

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Полупроводники с собственной электропроводностью

Удельное сопротивление:

- Медь - $\rho = 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
- Полиэтилен - $\rho = 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$,
- Кремний - $\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

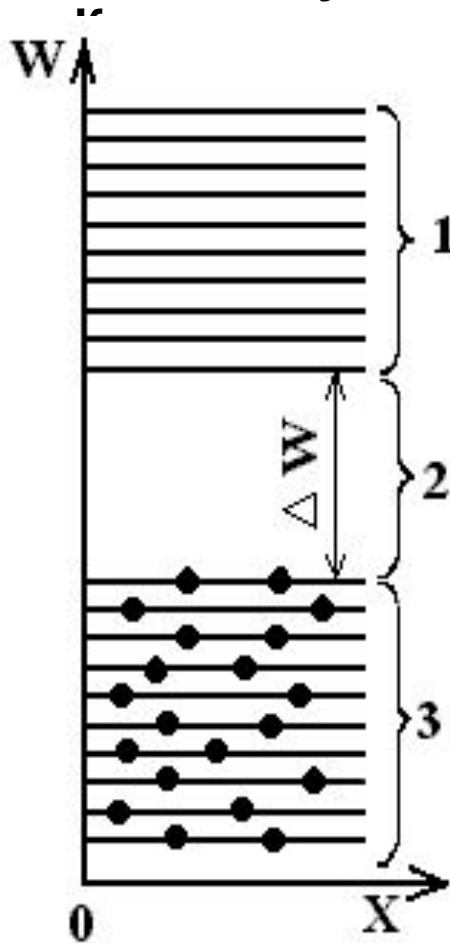
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Полупроводники с собственной электропроводностью

- **Характерной особенностью полупроводников является ярко выраженная температурная зависимость удельного электрического сопротивления. С повышением температуры оно, как правило, уменьшается на 5...6% на градус, в то время как у металлов удельное электрическое сопротивление с повышением температуры растет на десятые доли процента на градус.**
- Удельное сопротивление полупроводника также резко уменьшается при введении в него незначительного количества примеси.

Полупроводники с собственной электропроводностью

Рисунок 1.1. Энергетическая диаграмма кристалла при $T=0^\circ$



Свободная зона

Запрещенная зона

Заполненная или валентная зона

$\Delta W \leq 3$ эВ – полупроводник

$\Delta W > 3$ эВ - диэлектрик

$\Delta W = 0$ - металл.

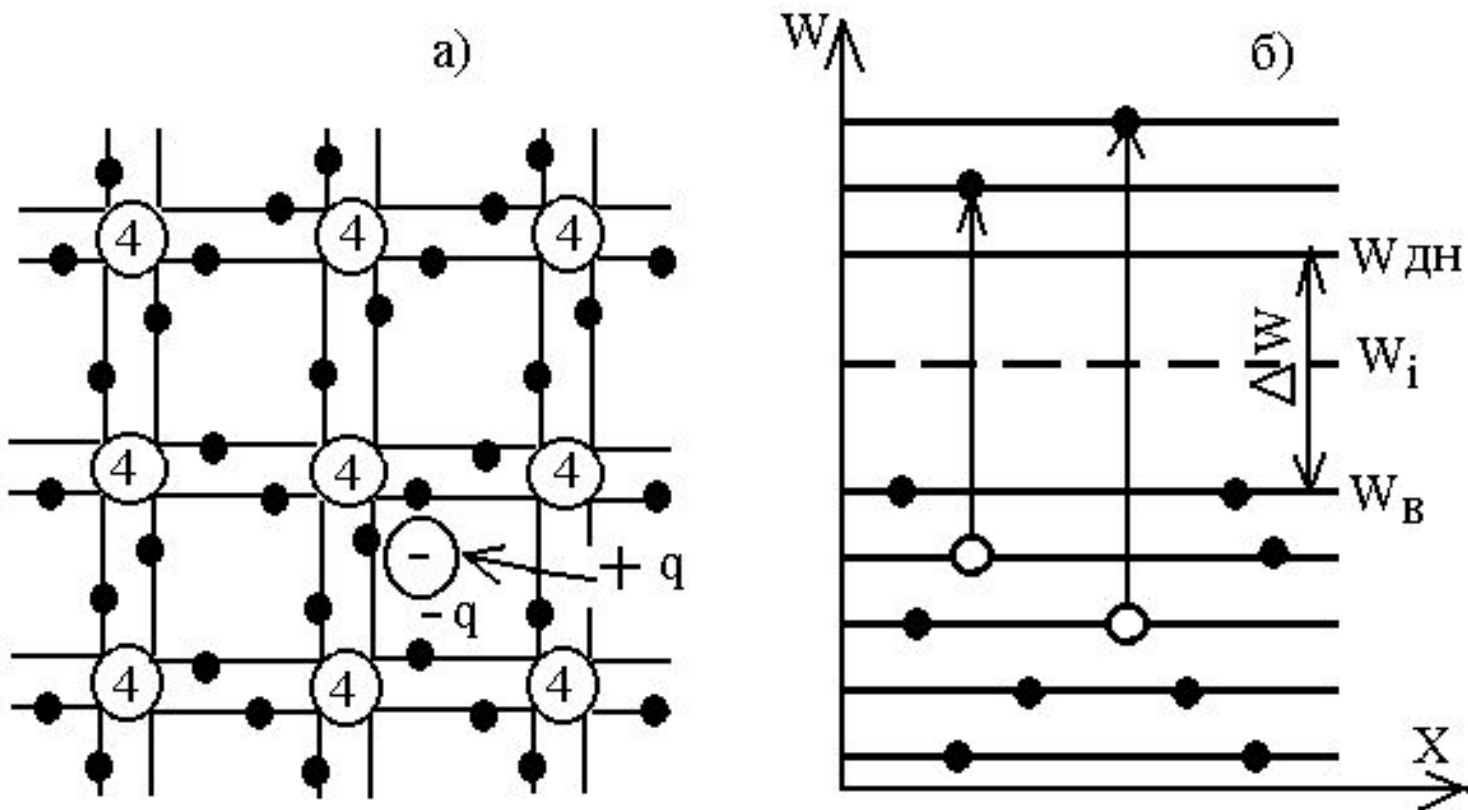
германий ($\Delta W = 0,67$
эВ)

кремний ($\Delta W = 1,12$
эВ)

Полупроводники с собственной электропроводностью

Рисунок 1.2.

- (а) - условное обозначение кристаллической решетки
(б) - энергетическая диаграмма полупроводника с собственной электропроводностью.



Полупроводники с собственной электропроводностью

Генерация свободных носителей

заряда- процесс образования пар электрон-дырка.

Рекомбинация носителей – процесс при котором электрон восстанавливает ковалентную связь.

Из-за процессов генерации и рекомбинации носителей зарядов при данной температуре устанавливается определенная концентрация электронов в зоне проводимости n_i , и равная ей концентрация дырок p_i , в валентной зоне.

Полупроводники с собственной электропроводностью

$$\begin{aligned}n_i &= A_n \exp((W_\Phi - W_{\text{дн}}) / (kT)); \\p_i &= A_p \exp((W_B - W_\Phi) / (kT));\end{aligned}\tag{1.1}$$

- W_Φ - уровень Ферми, соответствующий уровню энергии, формальная вероятность заполнения которого равна 0,5;
- $W_{\text{дн}}$ - энергия, соответствующая "дну" зоны проводимости;
- W_B - энергия, соответствующая "потолку" валентной зоны;
- A_n, A_p - коэффициенты пропорциональности;
- k - постоянная Больцмана, равная $1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/град;
- T - абсолютная температура, К.

Полупроводники с собственной электропроводностью

В химически чистых полупроводниках уровень Ферми совпадает с серединой запрещенной зоны W_i , а также $A_n = A_p = A$.

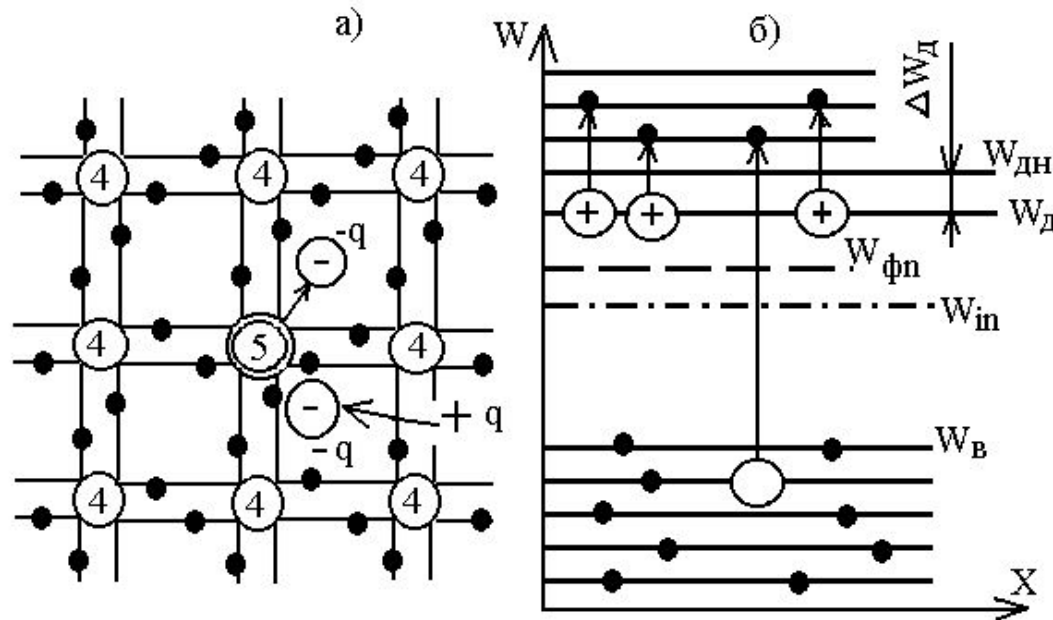
$$n_i = p_i = A \exp(-\Delta W / (2kT)) \quad (1.2)$$

Полупроводники с электронной электропроводностью

Рисунок 1.4

(а) - условное обозначение кристаллической решетки

(б) - энергетическая диаграмма полупроводника с электронной электропроводностью.



Примеси, увеличивающие число свободных электронов, называют **донорными** или просто **донорами**

Доноры в 4-валентный полупроводник :
5-валентные атомы (фосфор P, сурьма Sb)

Полупроводники с электронной электропроводностью

Полупроводники, в которых концентрация свободных электронов в зоне проводимости превышает концентрацию дырок в валентной зоне, называются полупроводниками, с **электронной** электропроводностью или **полупроводниками n-типа**.

$$n_{n_0} = A_n \exp((W_{\phi n} - W_{\partial n}) / (kT)) \quad (1.3)$$

$$p_{n_0} = A_p \exp((W_{\epsilon} - W_{\phi n}) / (kT))$$

С учетом соотношений (1.1) выражения (1.3) можно представить в следующем виде:

$$n_{n_0} = n_i \exp((W_{\phi n} - W_{in}) / (kT)) \quad (1.4)$$

$$p_{n_0} = n_i \exp((W_{in} - W_{\phi n}) / (kT)) \quad (1.5)$$

$$n_{n_0} \gg p_{n_0}$$

Полупроводники с электронной электропроводностью

$$(n_{n_0} = N_D, p_{n_0} \approx 0)$$

$$W_{\phi n} = W_{in} + kTLn(N_D / n_i) \quad (1.6)$$

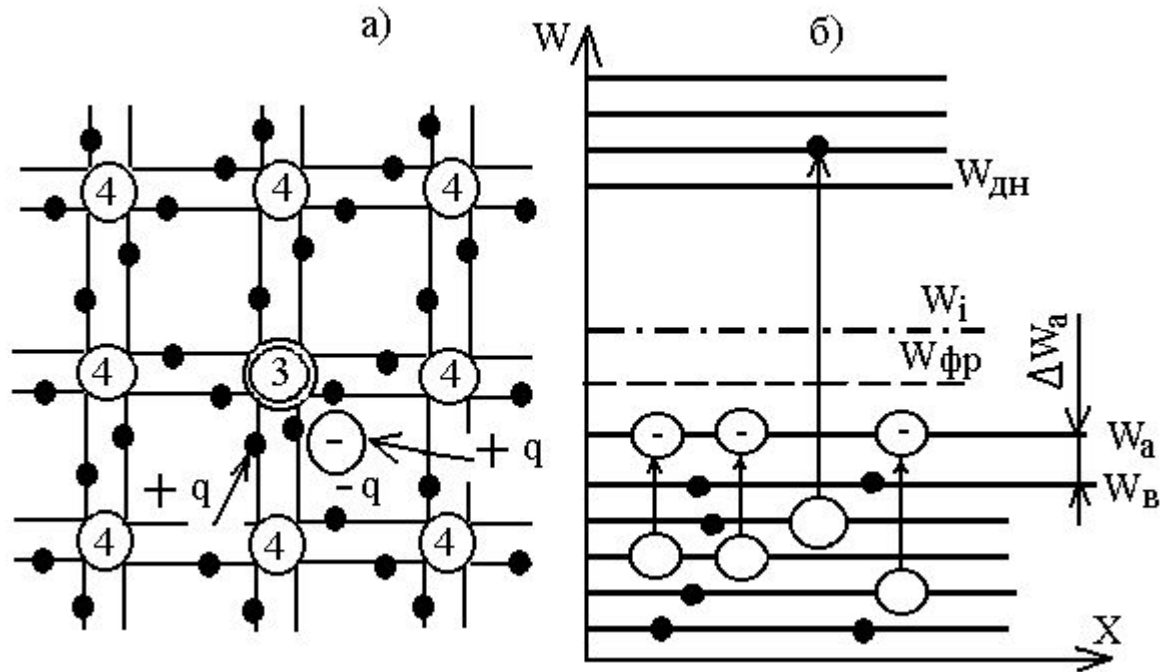
где N_D - концентрация донорных атомов в полупроводнике

Полупроводники с дырочной электропроводностью

Рисунок 1.4

(а) - условное обозначение кристаллической решетки

(б) - энергетическая диаграмма полупроводника с дырочной электропроводностью.



Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны, называют **акцепторными** или **акцепторами**.

Доноры в 4-валентный полупроводник :
3-валентные атомы (галлий Ga, индий In)

Полупроводники с дырочной электропроводностью

Полупроводники, где основными носителями являются дырки, а электроны – неосновными подвижными носителями заряда, носят название полупроводников с **дырочной** электропроводностью или полупроводников **p-типа**.

$$p_{p_0} = n_i \exp((W_{ip} - W_{fp}) / (kT)) \quad (1.7)$$

$$n_{p_0} = n_i \exp((W_{fp} - W_{ip}) / (kT)) \quad (1.8)$$

$$p_{n_0} \gg n_{n_0}$$

При условии $p_{p_0} \approx N_a$, $n_{p_0} \approx 0$

$$W_{fp} = W_{ip} - kT \ln(N_a / n_i) \quad (1.9)$$

где N_a — концентрация акцепторных атомов в полупроводнике

На основании уравнений (1.4), (1.5), (1.7), (1.8) можно записать следующее выражение:

$$n_{n_0} p_{n_0} = p_{p_0} n_{p_0} = n_i^2 \quad (1.10)$$

которое показывает, что введение в полупроводник примесей приводит к увеличению концентрации одних носителей заряда и пропорциональному уменьшению концентрации других носителей заряда за счет роста вероятности их рекомбинации.

ТОКИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Дрейфовый ток

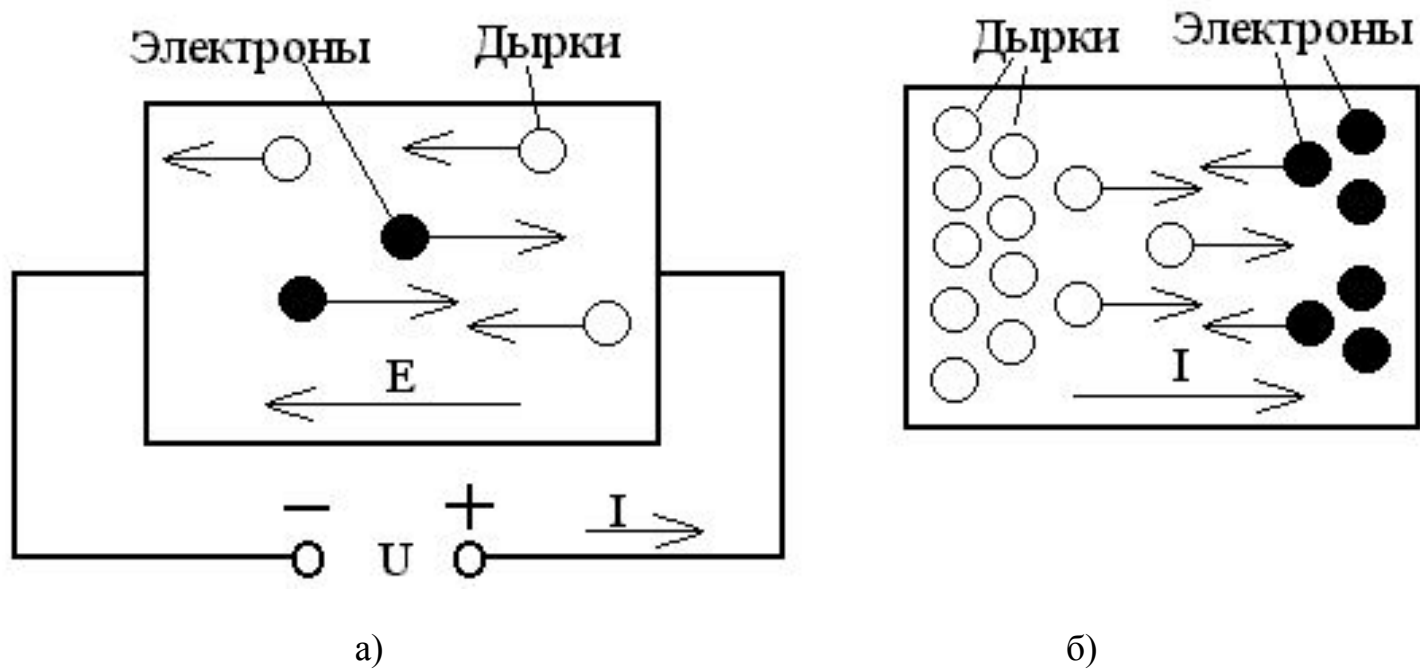


Рисунок 1.6 Дрейфовый (а) и диффузионный (б) токи в полупроводнике.

ТОКИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Дрейфовый ток

Из-за столкновения носителей зарядов с атомами кристаллической решетки их движение в направлении действия электрического поля прерывисто и характеризуется **подвижностью** μ . Подвижность равна средней скорости, приобретаемой носителями заряда в направлении действия электрического поля напряженностью $E = 1$ В/м, т. е.

$$\mu = \bar{v} / E \quad (1.11)$$

$$(\mu_n > \mu_p)$$

Плотность тока в полупроводнике, обусловленного дрейфом свободных электронов под действием внешнего электрического поля со средней скоростью \overline{v}_n , определяется выражением

$$j_n = qn\overline{v}_n$$

Перемещение (дрейф) дырок в валентной зоне со средней скоростью \overline{v}_p создает в полупроводнике дырочный ток, плотность которого

$$j_p = qp\overline{v}_p$$

$$j = q(n\mu_n + p\mu_p)E \quad (1.12)$$

Электропроводность полупроводника:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

У полупроводника с собственной электропроводностью ($n_i = p_i$)

$$\sigma = qn_i(\mu_n + \mu_p) = qp_i(n\mu_n + p\mu_p)$$

В полупроводнике n-типа $n_{n_0} \gg p_{p_0}$

$$\sigma \approx \sigma_n = q\mu_n n_{n_0}$$

В полупроводнике p-типа $p_{p_0} \gg n_{n_0}$

$$\sigma \approx \sigma_p = q\mu_p p_{p_0}$$

ТОКИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Диффузионный ток

Скорость рекомбинации неравновесных носителей

$$dp / dt = -(p_n - p_{n_0}) / \tau_p$$

$$dn / dt = -(n_p - n_{p_0}) / \tau_n$$

где τ_p - время жизни дырок; τ_n - время жизни электронов.

За время жизни концентрация неравновесных носителей уменьшается в 2,7 раза. Время жизни избыточных носителей составляет 0,01...0,001 с.

Неравномерное распределение неравновесных носителей зарядов сопровождается их диффузией в сторону меньшей концентрации. Это движение носителей зарядов обуславливает прохождение электрического тока, называемого **диффузионным**.