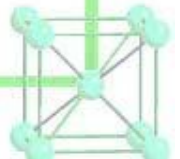
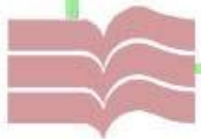
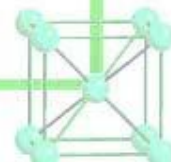
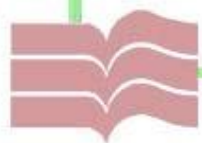
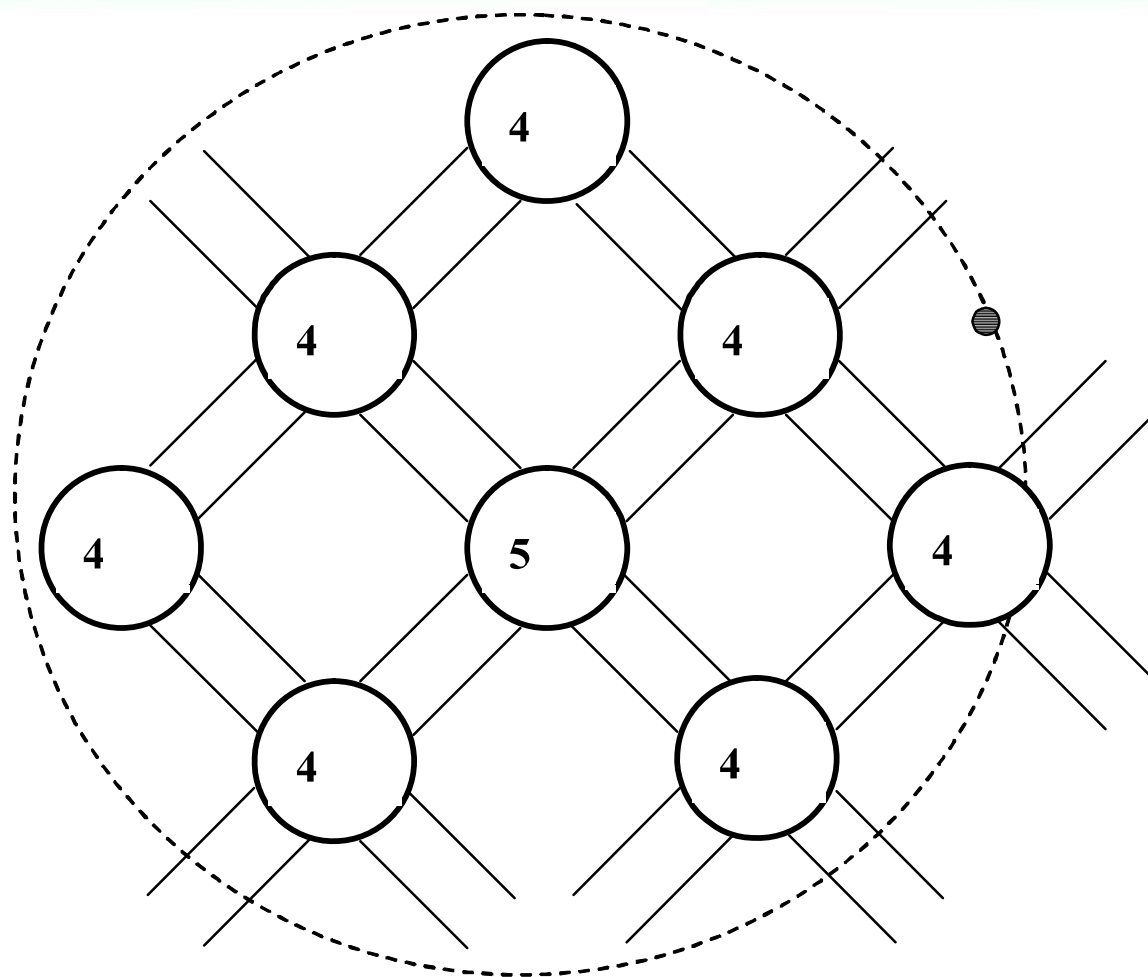


**Примесные
полупроводники.
Водородоподобная модель.
Подвижность носителей.
Полупроводники как
материалы
микроэлектроники**

Лекция 28



Водородоподобная модель простых донорных и акцепторных центров



Водородоподобная модель простых донорных и акцепторных центров

- Энергия связи и радиус электрона в атоме водорода в основном состоянии определены соотношениями:

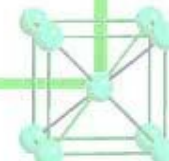
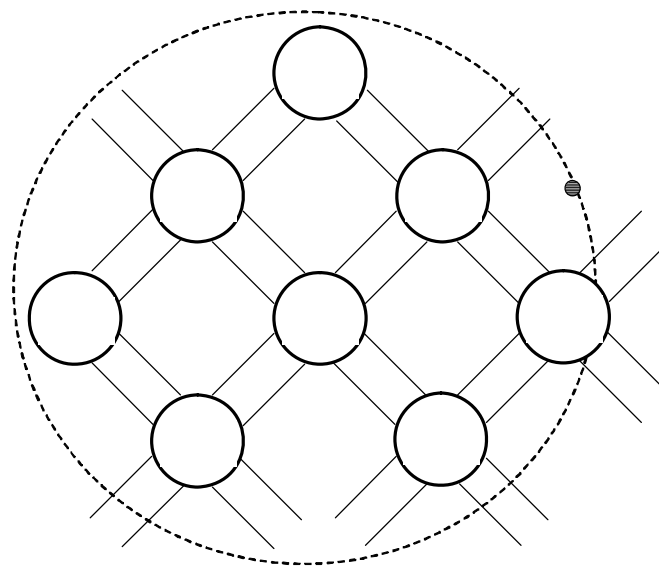
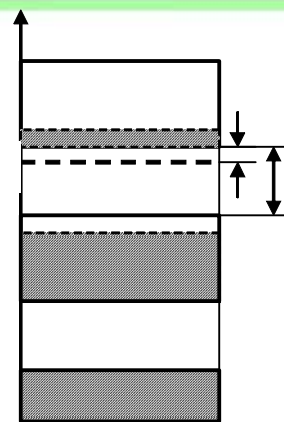
$$E = -\frac{e^2}{2r} = -\frac{m e^4}{2(4\pi\epsilon \hbar)^2} \quad r = \frac{4\pi\epsilon \hbar^2}{m e^2}$$

- для энергии и «боровского радиуса» такого примесного атома можно записать, если заменить

$$m_0 \rightarrow m \quad e \rightarrow \frac{e}{\epsilon}$$

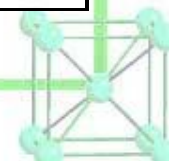
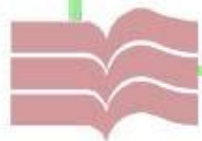
$$E = -\frac{e^2}{2r} = -\frac{\frac{e^2}{\epsilon}}{2(4\pi\epsilon \frac{\hbar^2}{m e^2})} = -\frac{m e^4}{2(4\pi\epsilon \hbar)^2}$$

$$r = \frac{4\pi\epsilon \hbar^2}{m e^2}$$



Энергия ионизации донорных и акцепторных примесей в полупроводниках (10^{-3} эВ)

	Доноры			Акцепторы			
	P	As	Sb	B	Al	Ga	In
Si	45,3	53,5	42,5	44,3	68,4	72,3	155
Ge	12,7	14,0	10,2	10,6	10,9	11,1	11,7



Концентрация электронов в зоне проводимости донорного полупроводника

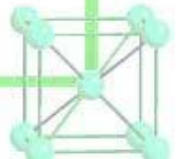
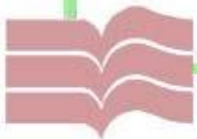
- Рассмотрим электронный полупроводник, в котором структурные примеси V группы Периодической системы создают так называемые простые центры. В этом случае примесный центр может находиться в одном из двух зарядовых состояний: заполненном – «лишний» пятый электрон находится в окрестности примесного атома; пустом – электрон покидает примесный атом и оказывается в зоне проводимости

$$N_1 = N_d f \quad N_0 = N_d (1 - f) \quad \frac{N_1}{N_0} = \frac{f}{1 - f} = \exp\left(\frac{\mu - E}{k T}\right)$$

$$N_0 + N_1 = N_d \quad F = \frac{N_1}{N_d} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - \mu}{k T}\right)} \quad F = \frac{N_1}{N_d} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\mu - E}{k T}\right)}$$

В однородной проводящей среде, находящейся в равновесии, объемный заряд вследствие кулоновского взаимодействия существовать не может.

$$n_p + n_i - n_e - n_a = 0 \quad n_p \ll n_e \quad |n_p| = |n_i|$$



Концентрация электронов в зоне проводимости донорного полупроводника

$$F = \frac{N}{N} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\mu - E}{k T}\right)}$$

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

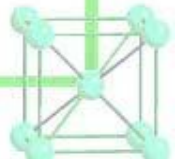
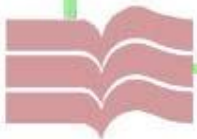
$$\exp\left(\frac{\mu - E}{k T}\right) = \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{k T}\right) \cdot \exp\left(\frac{E - \varepsilon}{k T}\right) = \frac{n}{N} \exp\left(\frac{J}{k T}\right)$$

$$N \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{k T}\right) = \frac{N}{1 + \frac{n}{N} \exp\left(\frac{J}{k T}\right)};$$

$$n = \frac{N}{1 + \frac{n}{N} \exp\left(\frac{J}{k T}\right)} = \frac{N}{1 + \frac{n}{N}},$$

$$N \left[1 + \exp\left(\frac{\mu - E}{k T}\right) \right] = N \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{k T}\right)$$

$J = \varepsilon_c - E_d$ - энергия ионизации примесного уровня



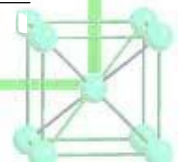
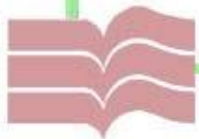
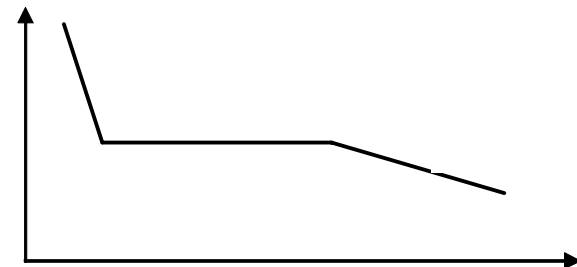
Температурная зависимость концентрации электронов в зоне проводимости донорного полупроводника

$$n = \frac{N}{1 + \frac{n}{n_1}} \quad n + n n - n N = 0 \quad n = \frac{n}{2} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{N}{n}} - 1 \right)$$

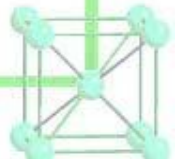
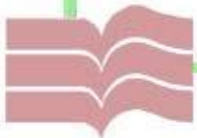
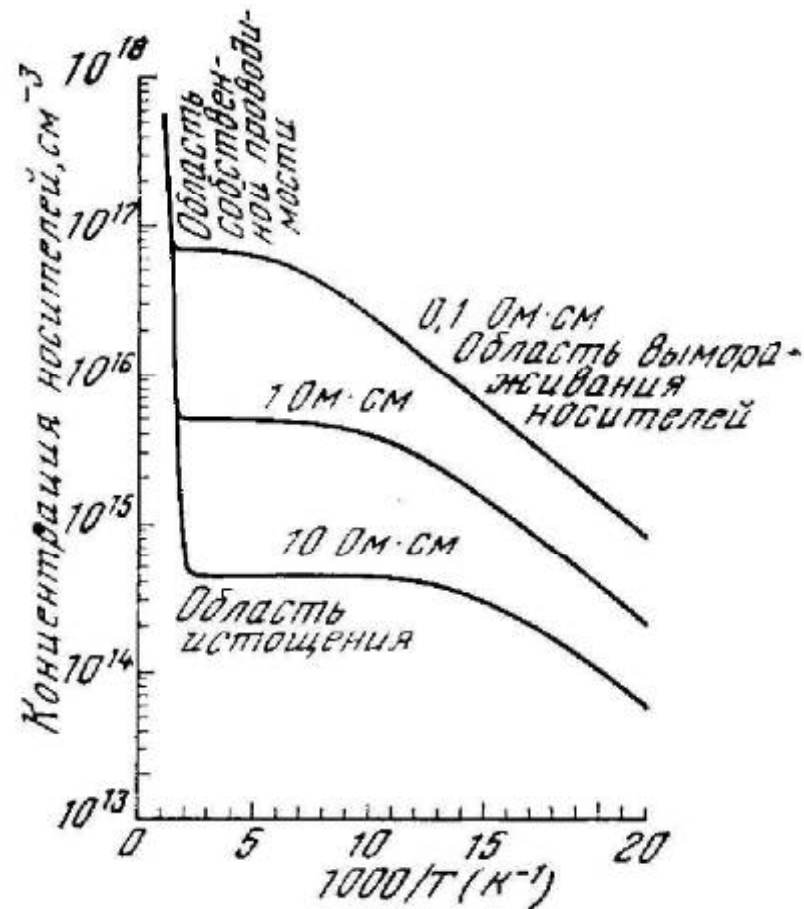
Физически значимое решение – неотрицательная концентрация

При достаточно низких температурах донорный уровень практически не ионизирован $\frac{4N}{n} \gg 1$ $n_e = \sqrt{N_c N_d} \exp\left(-\frac{J}{2k_B T}\right)$

При высоких температурах (но значительно ниже той, при которой возбуждается собственная проводимость) $\frac{4N_d}{n_1} \ll 1$ $n = N$



Температурные зависимости концентрации носителей в кремнии, легированном фосфором

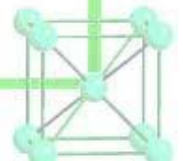
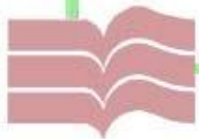
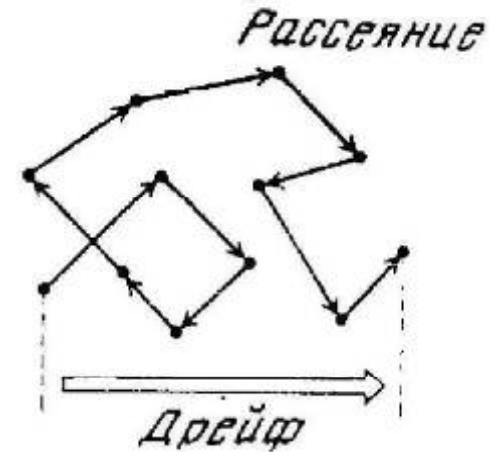


Подвижность

- Наиболее важным параметром при рассмотрении переноса носителей заряда в полупроводниках является подвижность, определяющая дрейфовую скорость электрона

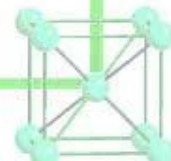
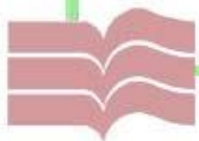
$$v = \mu E$$

- Подвижность определяется процессами многократного повторения ускорения носителя электрическим полем, рассеяния, изменения направления движения, повторного ускорения, снова рассеяния и т. д.



Подвижность

- На величину подвижности оказывают влияние: величина ускорения в промежутках между циклами рассеяния, частота циклов рассеяния и величина потерь составляющей импульса носителя в направлении поля за один цикл рассеяния
- Чем меньше эффективная масса носителей, тем более высокую подвижность они имеют
- В кристаллах с высоким совершенством решётки (Si, GaAs) – основной механизм - *рассеяние на колебаниях решётки* (фононное рассеяние) и *рассеяние на ионах примеси*.
- При понижении температуры рассеяние на колебаниях решётки ослабевает.
- При рассеянии на акустических фононах $\mu \sim T$.
- Рассеяние на ионах примесей (*рассеяние Резерфорда*) определяется кулоновским взаимодействием между заряженными носителями и ионами примесей. При повышении температуры кинетическая энергия носителей возрастает, и рассеяние на ионах ослабевает:
 $\mu \sim T^3 / N$



GaAs

- $E_g = 1,42$ эВ (большая ширина запрещённой зоны – материал, более надёжный в устройствах микроэлектроники)
- $\mu_n = 8000$ см²/В·с (в несколько раз превышает подвижность в Si или Ge – возможность применения материала в области более высоких частот в аналоговых устройствах или для изготовления быстродействующих цифровых БИС)
- Доноры - элементы VI группы (S, Te)
- Акцепторы - элементы II группы (Be, Zn)
- Элементы IV группы – амфотерные примеси. Является ли амфотерная примесь донорной или акцепторной, зависит от условий её введения
- Переходные и благородные металлы - примеси с большой энергией ионизации и образуют глубокие уровни в запрещённой зоне. Эти глубокие уровни выполняют роли центров генерации, рекомбинации и захвата носителей и оказывают влияние на время жизни носителей

