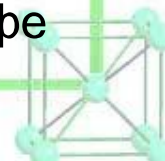
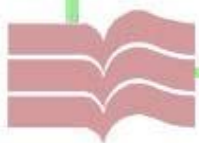


Статистика электронов в полупроводниках Собственная проводимость

Лекция 27

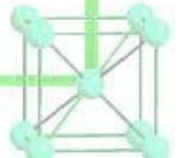
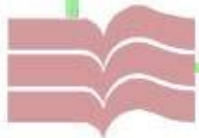
*Вся окружающая нас неорганическая природа состоит
из полупроводящих веществ.*

А.Ф.Иоффе



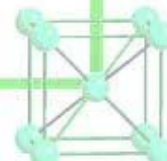
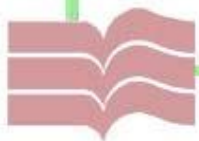
Характеристика полупроводников

- Проводимость полупроводников по сравнению с типичными диэлектриками и металлами имеет промежуточное значение:
- диэлектрики — $\sigma \sim 10^{-16} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;
- полупроводники — $\sigma \sim (10^{-4} \dots 10^5) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;
- металлы — $\sigma \sim (10^6 \dots 10^8) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
- Отличием от металлов является характер температурной зависимости проводимости

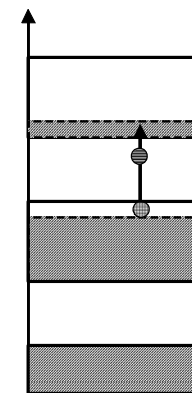
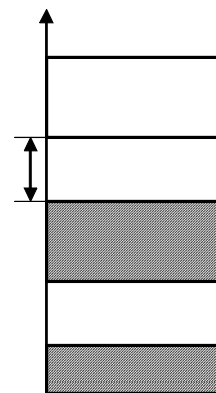
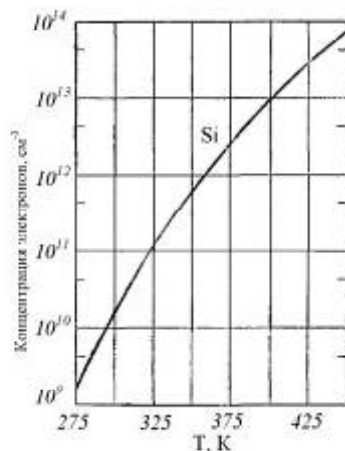
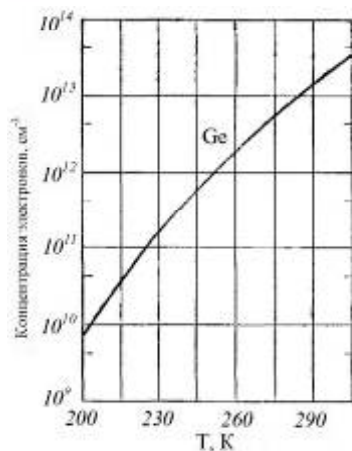


Применения полупроводников

- Полупроводниковые термоэлектрогенераторы;
- Полупроводниковые диоды для выпрямления переменного тока и детектирования модулированных колебаний;
- Туннельные диоды для генерации сверхвысокочастотных электромагнитных волн;
- Свето- и фотодиоды, фотоэлементы, солнечные батареи;
- Термисторы и тензорезисторы (их сопротивления известным образом зависят от температуры или механического давления);
- Варикапы (конденсаторы с изменяемой электрическим полем емкостью);
- Биполярные и полевые транзисторы, микросхемы различного назначения на их основе;
- Запоминающие устройства (оперативная память ЭВМ);
- Приборы с зарядовой связью, применяемые, например, для создания миниатюрных видеокамер;
- Высокотемпературные полупроводниковые нагревательные элементы.



Эффект собственной проводимости и ширина запрещенной зоны



- Беспримесные кристаллы полупроводников и многие диэлектрики обнаруживают при повышенных температурах проводимость, экспоненциально возрастающую с ростом температуры. Это обстоятельство связано с термической активацией электронов и их перебросом из валентной зоны в зону проводимости
- Вероятность переброса резко возрастает, когда выполняется неравенство:

$$k T \geq E$$

- E - ширина запрещенной зоны

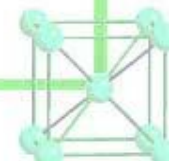
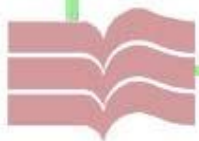
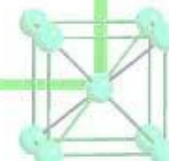
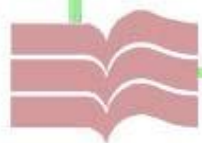
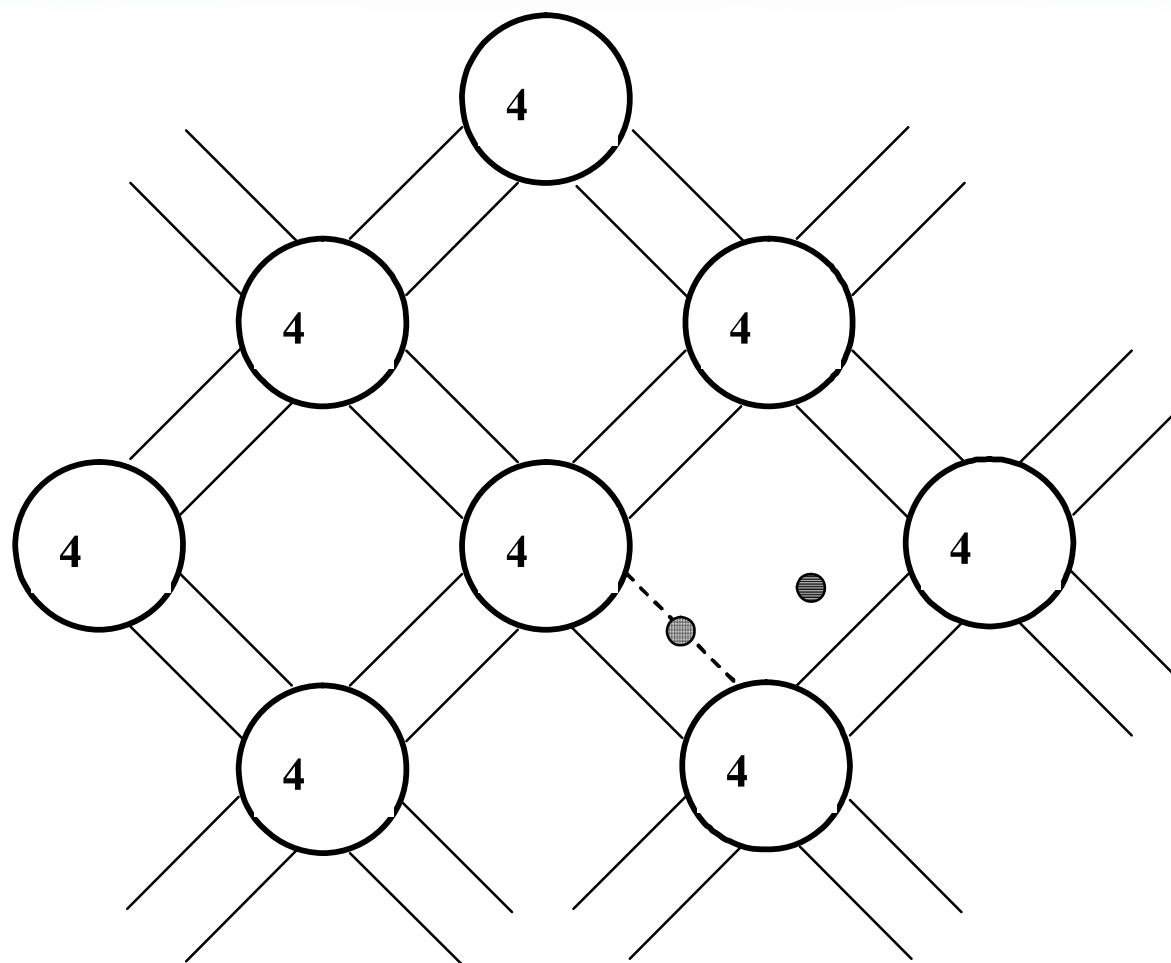


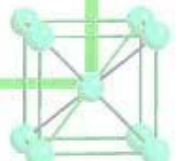
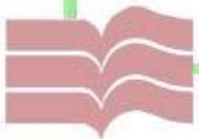
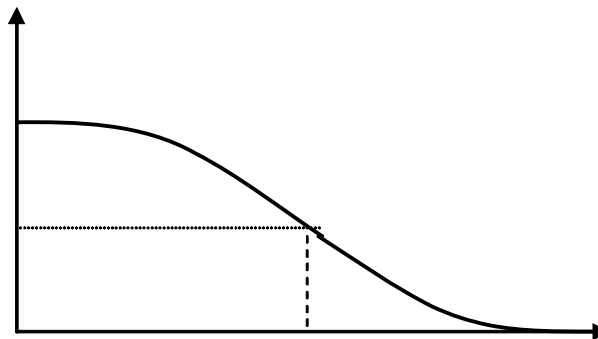
Схема валентных связей в кристаллах со структурой типа алмаза



Невырожденный электронный газ в полупроводниках

$\varepsilon - \mu \gg k T$ условие невырожденного электронного газа в полупроводнике при конечных температурах

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{k T}\right)} \quad \left. \varepsilon - \mu \gg k T \right\} \quad f(\varepsilon) \approx \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{k T}\right) = A \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k T}\right)$$



Концентрация электронов (дырок) в зоне проводимости (валентной зоне). Закон действующих масс

- Воспользуемся представлением электронного газа в модели сильной связи, справедливым в окрестности центра зоны Бриллюэна

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \varepsilon_0 + \frac{p^2}{2m} \quad p = \sqrt{2m(\varepsilon - \varepsilon_0)},$$

$$dp = \frac{1}{2} \sqrt{2m(\varepsilon - \varepsilon_0)}^{-1/2} d\varepsilon.$$

$$dN = D(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{V}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{3/2} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_0} d\varepsilon$$

$$D(\varepsilon) = \frac{V}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{3/2} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_0}$$

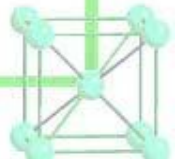
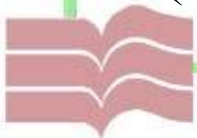
$$n = \frac{1}{V} \int f(\varepsilon) D(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{3/2} e^{-\beta \varepsilon_0} \int e^{-\beta(\varepsilon - \varepsilon_0)} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_0} d\varepsilon =$$

$$= 2 \left(\frac{mkT}{2\pi\hbar} \right)^{3/2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\beta \varepsilon_0} \int_0^\infty e^{-x} x^{1/2} dx = N \Phi \left(\frac{\mu - \varepsilon_0}{kT} \right), \quad x = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{kT}$$

$$N = 2 \left(\frac{mkT}{2\pi\hbar} \right)^{3/2} e^{-\beta \varepsilon_0}$$

эффективная плотность состояний электронов в зоне проводимости

$$\Phi \left(\frac{\mu - \varepsilon_0}{kT} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\beta \varepsilon_0} \int_0^\infty e^{-x} x^{1/2} dx \quad \text{один из семейства интегралов Ферми-Дирака}$$



Концентрация электронов (дырок) в зоне проводимости (валентной зоне). Закон действующих масс

$$\int e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

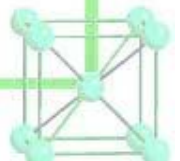
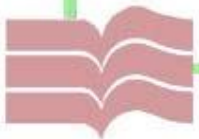
$$\Phi\left(\frac{\mu - \varepsilon}{kT}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{\mu - \varepsilon}{kT}\right)^2} \int e^{-x^2} dx = \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{kT}\right)$$

$$n = N \Phi\left(\frac{\mu - \varepsilon}{kT}\right) = N \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{kT}\right) = 2 \left(\frac{mkT}{2\pi\hbar}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{kT}\right)$$

$$\mu = \varepsilon - kT \ln\left(\frac{N}{n}\right)$$

при переходе одного электрона в зону проводимости в собственном (беспримесном) полупроводнике одновременно появляется пара носителей заряда: электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне

закон дисперсии для
"свободных" дырок,
действующий на границе
зоны Бриллюэн

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{p^2}{2m}$$


Концентрация электронов (дырок) в зоне проводимости (валентной зоне). Закон действующих масс

$$D(\varepsilon) = \frac{V}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{3/2} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_g} \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \varepsilon_g + \frac{p^2}{2m} \\ D(\varepsilon) = \frac{V}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{3/2} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_g} \end{array} \right.$$

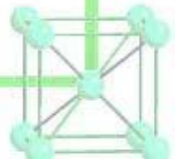
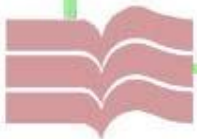
Вероятность обнаружить дырку с данной энергией при определенной температуре может быть также определена с помощью функции типа распределения Ферми-Дирака

$$f(\varepsilon) = 1 - f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{kT}\right)}$$

Аналогично случаю невырожденного электронного газа, существует и газ невырожденных дырок, $f(\varepsilon) \approx \exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{kT}\right)$

$$n = \frac{1}{V} \int f(\varepsilon) D(\varepsilon) d\varepsilon = 2 \left(\frac{m k T}{2\pi\hbar} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{\varepsilon_g - \mu}{kT}\right) = N \exp\left(\frac{\varepsilon_g - \mu}{kT}\right)$$

$$\mu = \varepsilon_g + kT \ln\left(\frac{N}{n}\right)$$



Закон действующих масс

Для собственного полупроводника выполняется условие $n = n = n$

$$\left. \begin{aligned} n &= 2 \left(\frac{mk T}{2\pi\hbar} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{k T}\right) \\ n &= 2 \left(\frac{m k T}{2\pi\hbar} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{k T}\right) \end{aligned} \right\} n n = n = 4 \left(\frac{k T}{2\pi\hbar} \right)^3 (mm)^{3/2} \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon}{k T}\right) = N N \exp\left(-\frac{E}{k T}\right)$$

закон действующих масс

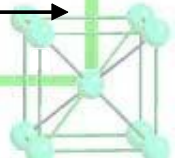
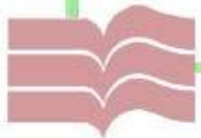
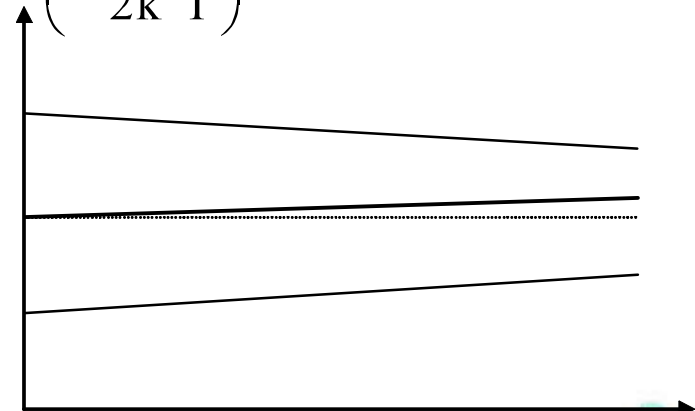
$$n = 2 \left(\frac{k T}{2\pi\hbar} \right)^{3/2} (mm)^{3/2} \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon}{2k T}\right) = \sqrt{N N} \exp\left(-\frac{E}{2k T}\right)$$

$E = \varepsilon - \varepsilon$ ширина запрещенной зоны

$$N \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{k T}\right) = N \exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{k T}\right)$$

$$\mu = E - \frac{1}{2} k T \ln\left(\frac{N}{N}\right) = E - \frac{3}{4} k T \ln\left(\frac{m}{m}\right)$$

$$E = E - \alpha T$$



Собственная проводимость полупроводников

$$\sigma = en\mu, \quad \mu_n = \frac{e\tau_n}{m}.$$

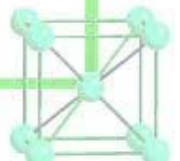
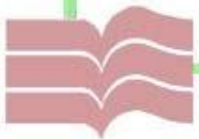
удельная электронная электропроводность в полупроводнике

$$\sigma = ep\mu, \quad \mu_p = \frac{e\tau_p}{m_h}.$$

удельная дырочная электропроводность в полупроводнике

$$\sigma_i = e(n\mu_n + p\mu_p).$$

проводимость собственного полупроводника



Подвижность носителей заряда при комнатной температуре

Кристалл	Подвижность, см /В×с		Кристалл	Подвижность, см /В×с	
	Электроны	Дырки		Электроны	Дырки
Алмаз	1800	1200	GaSb	4000	1400
Кремний	1300	500	PbS	550	600
Германий	4500	3500	PbSe	1020	930
InSb	77000	750	PbTe	1620	750
InAs	33000	460	AgCl	50	-
InP	4600	150			

