

**Полупроводники.  
Собственная проводимость  
полупроводников**



Доц., к.т.н. Мурашов Ю.В.  
[iurimurashov@gmail.com](mailto:iurimurashov@gmail.com)

120



**POLYTECH**  
Institute of Energy and  
Transport Systems

# Полупроводники. Общие сведения

## Общие сведения

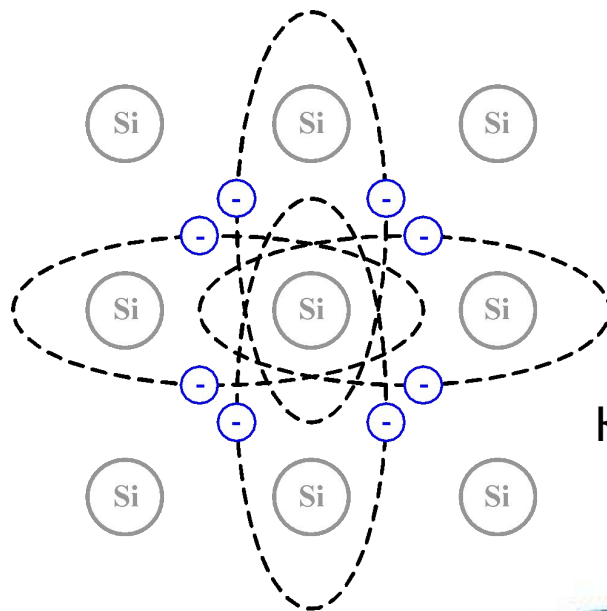
Полупроводники – твердые тела, у которых при  $T=0$  валентная зона полностью заполнена и отделена от зоны проводимости узкой по сравнению с диэлектриками запрещенной зоной.

Различия полупроводников и металлов:

1. удельное сопротивление полупроводников обычно существенно выше, чем металлов:
2. удельное сопротивление полупроводников быстро падает с ростом температуры – у металлов возрастает (и зависимость существенно слабее);
3. удельное сопротивление полупроводников существенно уменьшается с ростом концентрации примесей – у металлов зависимость слабая и противоположная:
4. удельное сопротивление полупроводников зависит от облучения светом или ионизирующей радиацией – для металлов подобное влияние отсутствует.

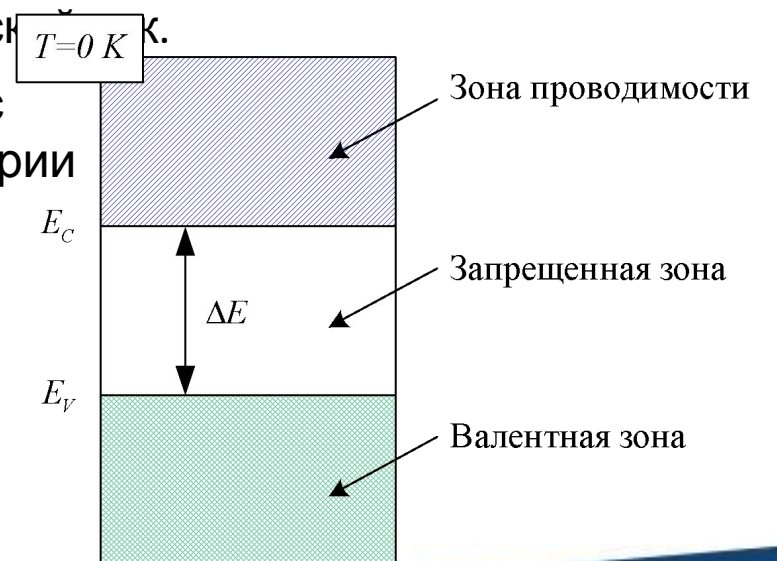
# Собственная проводимость полупроводников

Внешняя электронная оболочка кремния  $Si$  ( $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ ) содержит четыре валентных электрона. При образовании кристалла они образуют четыре ковалентные связи. В узле кристаллической решетки лежит ион кремния, который окружен четырьмя ближайшими соседями. На каждую ковалентную связь приходится по два электрона. Все электроны находятся в связанном состоянии, свободных зарядов нет и такой кристалл не проводит электрический ток при  $T=0\text{ K}$ .



Кристалл собственного полупроводника кремния

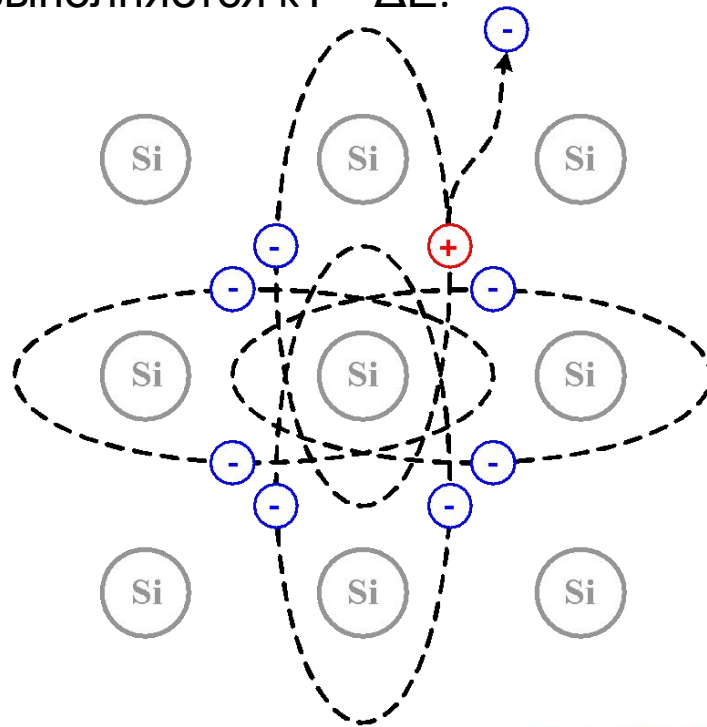
Полупроводник с позиции зонной теории



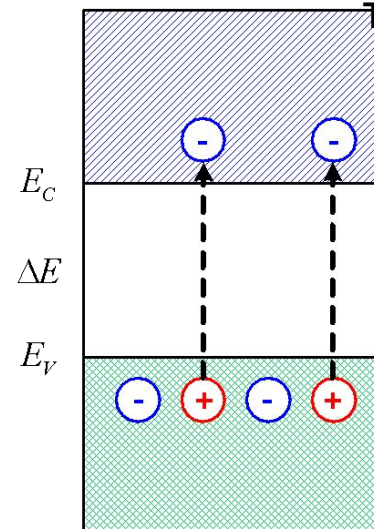


# Собственная проводимость полупроводников

Под действием внешних факторов, прежде всего теплового возбуждения, ковалентная связь может быть разорвана, при этом электрон становится свободным. Вероятность разрыва резко возрастает, если выполняется  $kT \sim \Delta E$ .



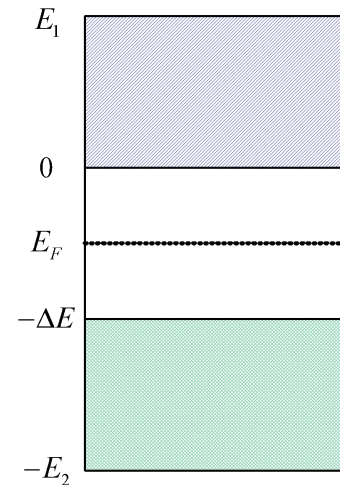
Разрыв ковалентной связи в рамках зонной теории



## Собственная проводимость полупроводников

$$f_e(E) = \left( \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1 \right)^{-1} \approx \exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right) \quad (1)$$

Примем минимальную энергию зоны проводимости за начало отсчета. Тогда максимальная энергия зоны проводимости  $E_1$ , максимальная энергия валентной зоны  $-\Delta E$ , а минимальная энергия валентной зоны  $-E_2$ .



$$dZ = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e)^{3/2} \sqrt{E} dE \quad (2)$$

$$n_e = \int_0^{E_1} f_e(E) dZ \quad (3)$$

$$n_e = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e)^{3/2} \int_0^{\infty} \exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right) \sqrt{E} dE \quad (4)$$

$$n_e = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e kT)^{3/2} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \quad (5)$$

## Собственная проводимость полупроводников

$$f_p(E) = 1 - f_e(E) \quad (6)$$

Подставляя функцию Ферми - Дирака получаем:

$$f_e(E) = 1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \approx \left(\exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right) + 1\right)^{-1} \quad (7) \quad dZ = \frac{4\pi}{h^3} (2m_p)^{3/2} \sqrt{W} dW \quad (10)$$

$$f_p(E) \approx \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) \quad (8) \quad n_p = \frac{4\pi}{h^3} (2m_p)^{3/2} \int_0^\infty \exp\left(\frac{W_F - W}{kT}\right) \sqrt{W} dW \quad (11) \quad n_p = \frac{2}{h^3} (2\pi m_p kT)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F + \Delta E}{kT}\right) \quad (12)$$

$$n_p = \int_{-E_2}^{-\Delta E} f_p(E) dZ \quad (9)$$

$$(m_e)^{3/2} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) = (m_p)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F + \Delta E}{kT}\right) \quad (13)$$

## Собственная проводимость полупроводников

Преобразовывая, получаем, что при  $T=0$  К уровень Ферми лежит ровно посередине запрещенной зоны полупроводника:

$$E_F = -\frac{\Delta E}{2} + \frac{3}{4}kT \cdot \ln\left(\frac{m_p}{m_e}\right) \quad (14)$$

$$n = \sqrt{n_e n_p} = \frac{2}{h^3} \left(2\pi \sqrt{m_e m_p} kT\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (15)$$

$$\sigma = n_e e \mu_e + n_p e \mu_p \quad (16)$$

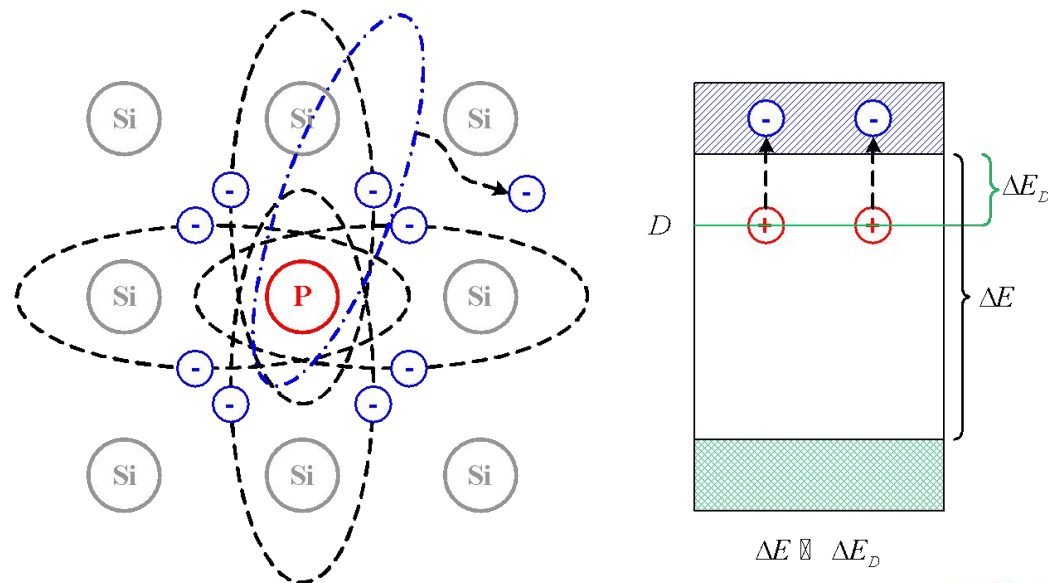
$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (17)$$





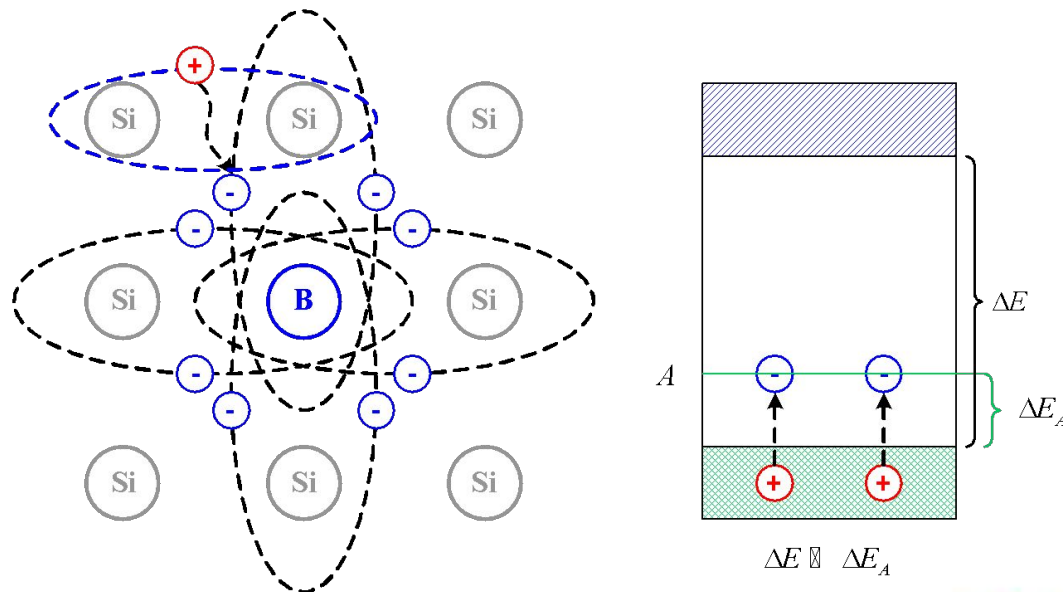
# Примесная проводимость полупроводников

Наличие примесей, атомов других химических элементов, и дефектов, нарушений регулярного порядка, в кристаллической решетке существенно меняет проводимости полупроводника. Проводимость, обусловленная наличием примесей, называется примесной. Примеси приводят к появлению в запрещенной зоне кристалла энергетических уровней, положение которых зависит от типа примеси или дефекта.



# Примесная проводимость полупроводников

Наличие примесей, атомов других химических элементов, и дефектов, нарушений регулярного порядка, в кристаллической решетки существенно меняет проводимости полупроводника. Проводимость, обусловленная наличием примесей, называется примесной. Примеси приводят к появлению в запрещенной зоне кристалла энергетических уровней, положение которых зависит от типа примеси или дефекта.



Спасибо за внимание