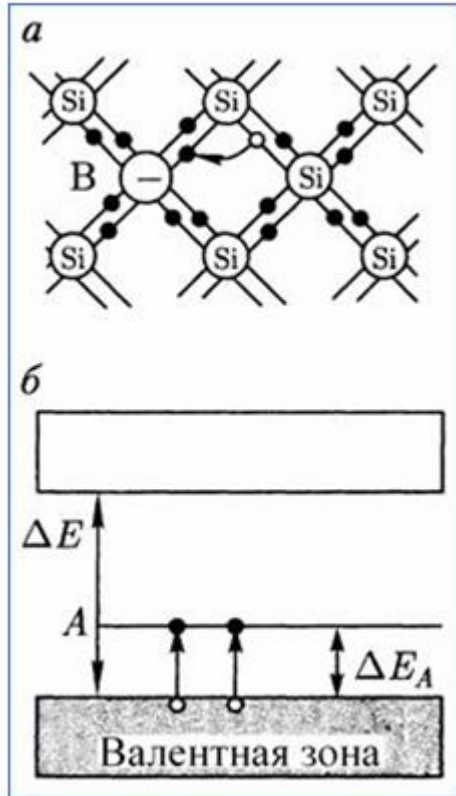


$$\Delta E_A = 0,08 \text{ эВ.}$$

Примеси с валентностью **меньше** валентности основных атомов на единицу (*a*) – **акцепторные примеси**.

Наличие примеси приводит к появлению в запрещенной зоне примесного энергетического уровня A , не занятого электронами.

Si-IV, B-III.

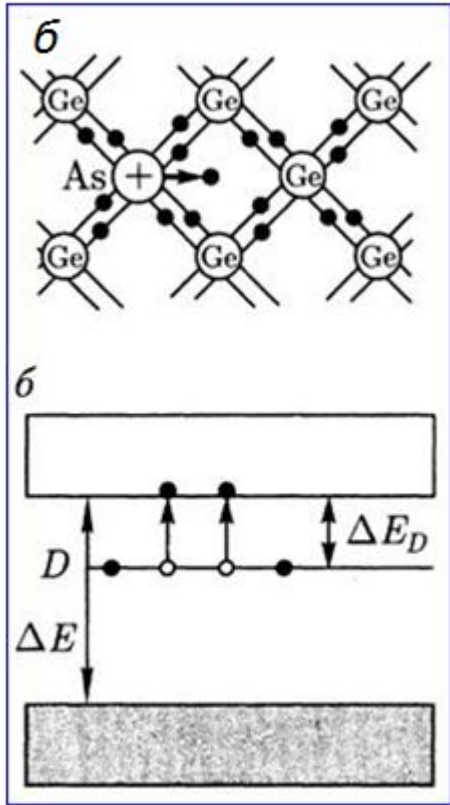


$$\Delta E_A = 0,08 \text{ эВ.}$$

Электроны перешедшие на этот уровень (A) остаются в связанном состоянии. А вот дырки образовавшиеся в валентной зоне участвуют в проводимости.

В таких полупроводниках (a) осуществляется дырочная проводимость (проводимость **p-типа**).

Ge-IV, As-V.

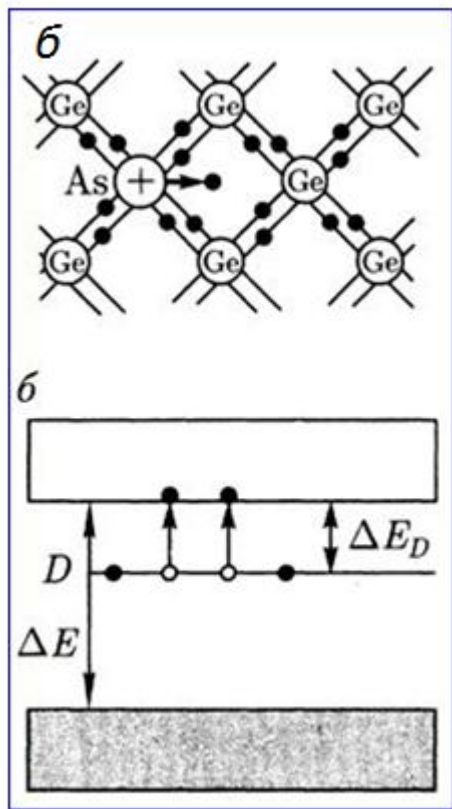


$$\Delta E_D = 0,013 \text{ эВ.}$$

Примеси с валентностью **больше** валентности основных атомов на единицу (**б**) – **донорные примеси**.

Наличие примеси приводит к появлению в запрещенной зоне примесного энергетического уровня D , занятого валентными электронами примеси.

Ge-IV, As-V.



$$\Delta E_D = 0,013 \text{ эВ.}$$

Электроны с этого уровня могут легко переходить в **зону проводимости** и участвовать в проводимости. Оставшиеся на уровне D дырки связаны с атомом примеси и в проводимости не участвуют.

В таких полупроводниках (б) осуществляется электронная проводимость (проводимость **n-типа**).

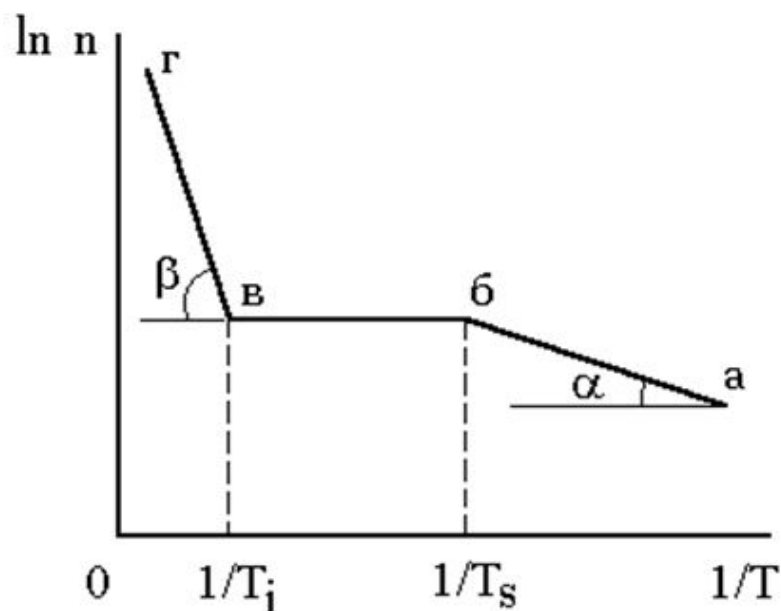
Концентрация n_0 носителей тока складывается из концентрации носителей при собственной $n_0^{\text{соб}}$ и примесной $n_0^{\text{пр (n(p))}}$ проводимостях:

$$n_0 = n_0^{\text{соб}} + n_0^{\text{пр(n(p))}}.$$

$$n_0^{\text{соб}} \sim e^{-\frac{\Delta E_0}{2kT}}$$

$$n_0^{\text{пр(p)}} \sim e^{-\frac{\Delta E_A}{2kT}} \quad \text{концентрация дырок}$$

$$n_0^{\text{пр(n)}} \sim e^{-\frac{\Delta E_D}{2kT}} \quad \text{концентрация электронов}$$



3. Внутренний фотоэффект в полупроводниках.

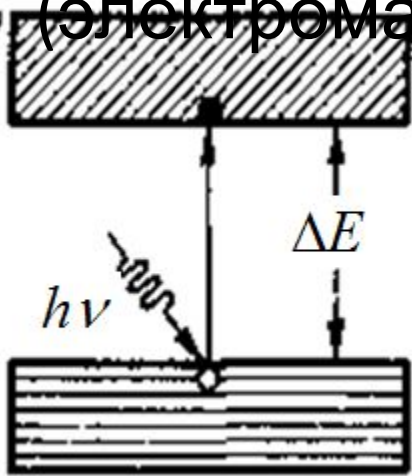
Внутренний (полупроводниковый) фотоэффект

– увеличение электропроводности полупроводников под действием света

(электромагнитного излучения) наблюдается при поглощении фотонов, имеющих энергию равную (большую) ширине запрещенной зоны:

$$h\nu \geq \Delta E.$$

При этом электроны перебрасываются из валентной зоны в зону проводимости (а).



Тогда для полупроводника существует красная граница внутреннего фотоэффекта – это минимальная частота $\nu_{\text{гр}}$ или максимальная длина волны $\lambda_{\text{гр}}$, с которой внутренний фотоэффект начинается

$$\nu_{\text{гр}} = \frac{\Delta E}{h}, \text{ Гц}; \quad \lambda_{\text{гр}} = \frac{hc}{\Delta E}, \text{ м} - \text{ для собственных полупроводников};$$

$$\nu_{\text{гр}} = \frac{\Delta W_{i(A(D))}}{h}, \text{ Гц}; \quad \lambda_{\text{гр}} = \frac{hc}{\Delta W_{i(p)}}, \text{ м} - \text{ для примесных полупроводников}.$$

Фоторезистор — полупроводниковый прибор, изменяющий величину своего сопротивления при облучении светом.

В зависимости от ширины запрещенной зоны фоторезисторы могут реагировать на инфракрасное, видимое и прочее излучение.

