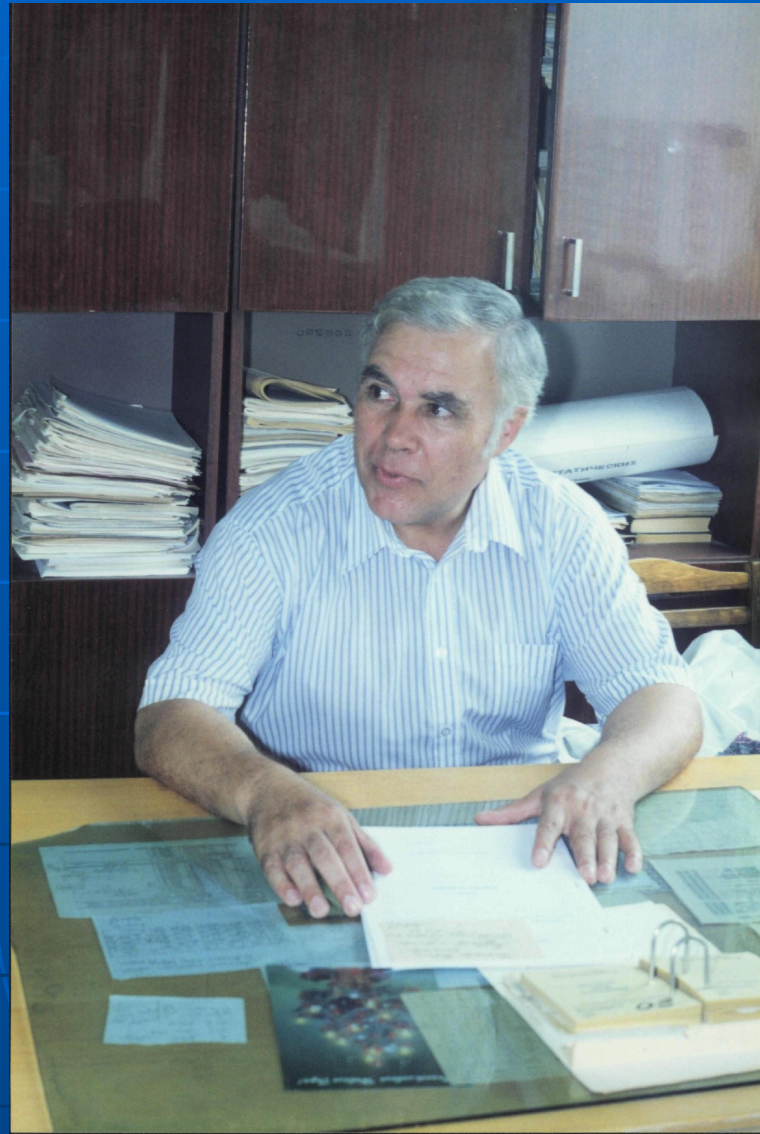


# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

## Конспект лекций



Автор – доцент Рудь Виктор Васильевич



# 1. Элементы зонной теории твёрдого тела

- ▶ **Объектами исследования являются:**
- ▶ — элементарные частицы,
- ▶ — ядра атомов,
- ▶ — химические элементы,
- ▶ — молекулы,
- ▶ — газы,
- ▶ — плазма,
- ▶ — жидкие среды,
- ▶ — твёрдые тела.

## 1.1. Модель атома и свойства электрона

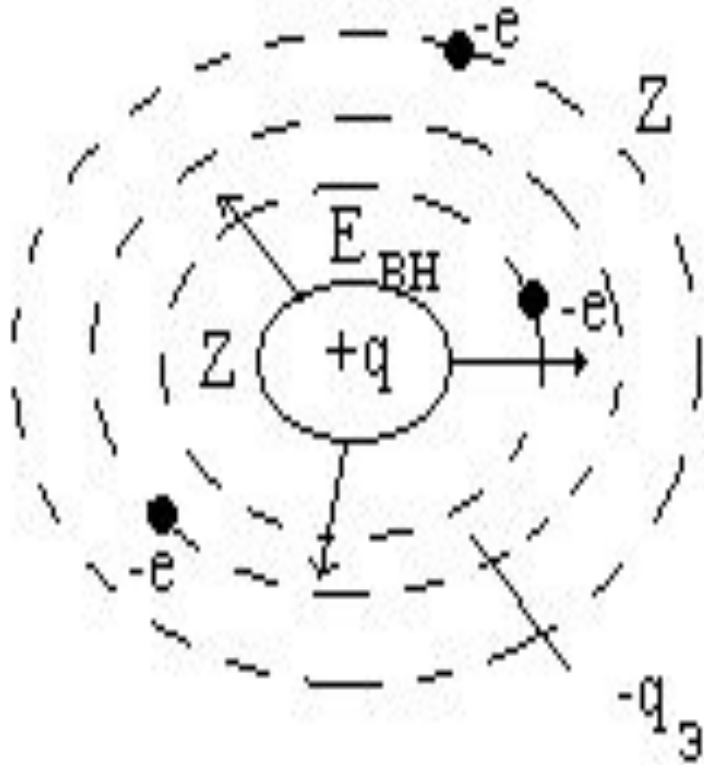


Рис. 1.1

$$W = h\nu \quad (1.1)$$

$$m = m_0 \left( 1 - \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

$$p = m_0 v \left( 1 - \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

# История развития представлений об атомах



# СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Таблица 1.1

Порядковый номер частицы $i$		( $i=1$ )	( $i=2$ )	( $i=3$ )	( $i=4$ )	( $i=5$ )
Свойства частиц		Фотон	Электрон	Позитрон	Протон	Нейтрон
1	Электрический заряд $e_i$ (в единицах $e_i/e$ )	0	$-1$	$+1$	$+1$	0
2	Масса покоя $m_{oi}$ (в единицах $m_{oi}/m_{oe}$ )	0	1	1	1836,15152	1838,65
3	Собственный момент количества движения проекция спина - $p_s = s$	1	1/2	1/2	1/2	1/2
4	Собственный магнитный момент - $\mu_s$	0	-1,0011596567	1,0011596567	2,7928456	-1,913148

# Универсальные физические постоянные микромира

- |  |   |
|--|---|
| <p>1. Элементарный заряд<br/>(заряд электрона)<br/><math>e = -1,6021892 \cdot 10^{-19}</math> Кл.</p> <p>2. Масса покоя электрона<br/><math>m_{0e} = 9,109534 \cdot 10^{-31}</math> кг.</p> <p>3. Число Авогадро<br/><math>N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}</math> моль<sup>-1</sup>.</p> <p>4. Скорость света в вакууме<br/><math>c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8</math> м/с.</p> | <p>5. Постоянная Планка<br/><math>h = 6,626176 \cdot 10^{-34}</math> Дж·с.<br/>или в виде<br/><math>\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0545887 \cdot 10^{-34}</math> Дж·с.</p> <p>6. Магнетон Бора<br/><math>\mu_B = e \hbar / (2 m_{0e}) = 2,974078 \cdot 10^{-24}</math> Дж·Тл<sup>-1</sup>.</p> <p>7. Ядерный магнетон<br/><math>\mu_N = e \hbar / (2 m_p) =</math><br/><math>= 5,050824 \cdot 10^{-27}</math> Дж·Тл<sup>-1</sup>.</p> |
|--|---|

## 8. Электрическая и магнитная постоянные

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,25663706 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}.$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x \cdot \Delta p_x &\geq h, \\ \Delta y \cdot \Delta p_y &\geq h, \\ \Delta z \cdot \Delta p_z &\geq h; \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

$$r_A = (0,5...2) \cdot 10^{-10} \text{ \AA} ,$$

$$r_\beta = r_0 A^{1/3} = (1,3...1,7) \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} \text{ \AA} ,$$

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{m_e v}, \quad (1.7)$$

$$\delta = \frac{m_\beta}{V} \approx 10^{14} \text{ m/\AA}^3 ,$$

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 r^2}, \quad (1.8)$$

$$r_e = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi \cdot m_e} \approx 2,817 \cdot 10^{-15} \text{ \AA} .$$

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m_e}; \quad (1.9)$$

$$r_1 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m_e} \approx 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ \AA} ,$$

$$W_n = -\frac{m_e e^4}{8n^2 h^2 \epsilon_0^2}. \quad (1.10)$$

$$W_1 = \frac{m_e e^4}{h^2 \epsilon_0^2} \approx 13,53 \text{ eV} .$$



# РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА ДЛЯ ВОДОРОДОПОДОБНЫХ АТОМНЫХ СИСТЕМ

$$W_n = -\frac{m_0 e^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{Z^2}{n^2}, \quad (1.11.a)$$

$$n = 1, 2, \dots, \infty. \quad (1.11.b)$$

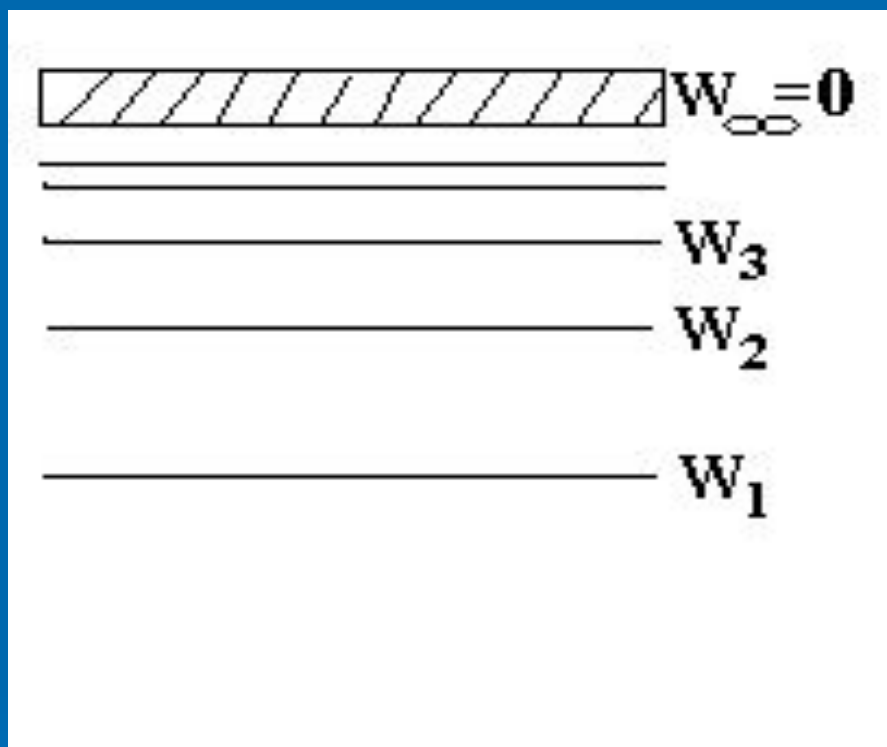
$$\Psi = \Psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi), \quad (1.12.a)$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l. \quad (1.12.b)$$

# КВАНТОВЫЕ ЧИСЛА

1. Главное квантовое число  $n = 1, 2, \dots, \infty$ ,
2. Побочное (орбитальное или азимутальное) квантовое число  $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ .
3. Магнитное квантовое число  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ .
4. Спиновое квантовое число  $s = \pm 1/2$ .

## Рис.1.2. Спектры энергий и частот водородоподобного атома



*a*

$$\nu_{m,n} = \frac{W_m - W_n}{h} = RZ^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

*б*

# Таблица 1.2. Основные сведения об оболочках

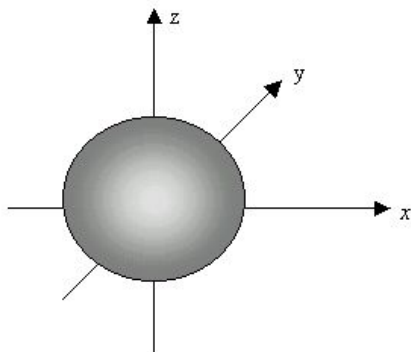
Квантовое число $n$	1	2	3	4	5	6	7
Обозначение оболочки	K	L	M	N	O	P	Q
Число подоболочек ( $n$ )	1	2	3	4	5	6	7
Число орбиталей ( $n^2$ )	1	4	9	16	25	36	49
Число эл. состояний ( $2n^2$ )	2	8	18	32	50	72	98

Таблица 1.3. Основные сведения о подболочках

Квантовое число $l$	0	1	2	3	4	5
Обозначение подболочки	s	p	d	f	g	h
Число орбиталей $(2l+1)$	1	3	5	7	9	11
Число эл. состояний $2(2l+1)$	2	6	10	14	18	22

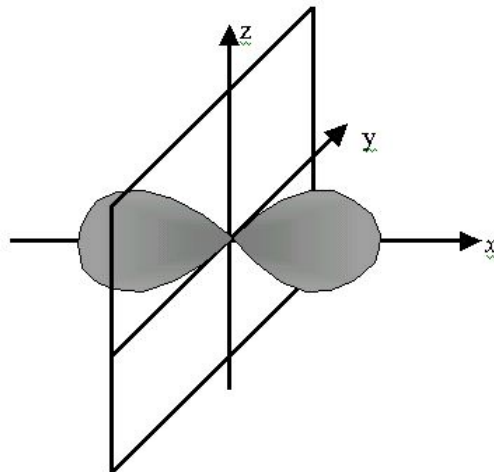
Рис. 1.3. ПОДОБОЛОЧКИ И ОРБИТАЛИ ОБОЛОЧКИ n=2

2s-АО

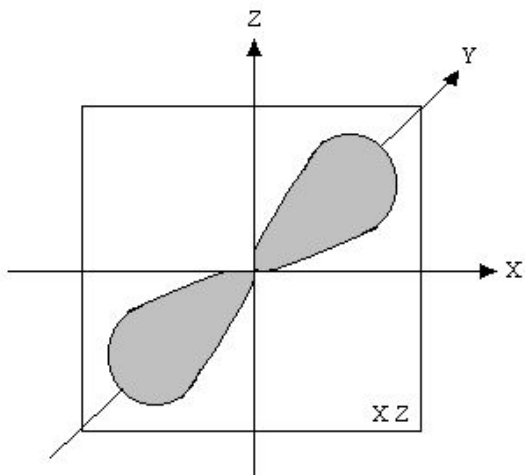


АТОМНАЯ ОРБИТАЛЬ  
ПОДОБОЛОЧКИ 2S

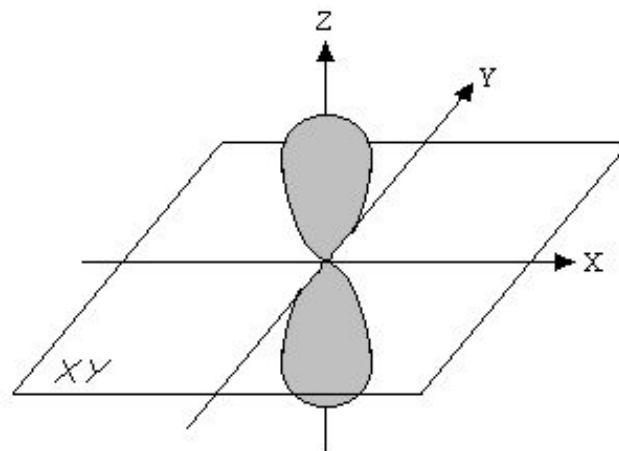
2p<sub>x</sub>-АО



АТОМНЫЕ ОРБИТАЛИ ПОДОБОЛОЧКИ 2P



2p<sub>y</sub>-АО



2p<sub>z</sub>-АО

## 1.2. Понятие об энергетических уровнях и зонах

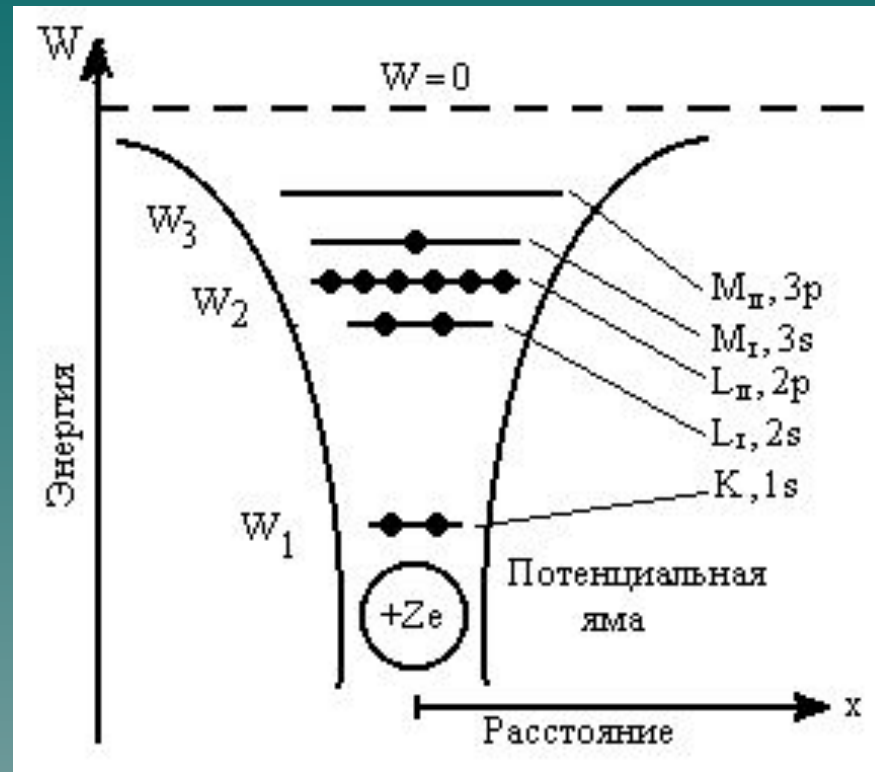
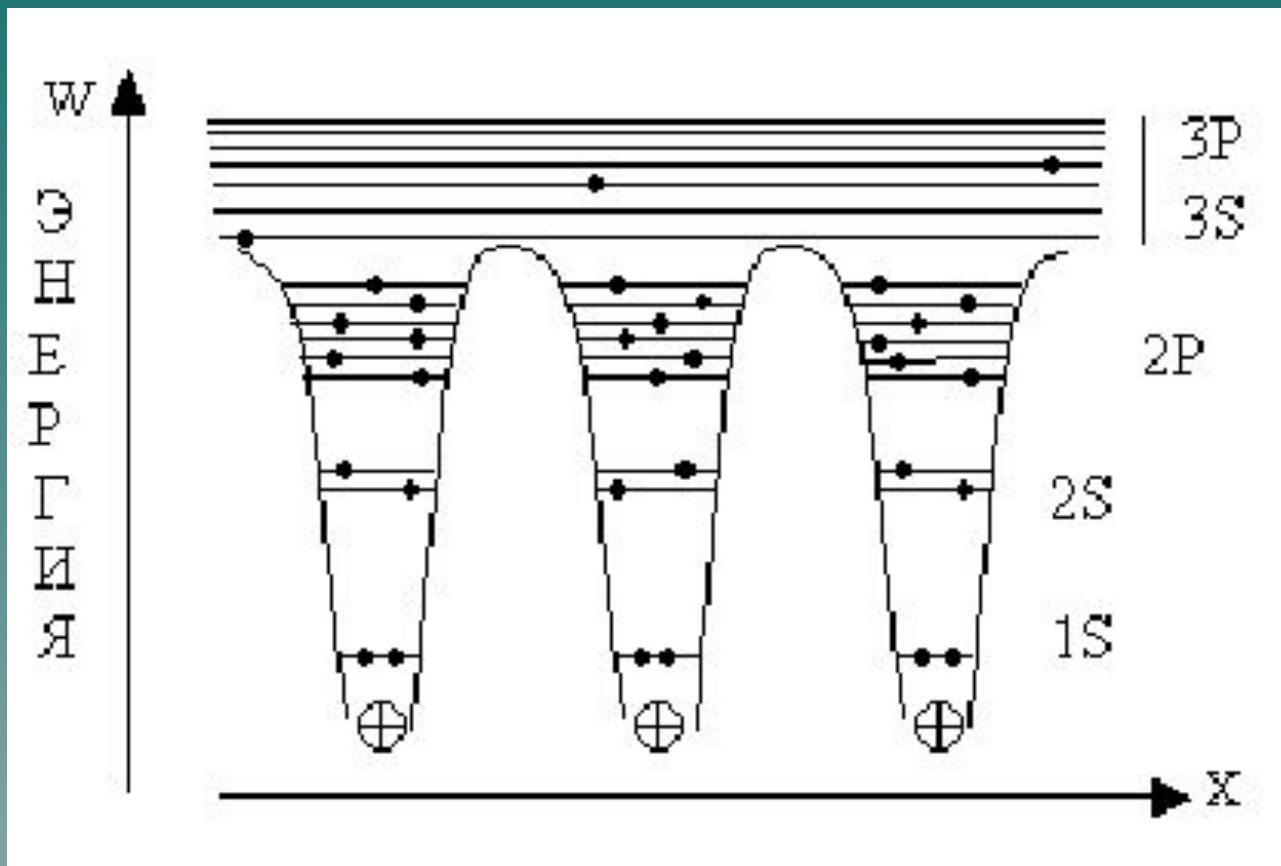


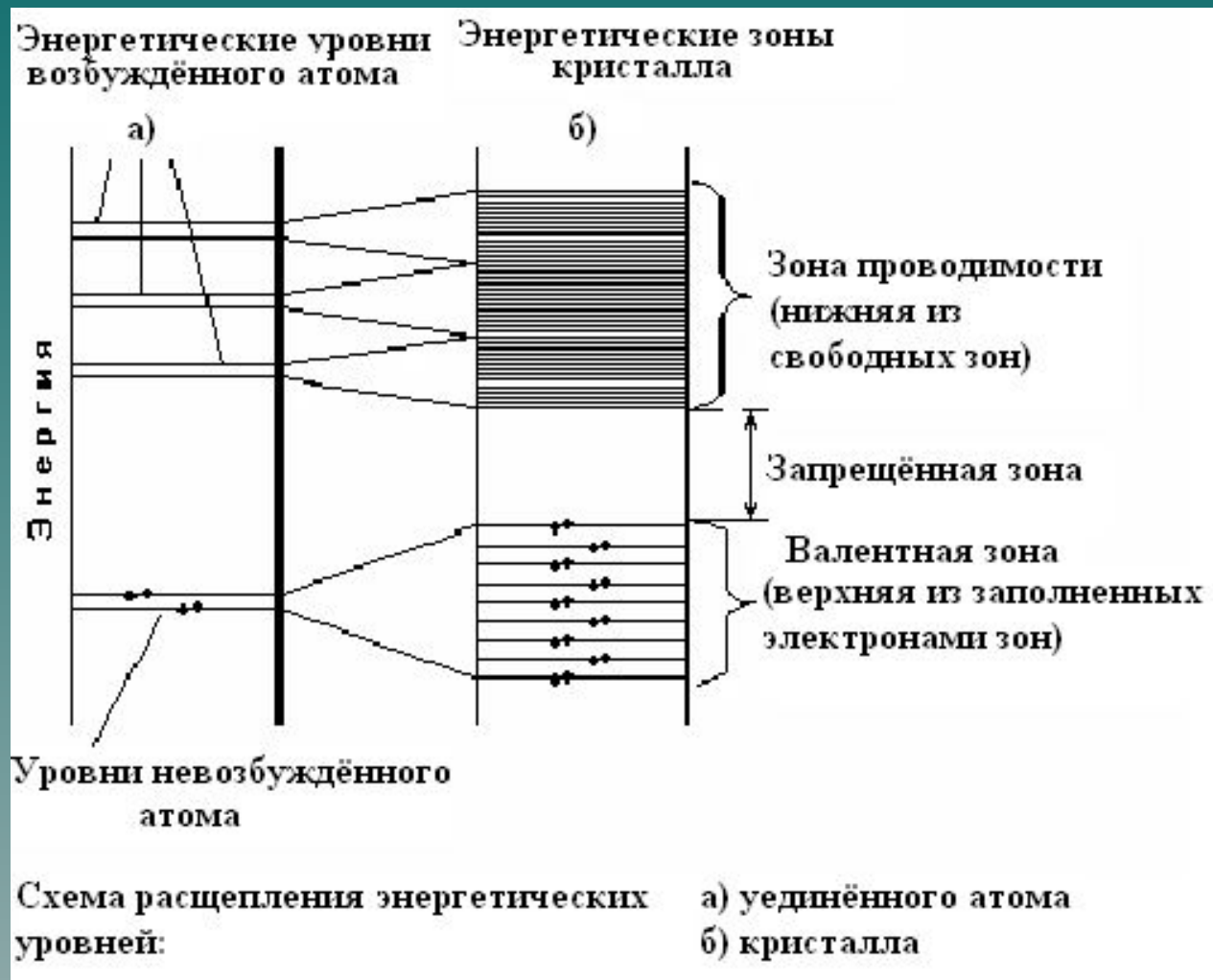
Рис.1.4. Энергетическая диаграмма уединённого атома

Рис.1.5. Энергетическая диаграмма кристалла

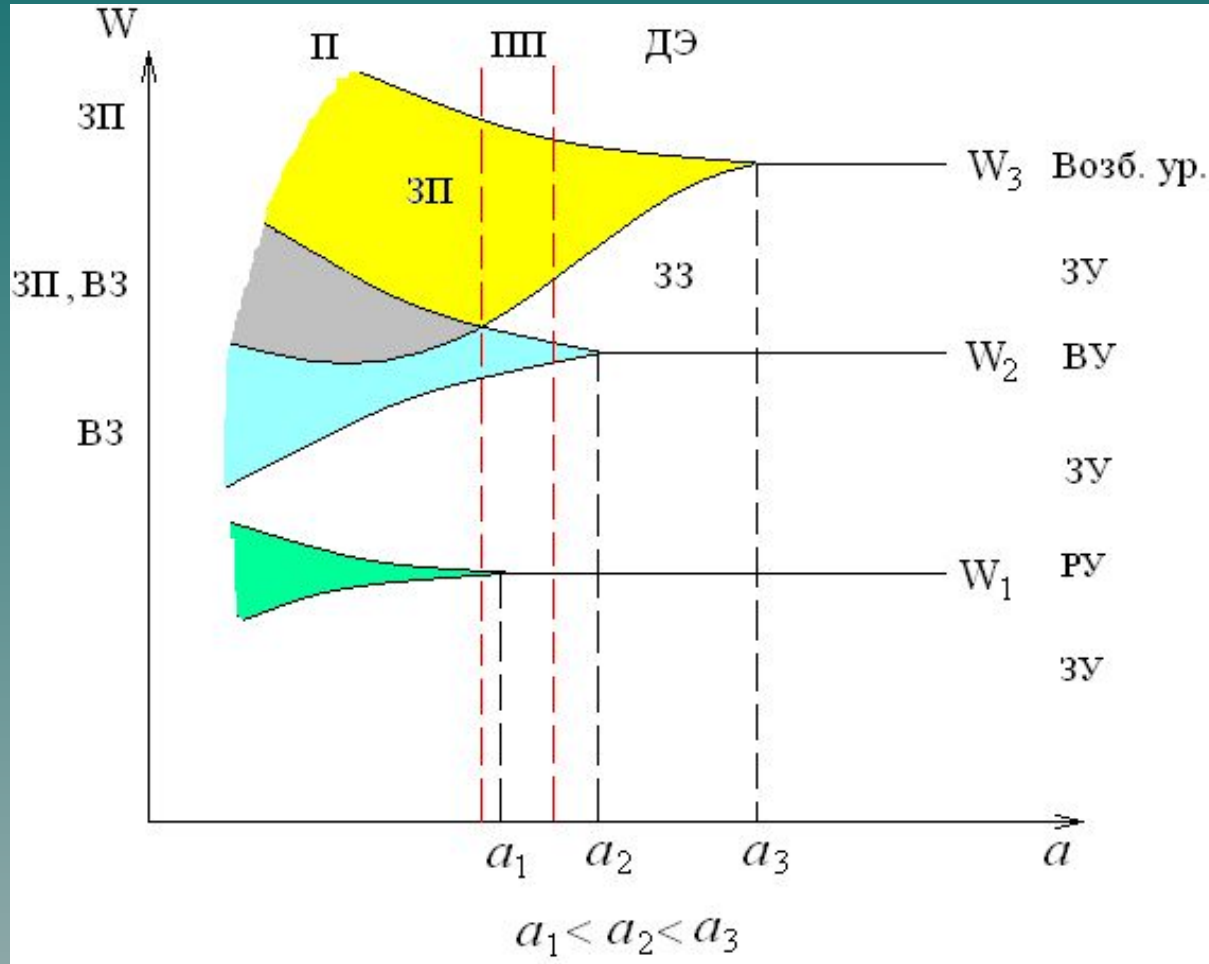




# Рис.1.6. Схема расщепления энергетических уровней



# Пояснение процесса образования энергетических зон в кристалле



# Энергетические диаграммы материалов электроники

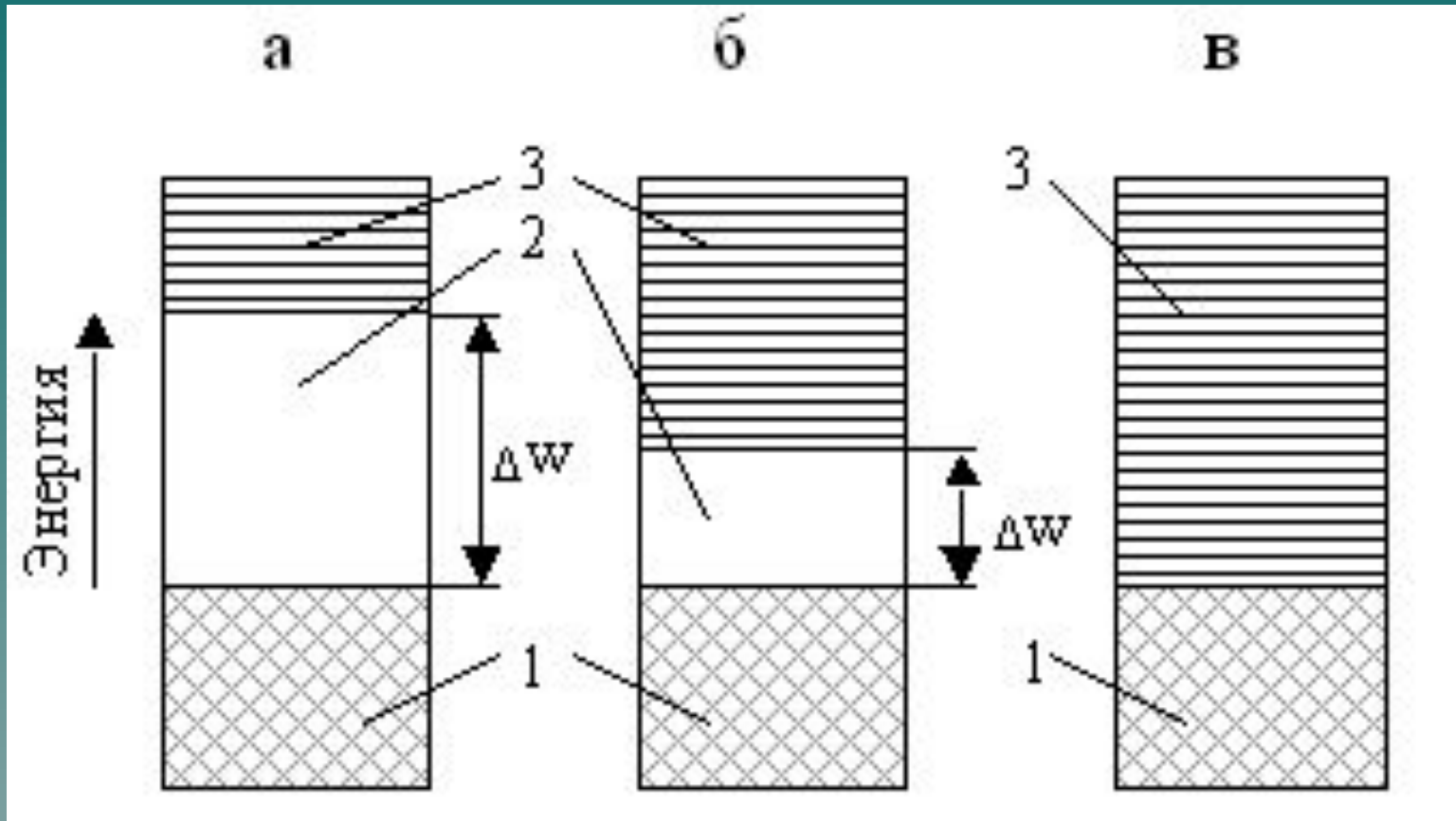
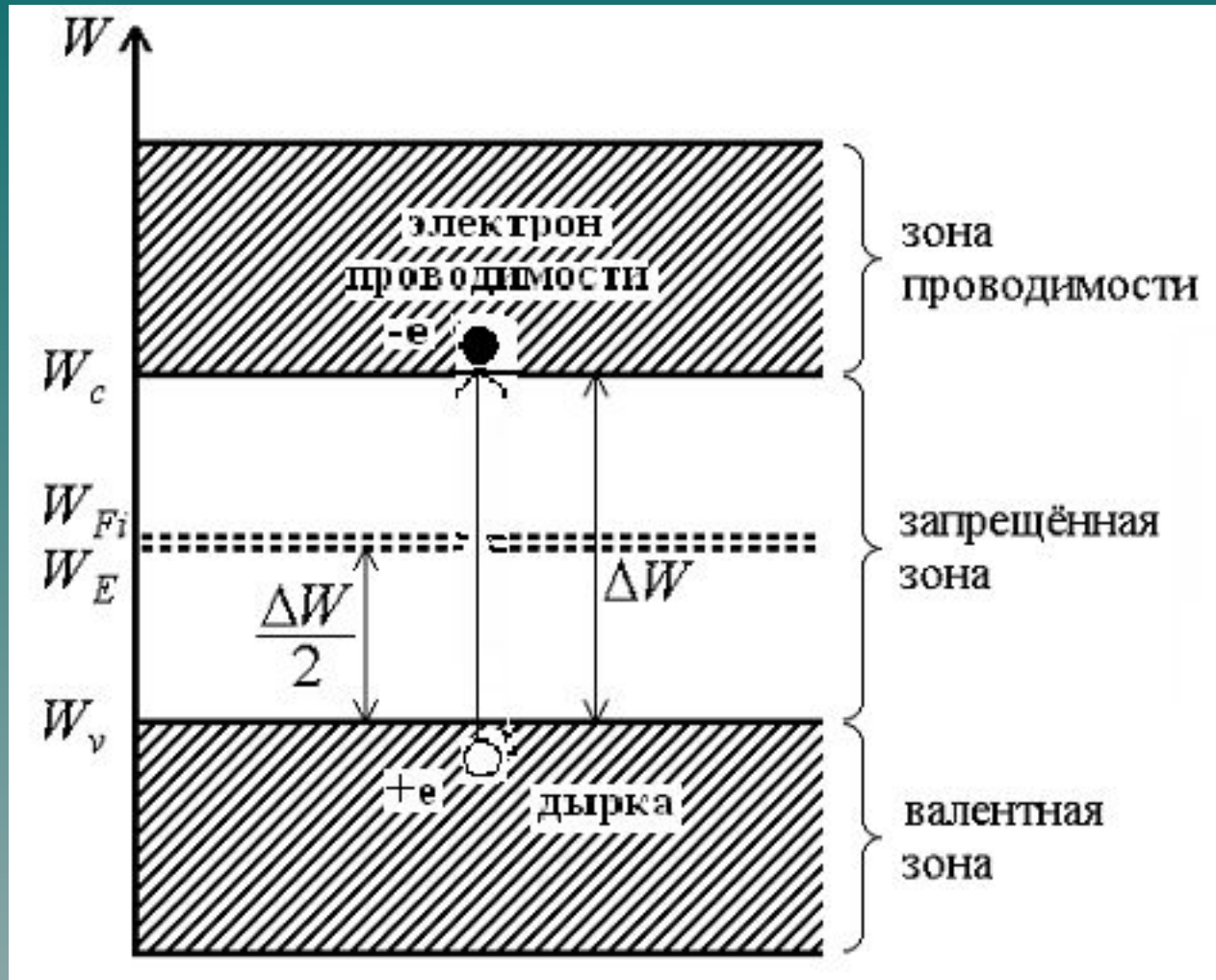


Рис.1.7

Рис.1.8. Энергетическая диаграмма полупроводника типа *i*



# Классификация полупроводниковых материалов по составу и свойствам

По составу:

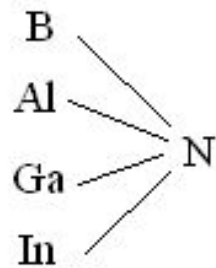
- ▶ простые (элементарные)  $Ge, Si, Se, \dots$ ;
- ▶ на основе бинарных соединений  $A^mB^n$ ;
- ▶ трёхкомпонентные твёрдые растворы  $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ ;
- ▶ четырёхкомпонентные твёрдые растворы  $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ .

По свойствам:

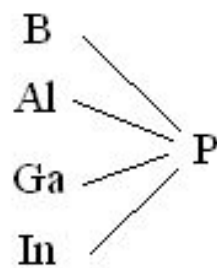
- ▶ собственные полупроводники ( $i$ -типа),
- ▶ электронные полупроводники ( $n$ -типа),
- ▶ дырочные полупроводники ( $p$ -типа).

## Продолжение

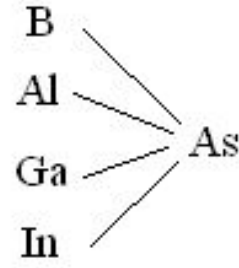
Полупроводники на основе бинарных соединений  $A^{III}B^V$



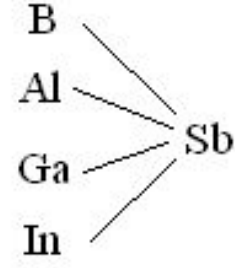
Нитриды



Фосфи́ды

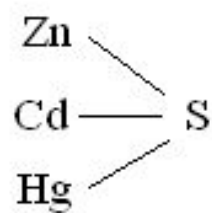


Арсениды

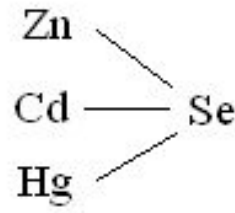


Антимо́ниды

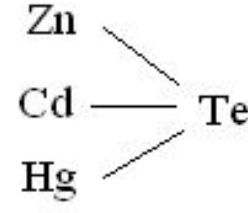
Полупроводники на основе бинарных соединений  $A^{II}B^{VI}$



Сульфиды



Селениды



Теллуриды

## 1.3. Кристаллическая решётка

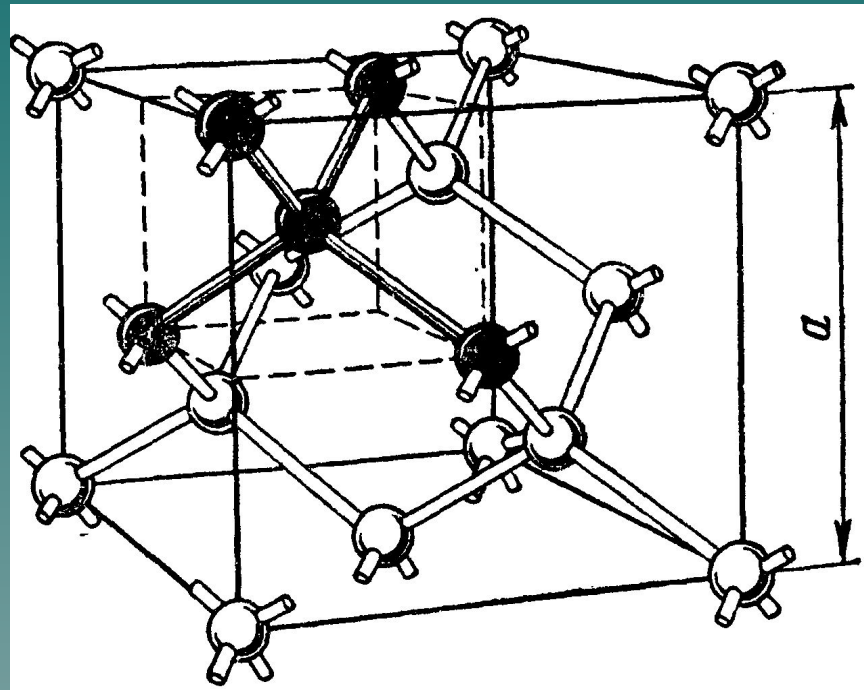
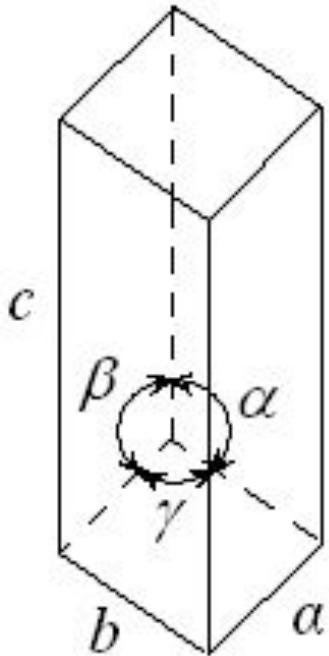


Рис. 1.9.

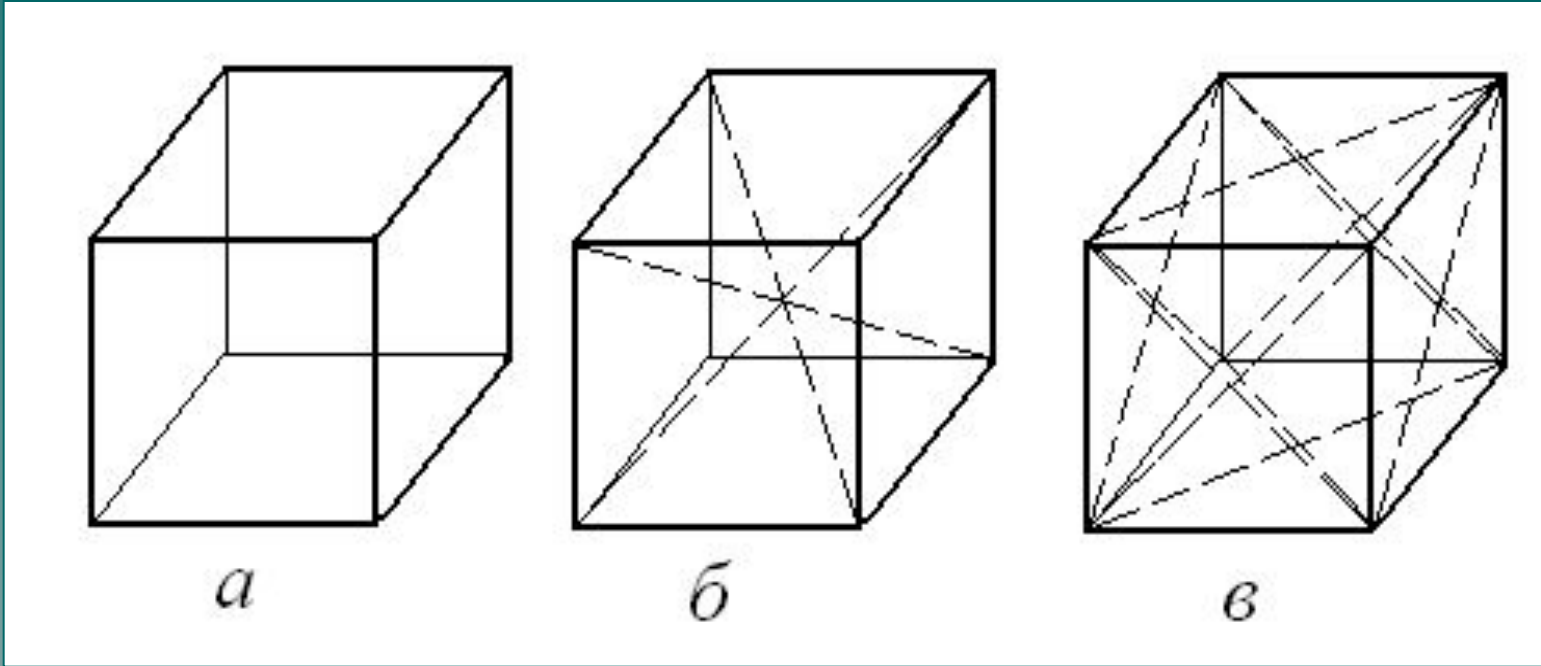
## Рис. 1.10. Типы элементарных ячеек



Триклинная	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$ .
Моноклинная	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$ .
Ромбическая	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .
Тетрагональная	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .
Гексагональная	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ .
Кубическая	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .



# Рис. 1.11. Примеры ячеек кристаллических решёток



# Рис. 1.12. Индексы Миллера

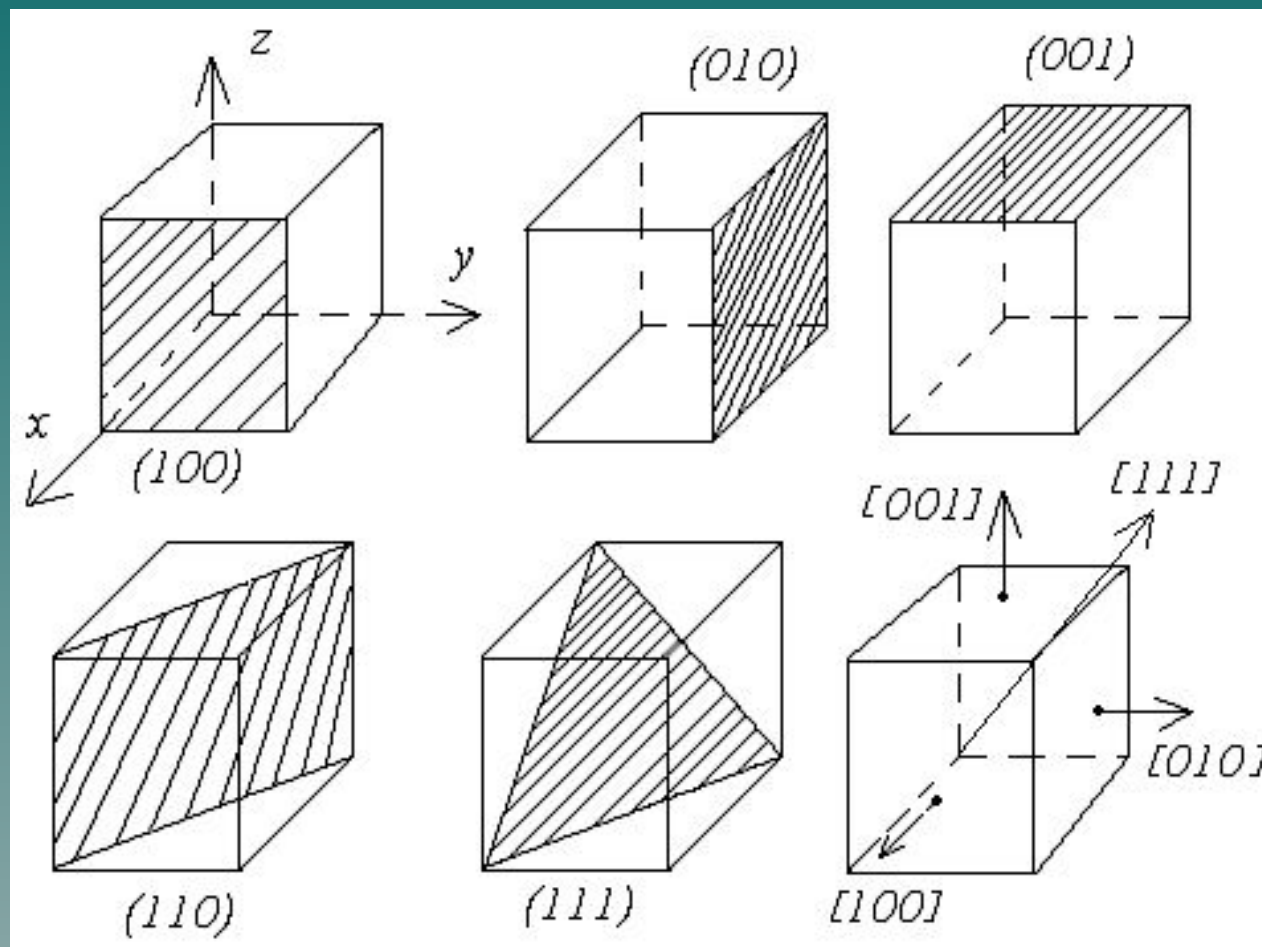
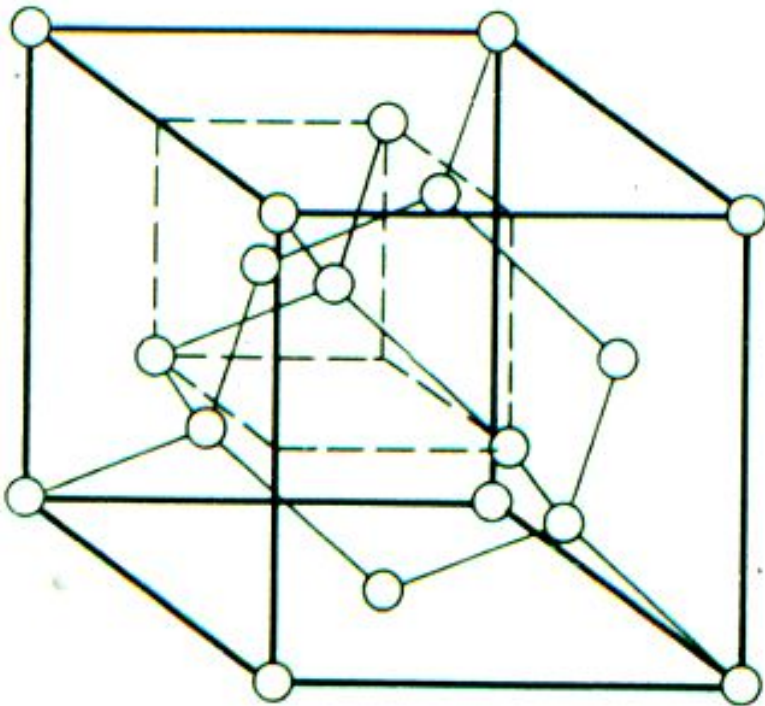
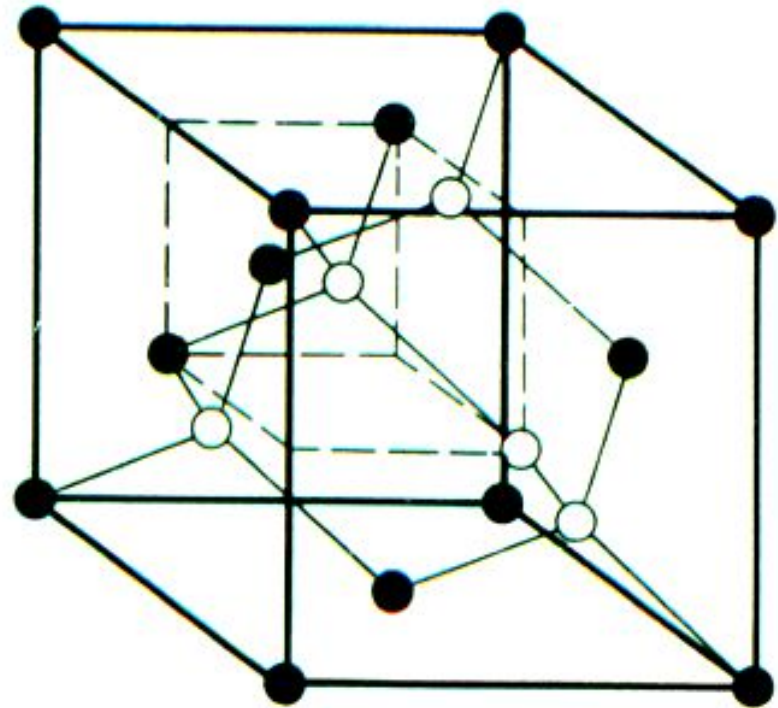


Рис.1.13. Кристаллические решётки полупроводников

Структура алмаза  
(германия, кремния)

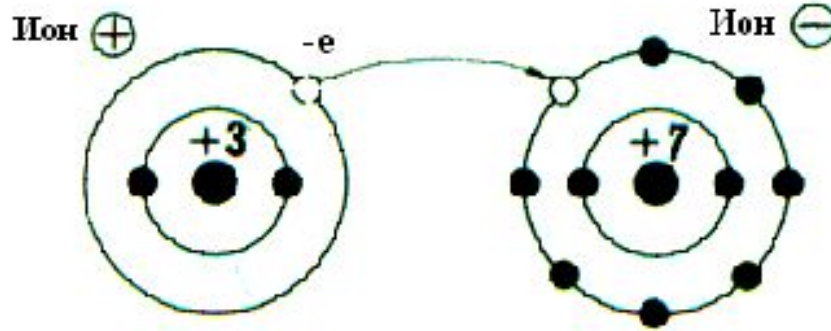


Структура цинковой обманки  
(Соединения типа  $A^{III}B^V$ )

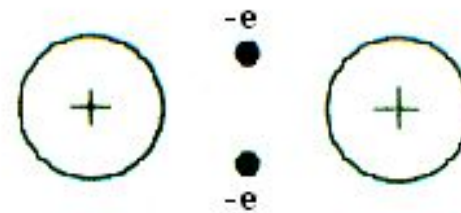


# Рис.1.14. Типы химических связей в кристаллах

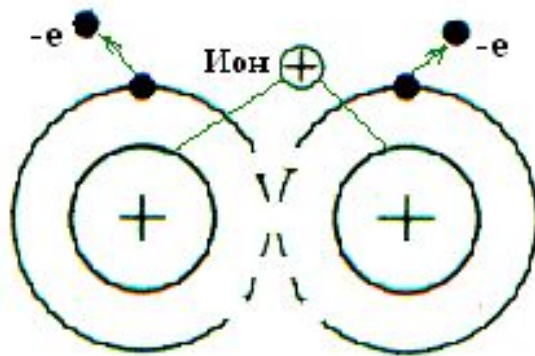
Ионная - в узлах (+) и (-) ионы.



Ковалентная (атомная) - в узлах (+) ионы, связь за счёт валентных электронов.



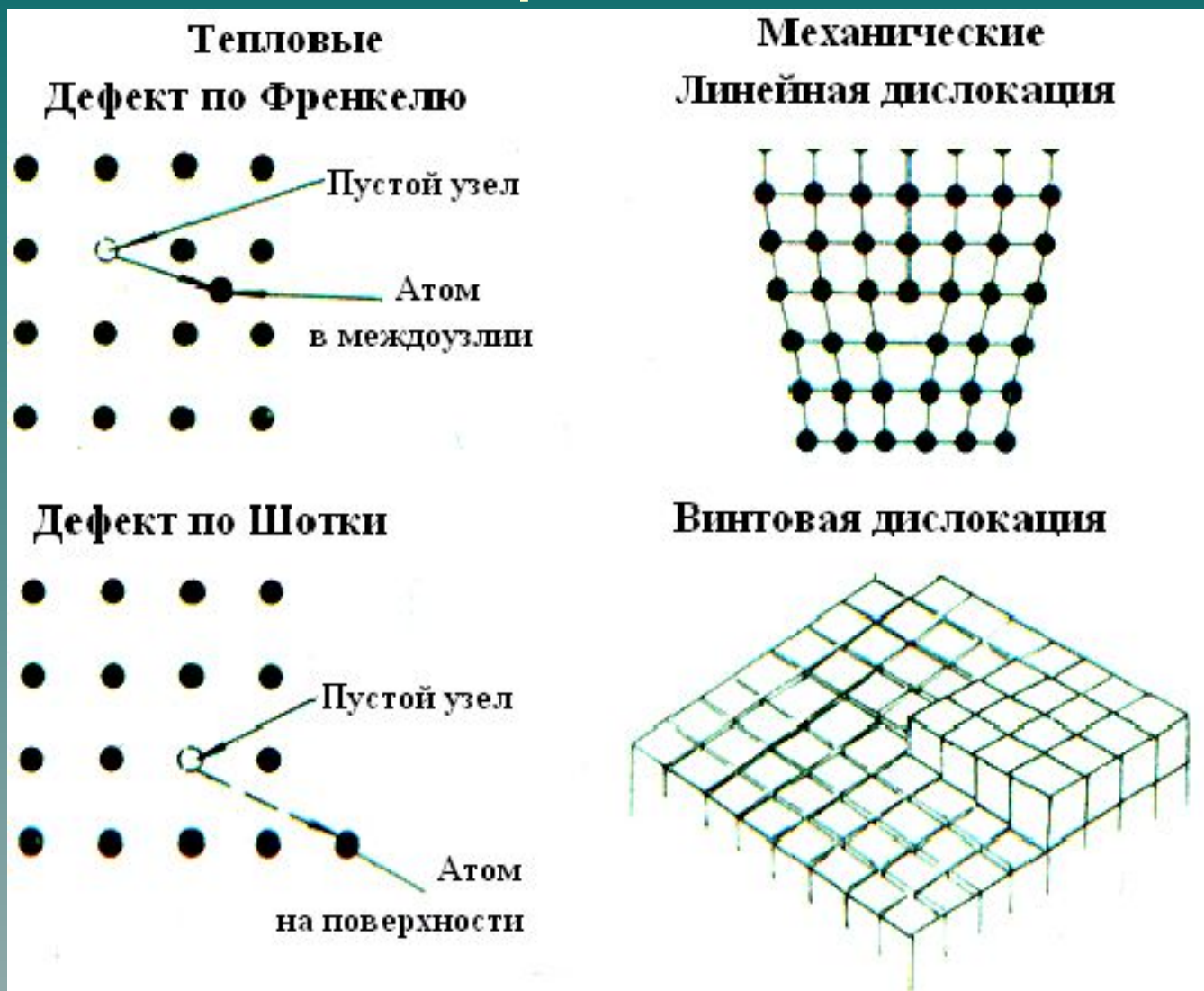
Металлическая - в узлах (+) ионы, окружённые коллективизированными свободными электронами.



Молекулярная - молекулы образуют диполи, полюсы и заряд которых меняются во времени.



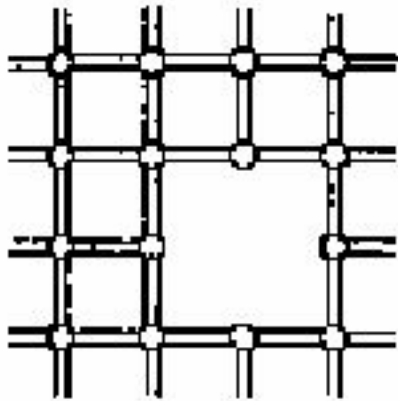
# Рис.1.15. Дефекты кристаллической решётки



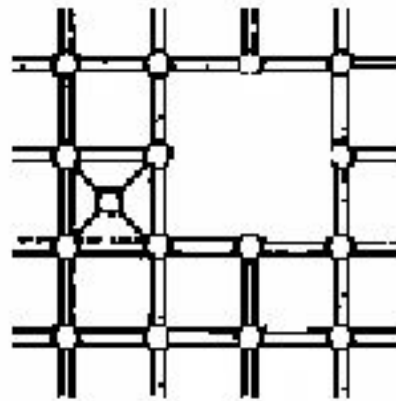


# Рис.1.16. Дефекты кристаллической решётки

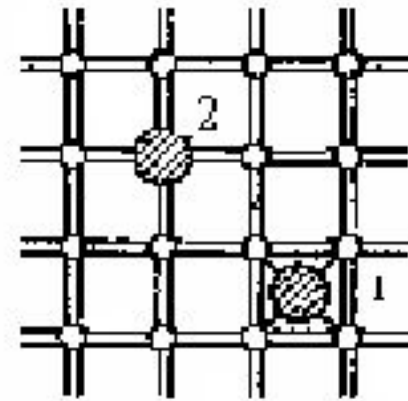
## Точечные дефекты



а)



б)

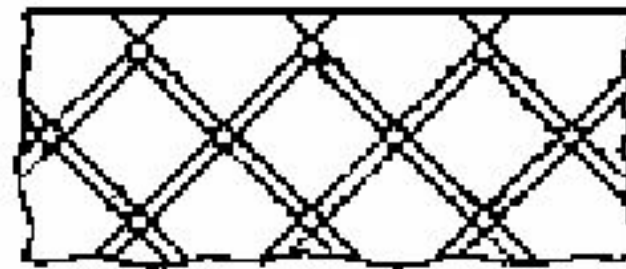


в)

## Дефекты на поверхности



г)



д)

## 1.4. Основные выводы по разделу 1.

- Основные полупроводниковые материалы, используемые в электронике, – кремний, германий и арсенид галлия, – имеют кристаллическую решётку типа алмаза. Для неё характерна ковалентная химическая связь.
- В полупроводнике присутствуют свободные носители заряда двух типов, – электроны проводимости и дырки.

## 2. Свойства полупроводников

### 2.1. Собственный полупроводник

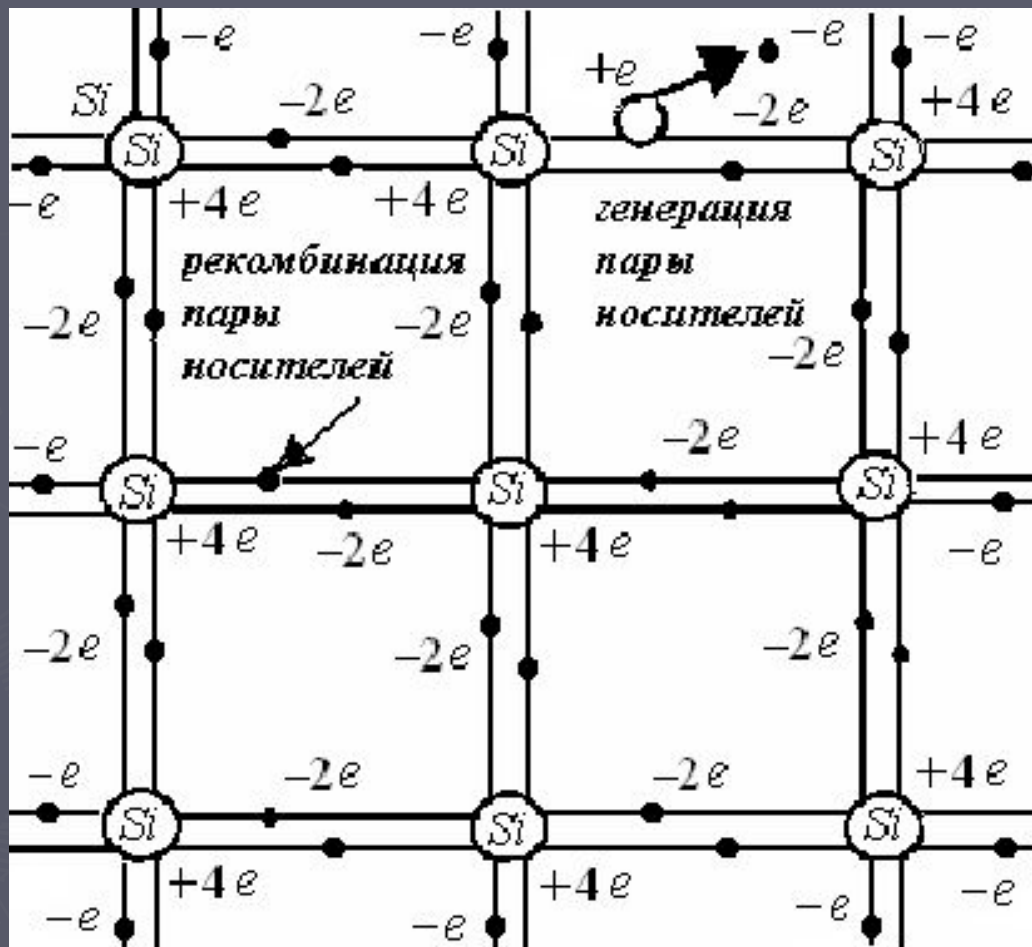


Рис.2.1



## 2.2. Определение равновесной концентрации зарядов в собственном полупроводнике

$$n_i = p_i ; \quad (2.1)$$

$$\rho_n(W) = \frac{4\pi(2m_{\bar{n}})^{3/2}}{h^3} \sqrt{W - W_c} ; \quad (2.2)$$

$$f_n(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)} . \quad (2.3)$$

$$n = \int_{W_c}^{\infty} \rho_n(W) f_n(W) dW, \quad (2.4)$$

$$p = \int_{-\infty}^{W_v} \rho_p(W) f_p(W) dW . \quad (2.5)$$

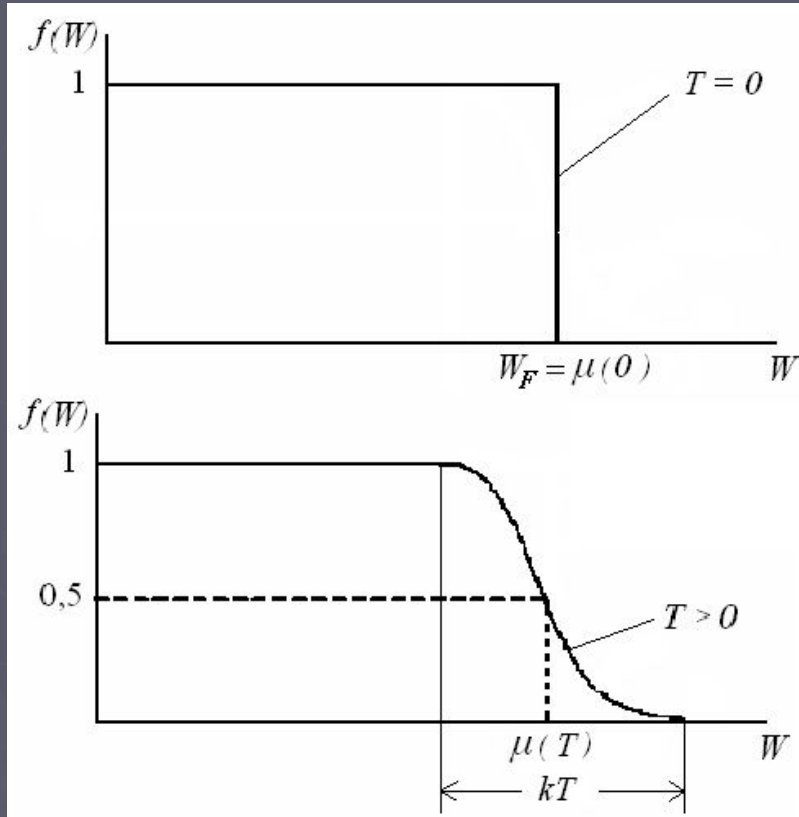
## 2.2. Продолжение

$$n_i = p_i = N \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (2.6)$$

$$N = \frac{2}{h^3} (2\pi kT)^{3/2} (m_n m_p)^{3/4}, \quad (2.7)$$

$$n \cdot p = n_i^2. \quad (2.8)$$

## 2.3. Функция распределения Ферми-Дирака



$$f(W) = \begin{cases} 1 & \text{при } W < \mu(0), \\ 0 & \text{при } W > \mu(0). \end{cases}$$

$$\mu(T) = W_F \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{W_F} \right)^2 \right]$$

Рис.2.2

## 2.4. Вероятность распределения электронов по энергетическим уровням в полупроводнике

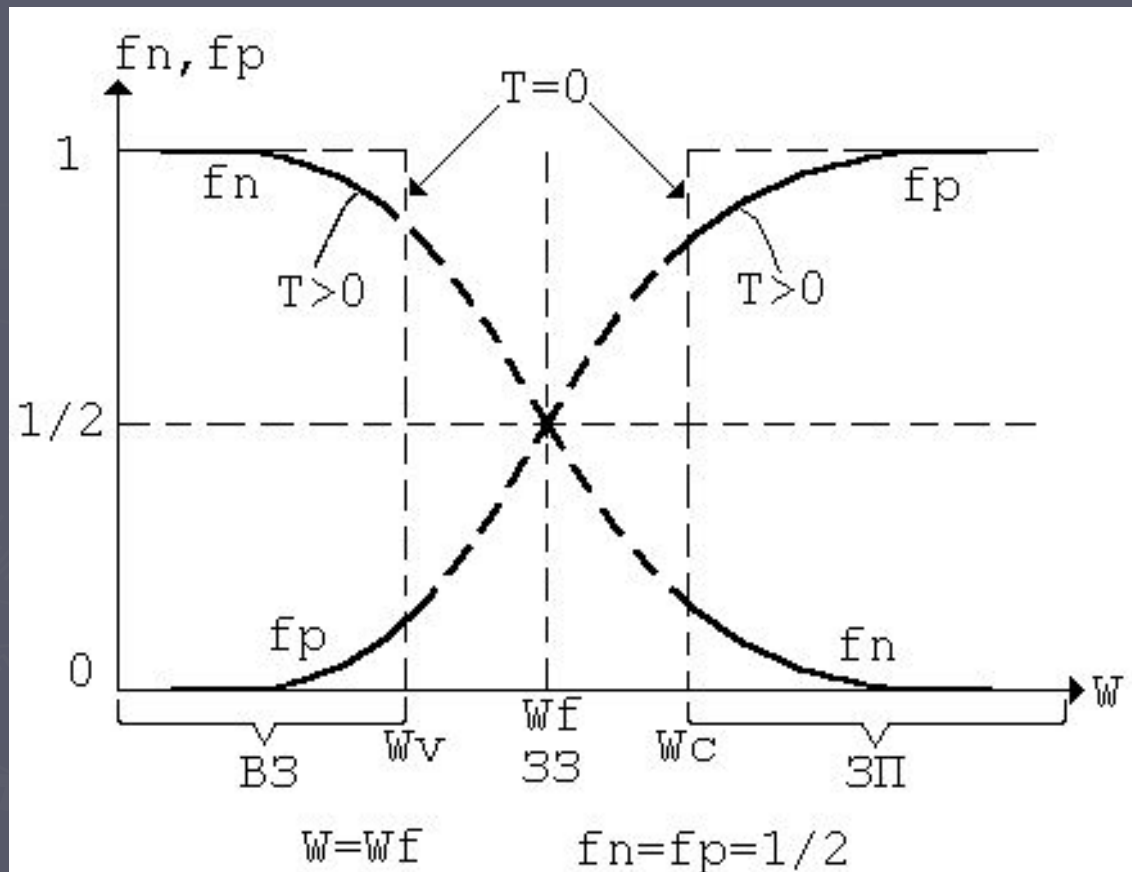


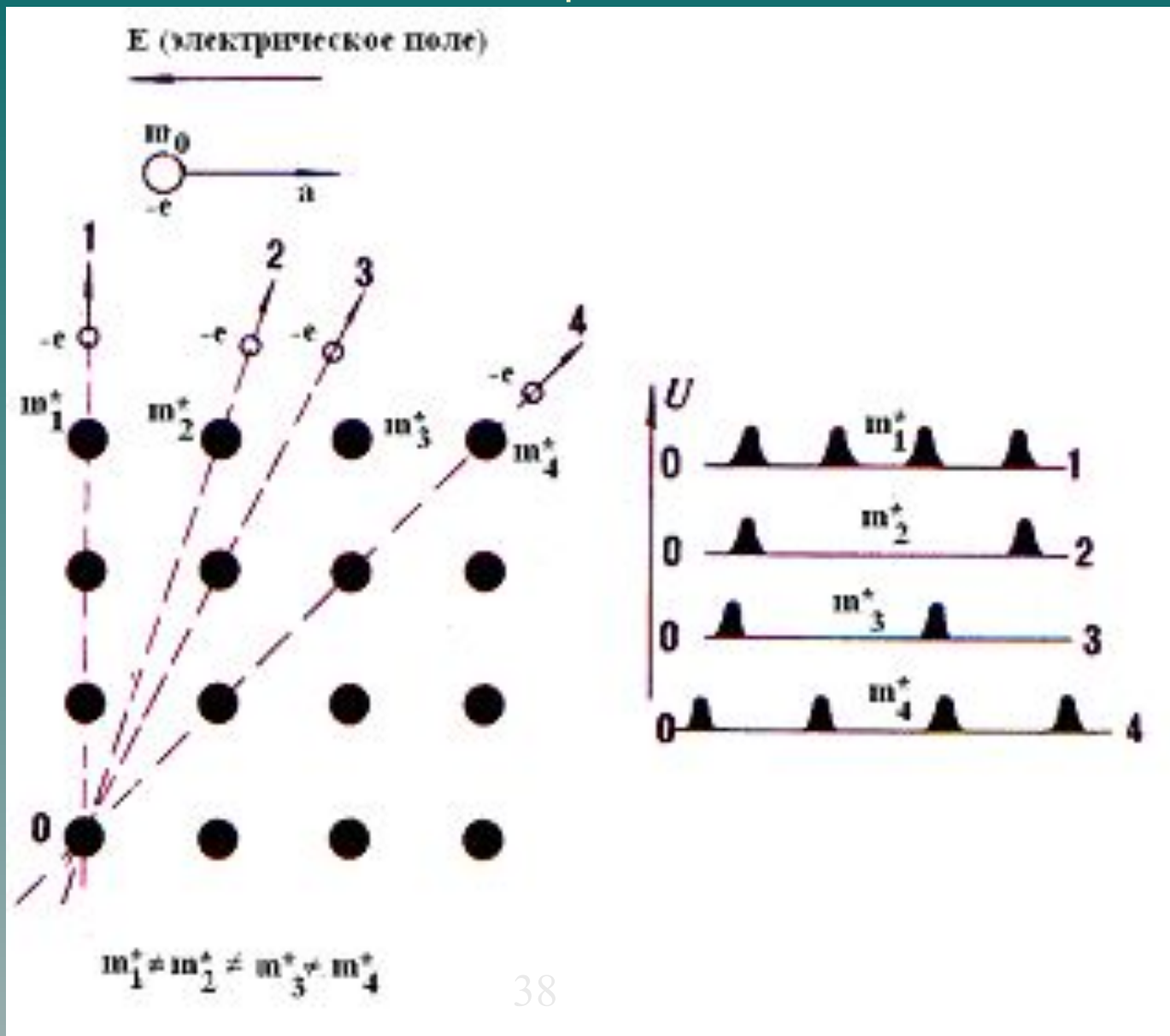
Рис.2.3.

## 2.5.Уровень Ферми в собственном полупроводнике

$$W_{F_i} = W_E + \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_p}{m_n}, \quad (2.9)$$

$$W_E = \frac{W_v + W_c}{2} = W_v + \frac{\Delta W}{2} = W_c - \frac{\Delta W}{2}. \quad (2.10)$$

## 2.6. Эффективные массы электрона и дырки



## Пояснение эффективной массы электрона

39

- ◆ В вакууме свободный электрон движется с ускорением  $a = E/m_{oe}$  в поле  $E$ .
- ◆ Электрон в кристалле движется с ускорением  $a = E/m_n$ , где  $m_n$  – эффективная масса электрона, учитывающая взаимодействие электрона с полем кристаллической решётки.
- ◆ Величина  $m_n$  зависит от направления движения электрона, так как электрон движется в разных направлениях в переменных полях с различными периодами, образуемых узлами кристаллической решётки, (см. рис.). Учитывая все возможные направления движения электрона и усредняя ускорение, приходим к понятию эффективной массы  $m_n$ .
- ◆ Аналогичные рассуждения можно провести по отношению к дырке и прийти к понятию эффективной массы дырки  $m_p$ . Очевидно,  $m_n \neq m_p$ .

## 2.7. Примесные полупроводники

- ◆ Определение понятия примесного полупроводника.
- ◆ Примеси в простых полупроводниках.
- ◆ Примеси в сложных полупроводниках.
- ◆ Электронные (типа  $n$ ) и дырочные (типа  $p$ ) полупроводники.



## 2.8. Полупроводник типа *n*

Атом сурьмы (Sb) в решётке кремния (Si) или германия (Ge) имеет лишний валентный электрон, который легко освобождается.

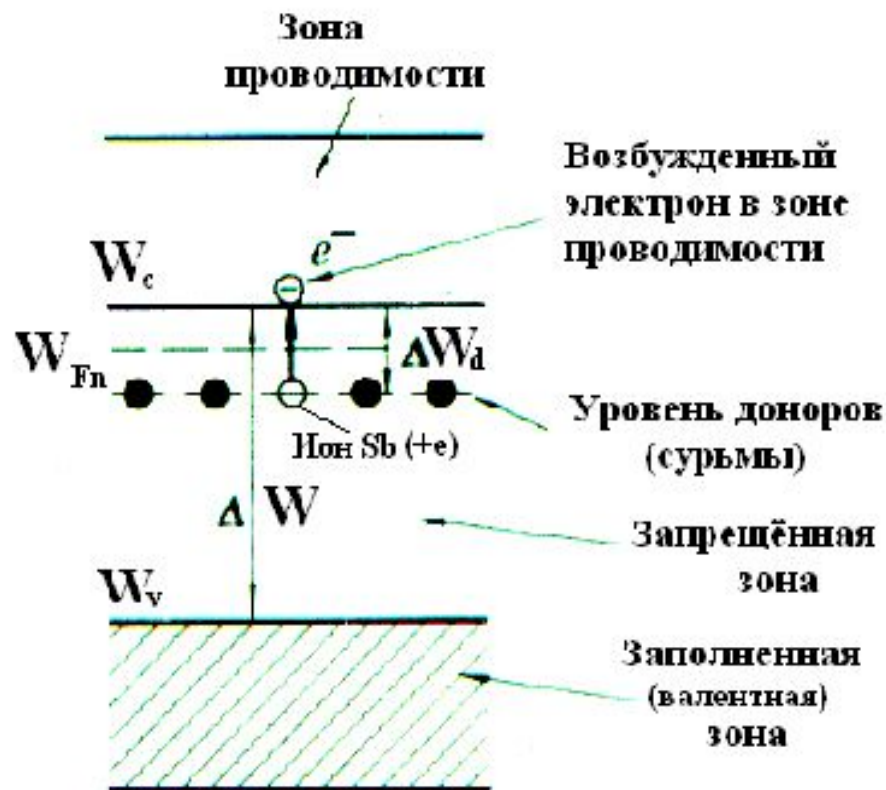
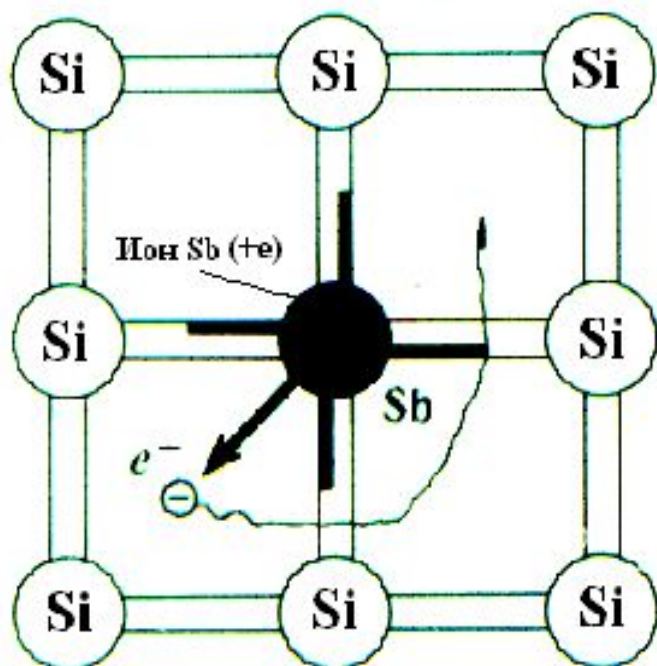


Рис.2.4

## 2.9. Полупроводник типа *p*

Атом индия (In) в решётке кремния (Si) или германия (Ge) оставляет незаполненной одну связь, на которую может перейти электрон.

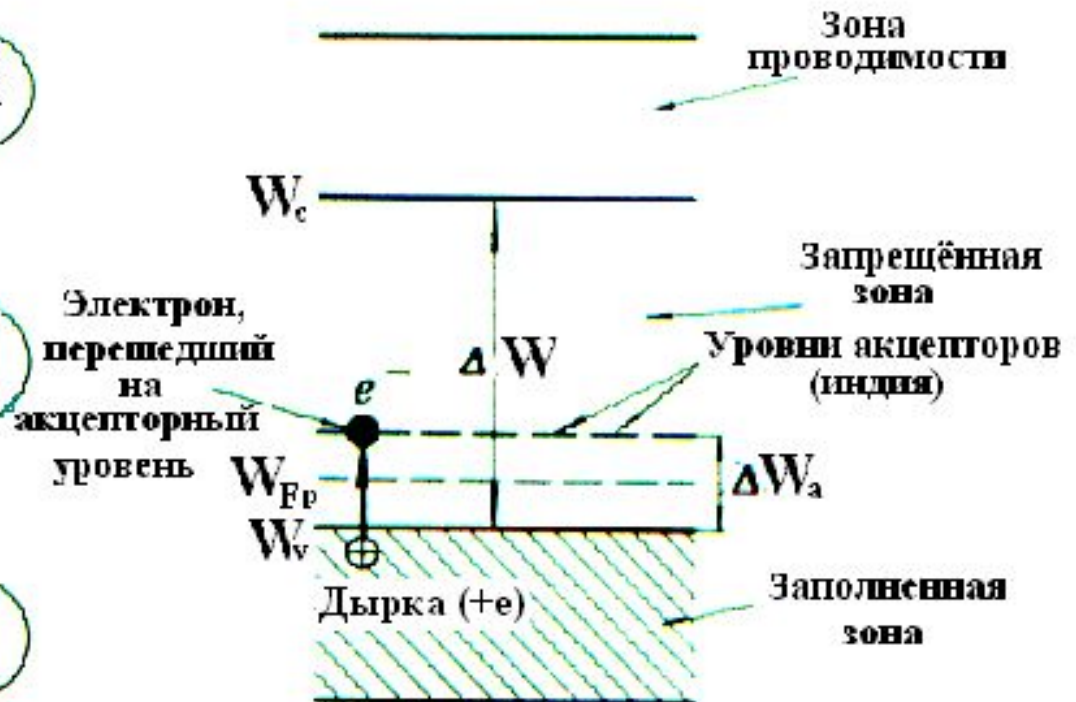
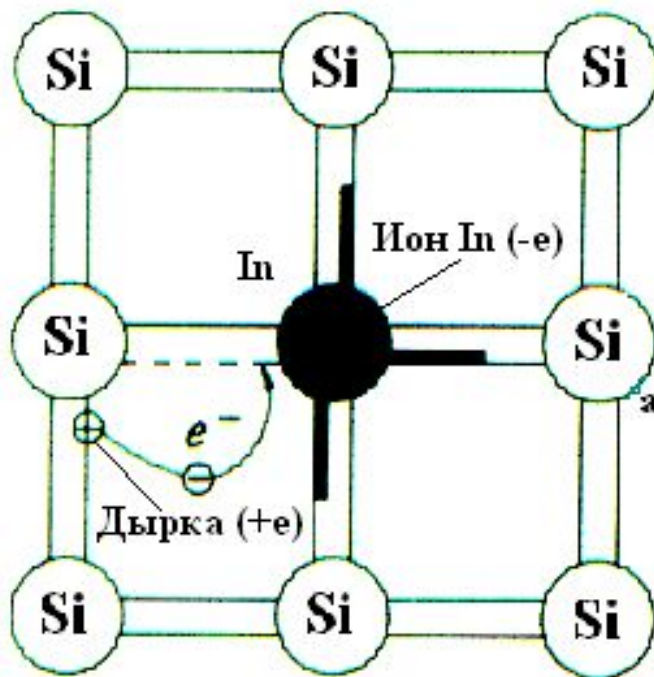


Рис.2.5

## 2.10. Соотношения между концентрациями подвижных зарядов в примесных полупроводниках

$$n = \frac{1}{2} \left( N_d - N_a + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right); \quad 2.11$$

$$p = \frac{1}{2} \left( N_a - N_d + \sqrt{(N_a - N_d)^2 + 4n_i^2} \right); \quad 2.12$$

$$p \cdot n = n_i^2 = p_i^2; \quad 2.13$$

$$N_a = N_d, \quad p = n = n_i = p_i. \quad 2.14$$

## 2.10. Продолжение

$$n_n = \frac{1}{2} \left( N_d + \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} \right), \quad (2.15)$$

$$P_n = \frac{n_i^2}{n_n}. \quad (2.16)$$

$$P_p = \frac{1}{2} \left( N_a + \sqrt{N_a^2 + 4n_i^2} \right), \quad (2.17)$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{P_p}. \quad (2.18)$$

$$N_d \gg n_i, \quad n_n \approx N_d. \quad (2.19)$$

$$N_a \gg n_i, \quad P_p \approx N_a. \quad (2.20)$$

## 2.11. Зависимости равновесных концентраций подвижных зарядов от степени легирования полупроводников примесями

45

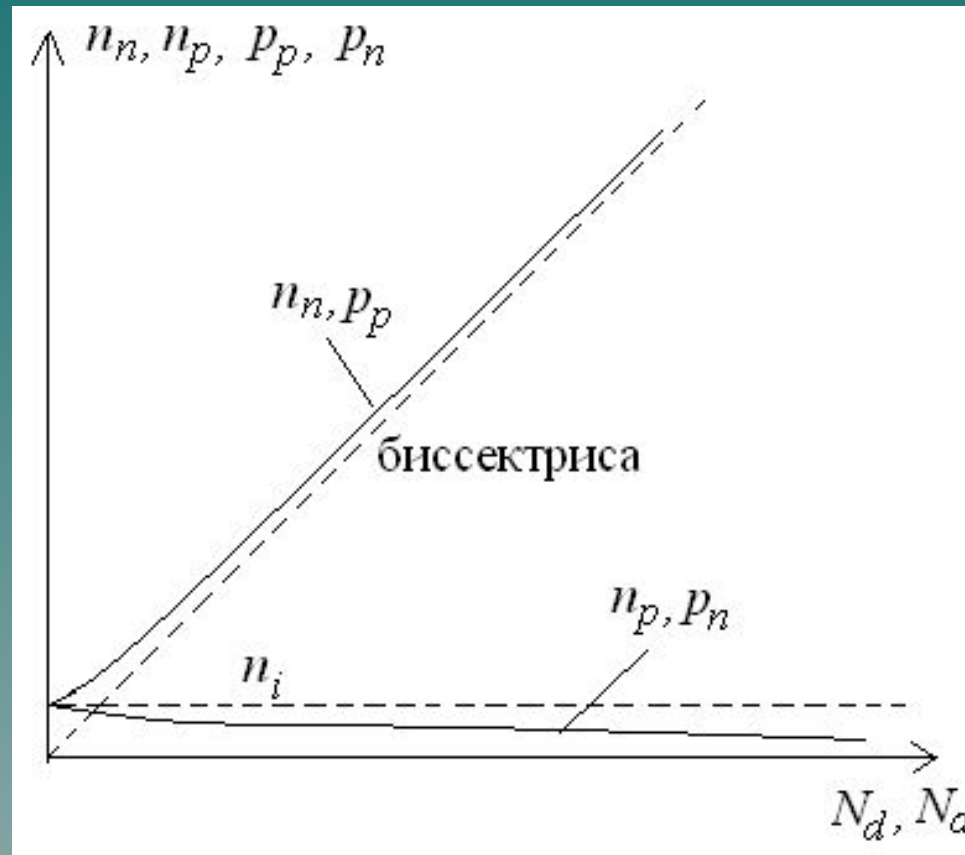
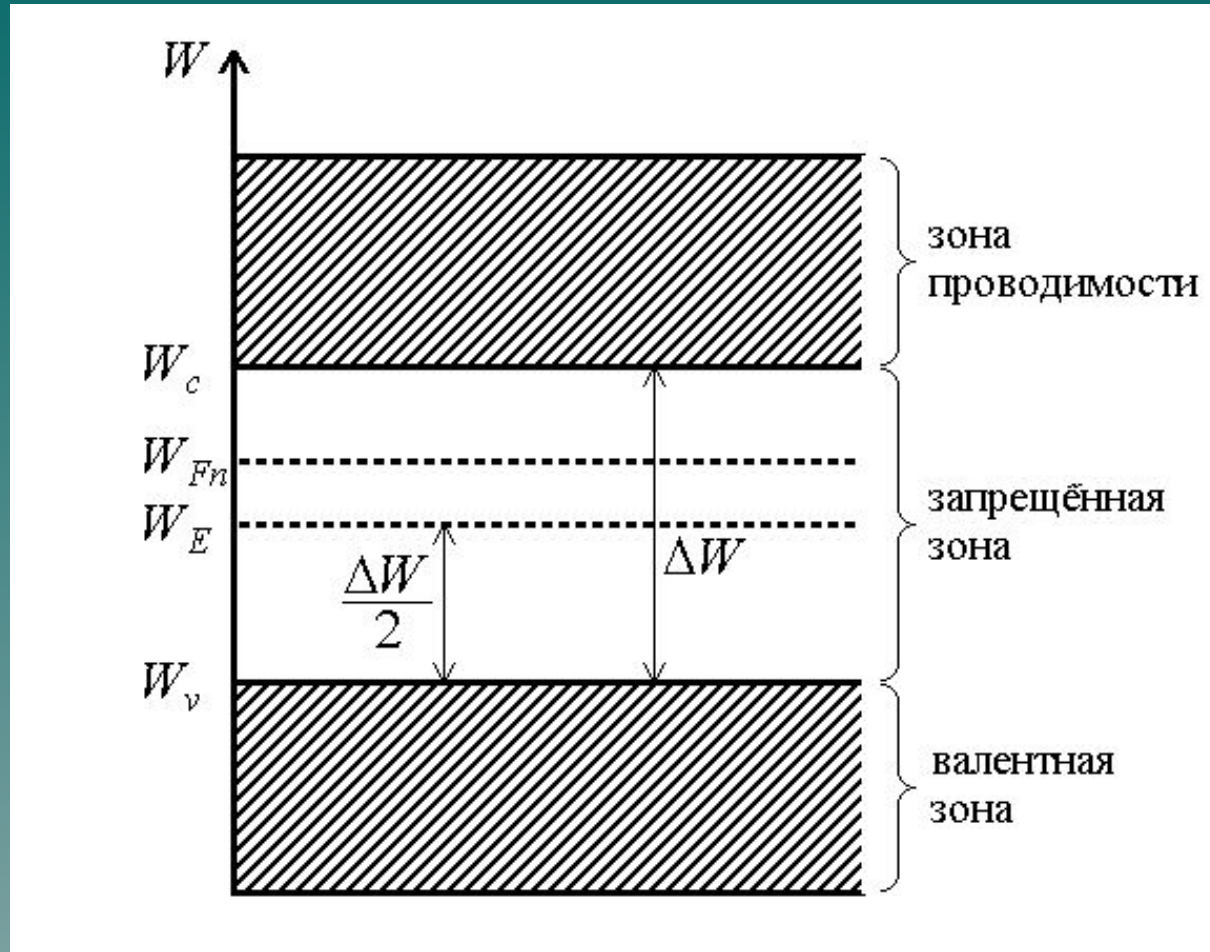


Рис.2.6

## 2.12. Уровни Ферми в примесных полупроводниках



46

Рис.2.7. Полупроводник  $n$ -типа

$$W_{Fn} = W_E + kT \ln \frac{n_n}{n_i}, \quad (2.21)$$

## 2.12. Продолжение

47

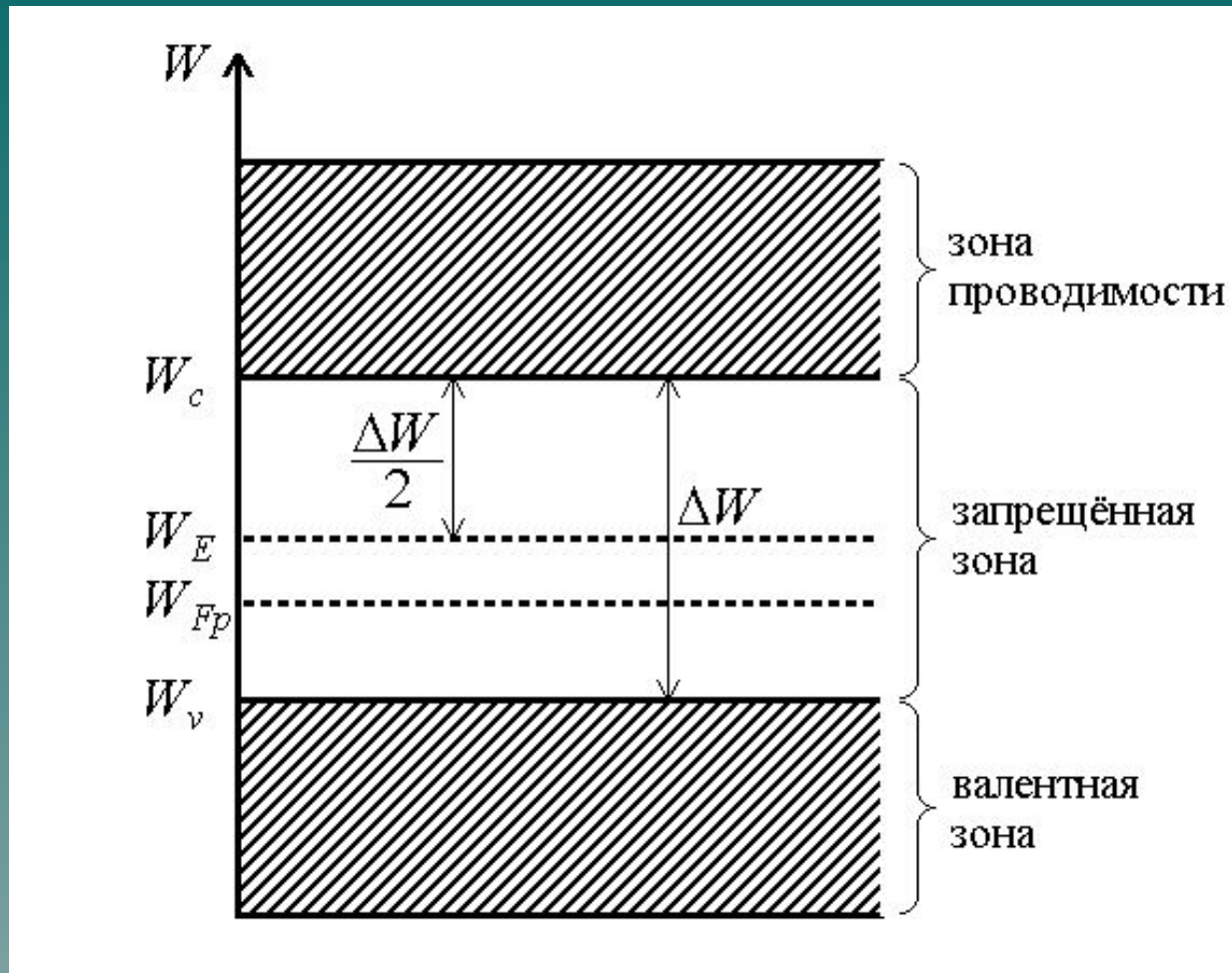
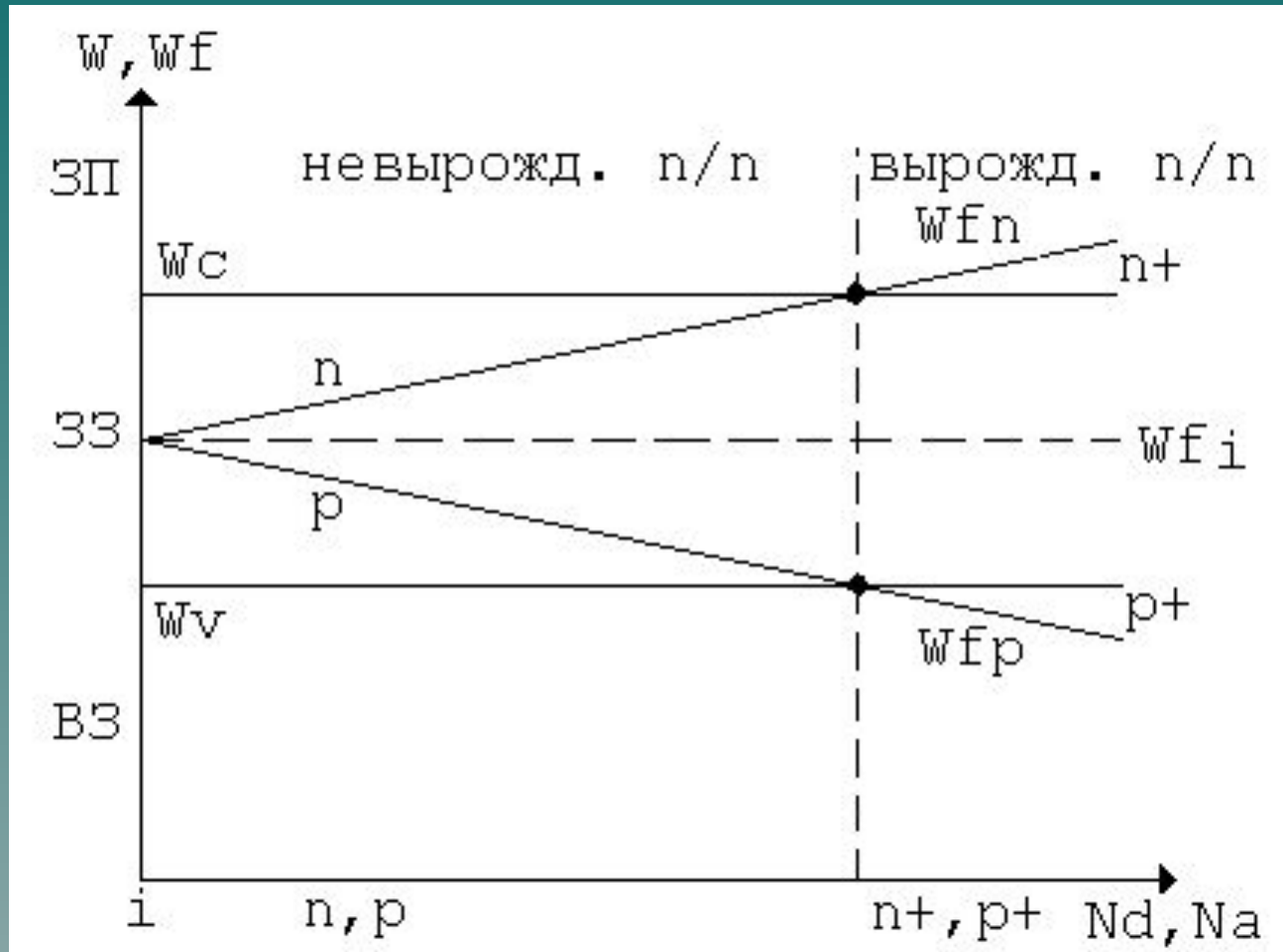


Рис.2.8. Полупроводник  $p$ -типа

$$W_{Fp} = W_E - kT \ln \frac{p_p}{n_i}, \quad (2.22)$$

## 2.13. Зависимость уровней Ферми от концентраций примесей



48

Рис.2.9



## 2.14. Механизмы образования подвижных зарядов

49

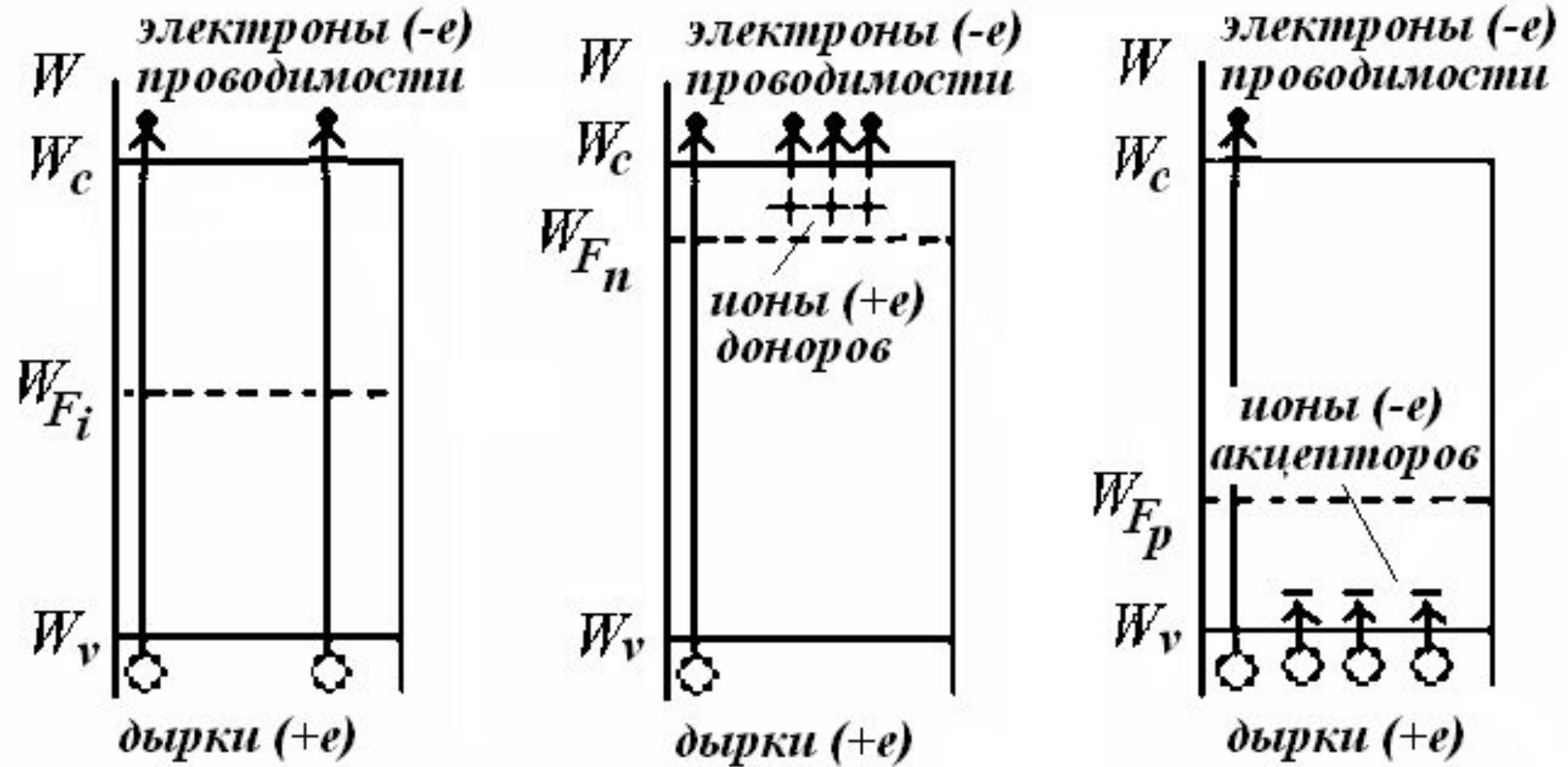


Рис.2.10

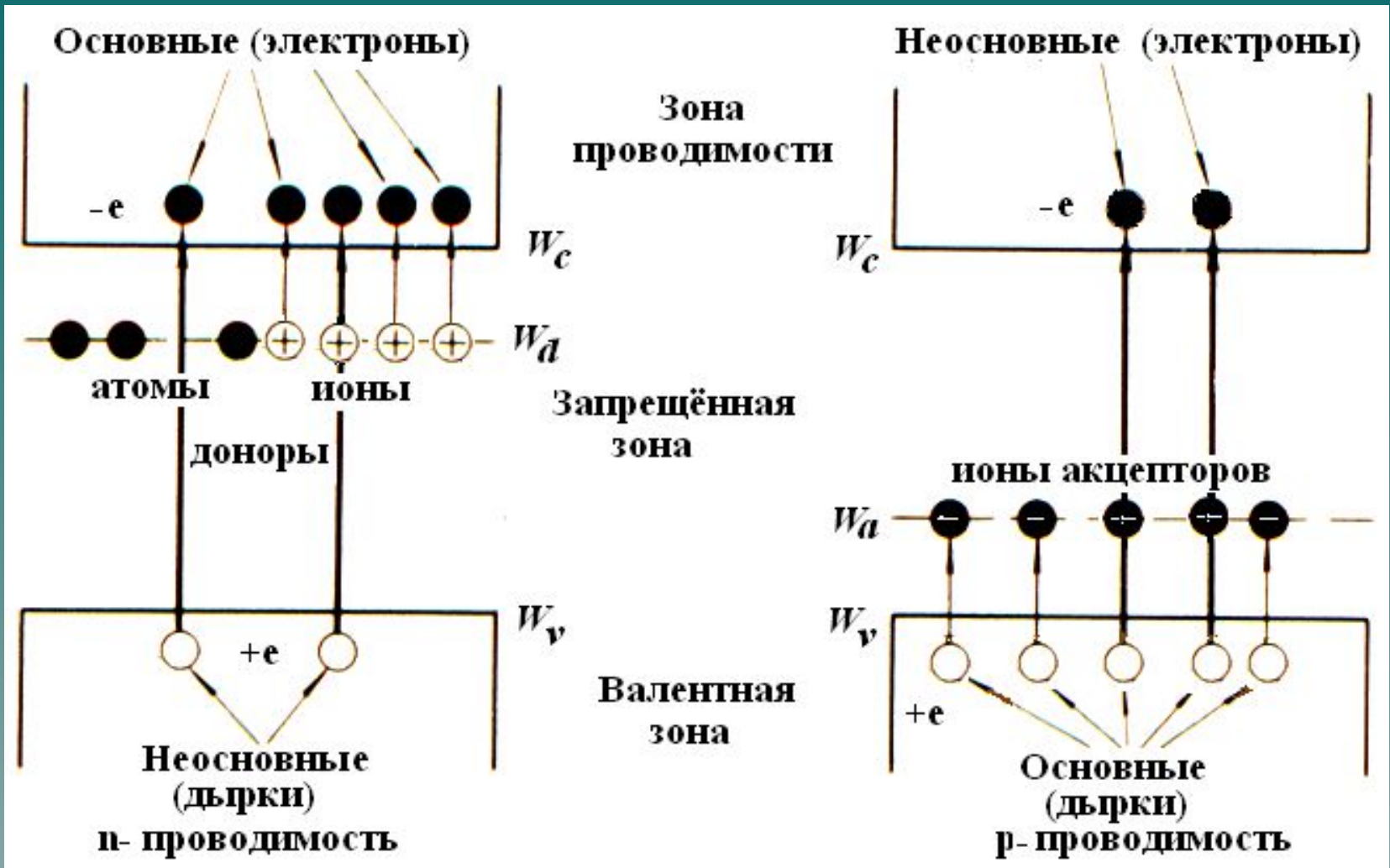
а

б

в

## 2.15. Основные и неосновные носители зарядов

50



а

Рис.2.11

б

## 2.16. Токи в полупроводнике.

### 2.16.1. Ток дрейфа.

$$V_{n,др} = -\mu_n E, \quad V_{p,др} = \mu_p E; \quad (2.23)$$

$$j_{n,др} = en\mu_n E, \quad j_{p,др} = ep\mu_p E; \quad (2.24)$$

$$j_{др} = j_{n,др} + j_{p,др} = e(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E; \quad (2.25)$$

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) = \sigma_n + \sigma_p; \quad (2.26)$$

$$\vec{j}_{др} = \vec{j}_{n,др} + \vec{j}_{p,др}. \quad (2.27)$$

## 2.16.2. Электропроводность полупроводников в электрическом поле

52

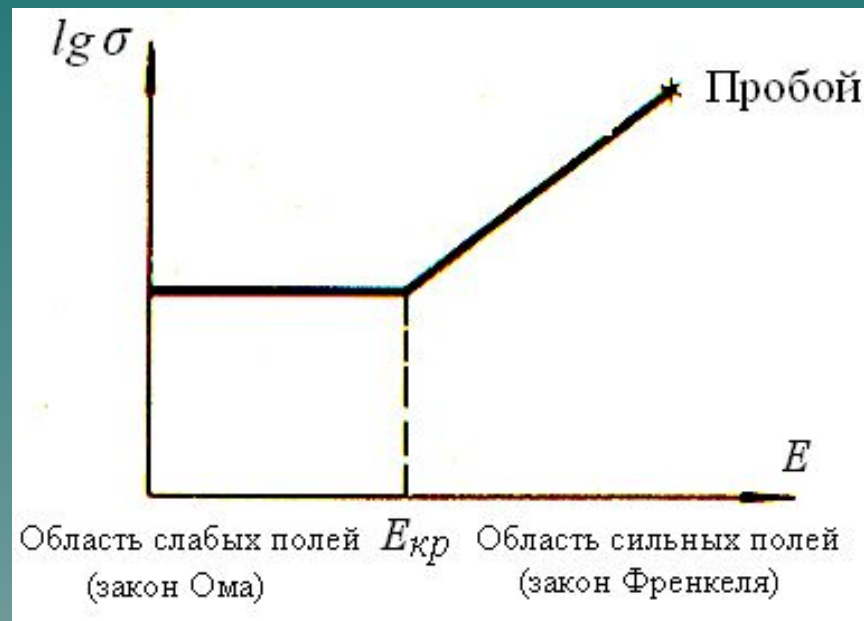
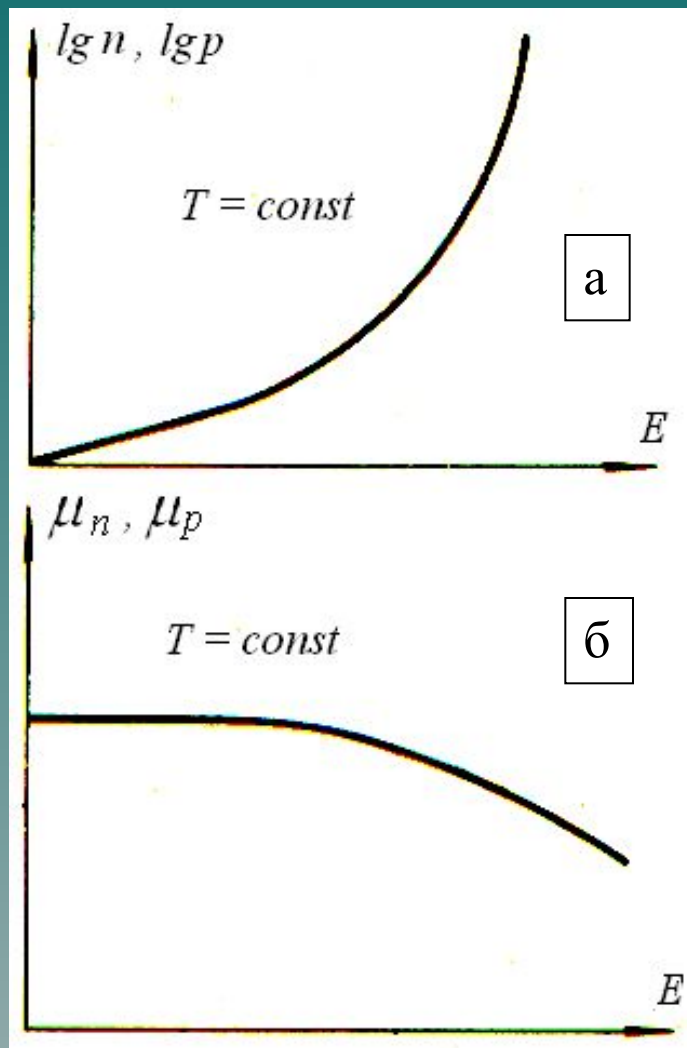


Рис.2.12

### 2.16.3. Ток диффузии. Полный ток.

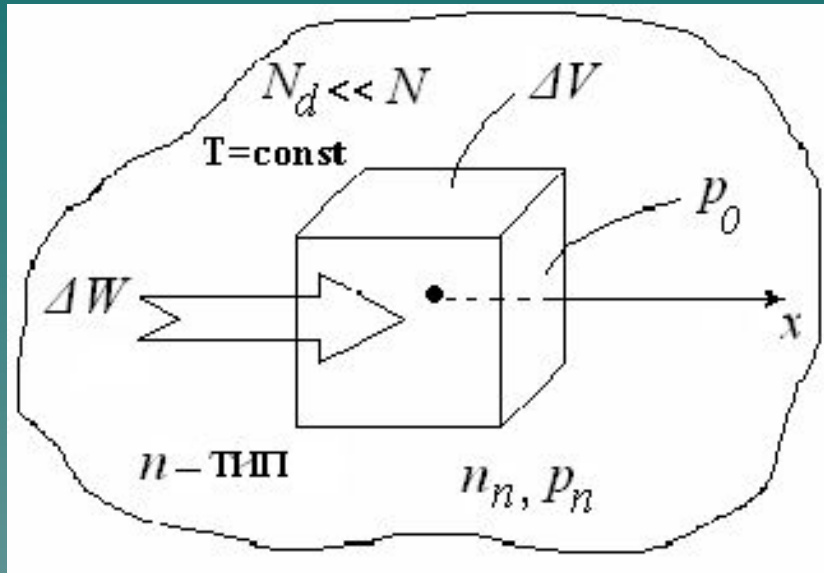
$$j_{n, \text{диф}} = eD_n \frac{dn}{dx}, \quad j_{p, \text{диф}} = -eD_p \frac{dp}{dx}; \quad (2.28)$$

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{e}, \quad D_p = \mu_p \frac{kT}{e}; \quad (2.29)$$

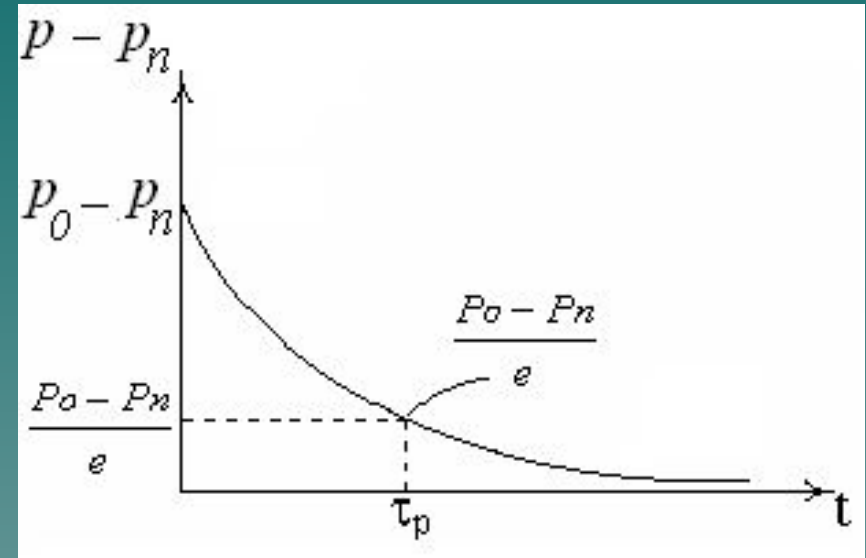
$$\vec{j}_{\text{диф}} = \vec{j}_{n, \text{диф}} + \vec{j}_{p, \text{диф}}; \quad (2.30)$$

$$\vec{j} = \vec{j}_{\text{др}} + \vec{j}_{\text{диф}} = \vec{j}_{n, \text{др}} + \vec{j}_{p, \text{др}} + \vec{j}_{n, \text{диф}} + \vec{j}_{p, \text{диф}}. \quad (2.31)$$

## 2.17. Время жизни неравновесных зарядов



а



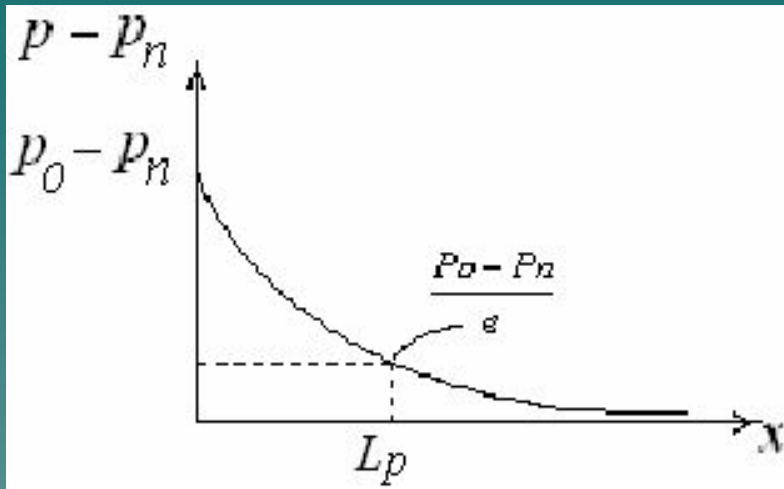
б

Рис.2.13

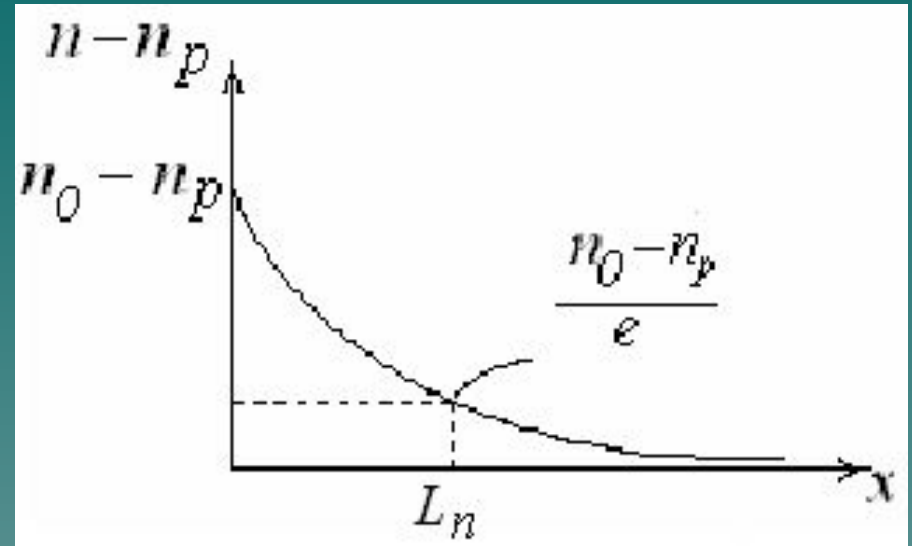
$$V_{рек.p} = \frac{dp}{dt} = -\frac{p - p_n}{\tau_p} \quad (2.32)$$

$$V_{рек.n} = \frac{dn}{dt} = -\frac{n - n_p}{\tau_n} \quad (2.33)$$

## 2.18. Диффузионная длина неравновесных зарядов



а



б

Рис.2.14

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} ;$$

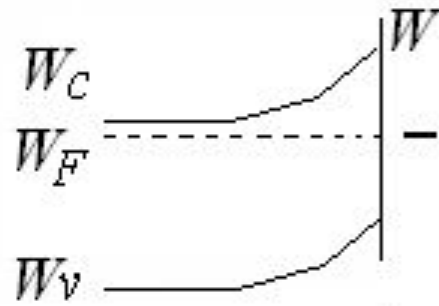
(2.34)

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} .$$

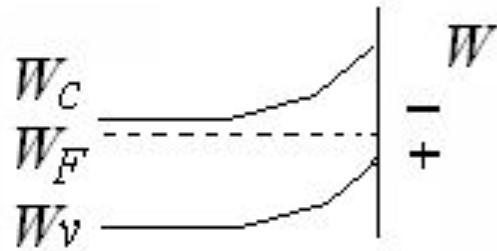
(2.35)

## 2.4. Влияние поверхностных состояний

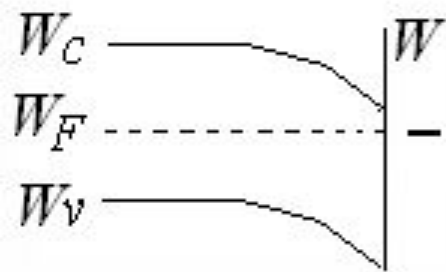
Полупроводник n-типа



обеднение



инверсия



обогащение

Полупроводник p-типа

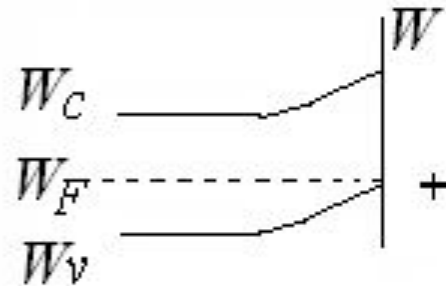
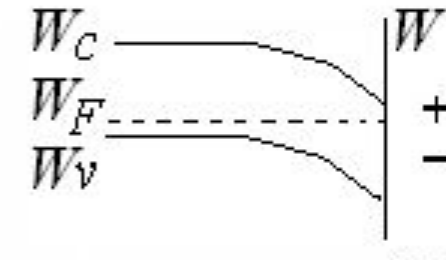
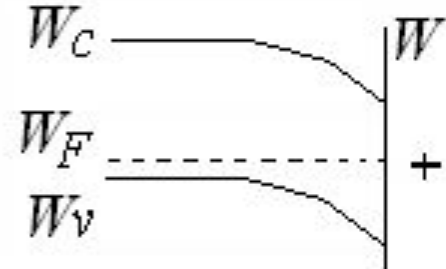


Рис.2.13



## 2.5. Эффект внешнего поля



Рис.2.14

Рис.2.15. Термическая ионизация (эффект Френкеля)

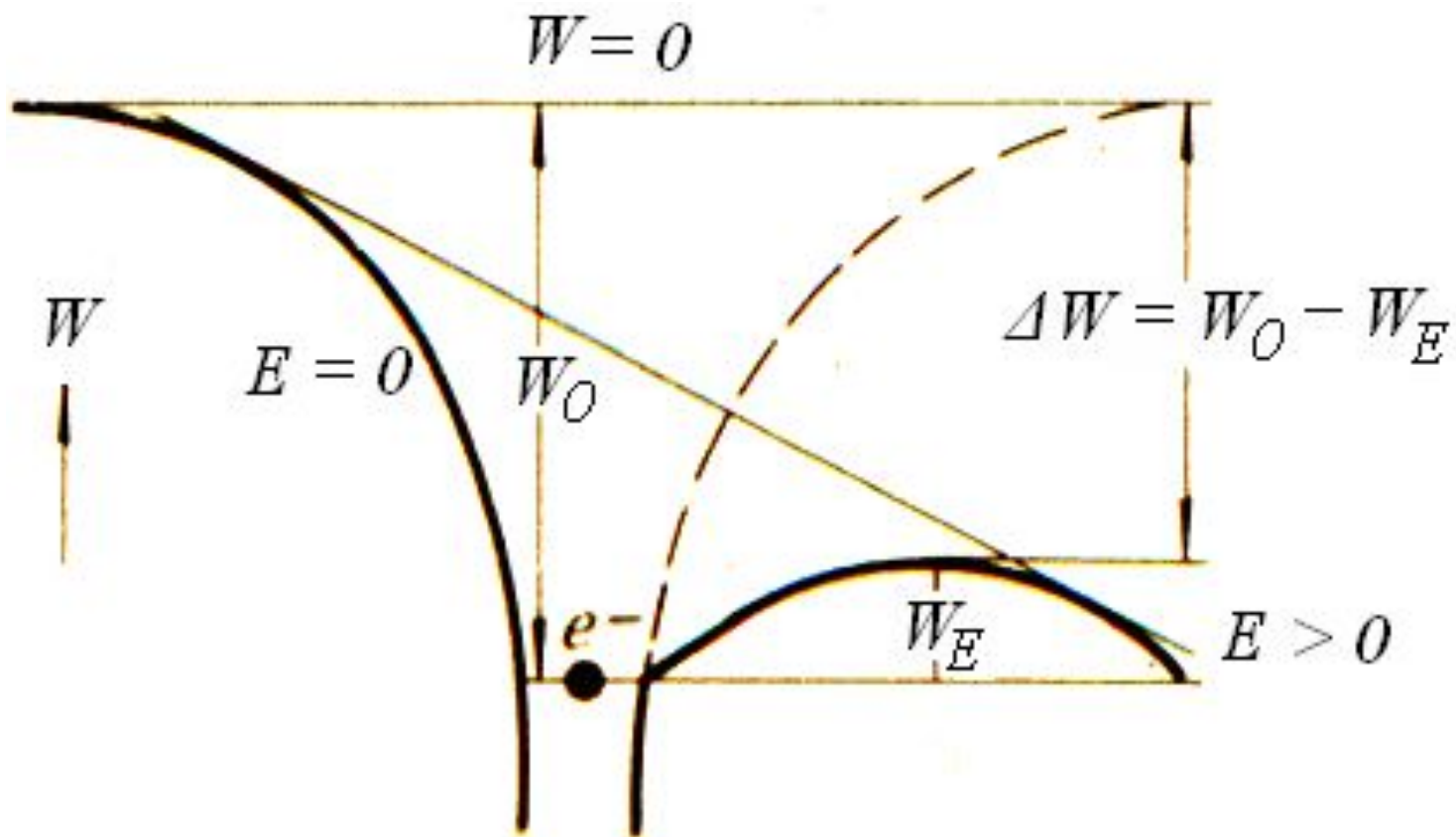
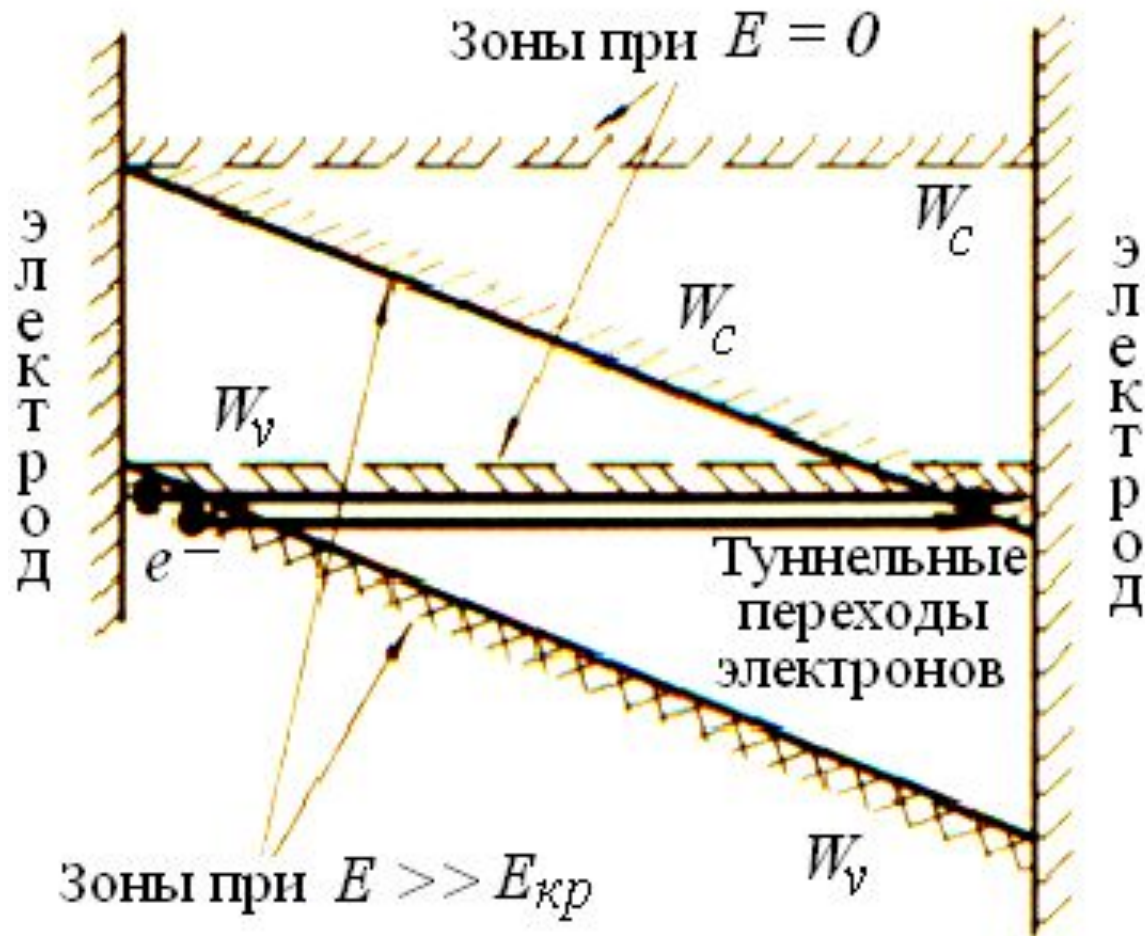


Рис.2.16. Эффект Зинера (туннельный эффект)



## 2.6. Основные выводы по разделу 2

- В полупроводнике, находящемся в состоянии равновесия, распределение электронов по энергетическим уровням соответствует распределению Ферми–Дирака.
- По типу электропроводности полупроводники разделяются на собственные (полупроводники  $i$ -типа), электронные (полупроводники  $n$ -типа) и дырочные (полупроводники  $p$ -типа).
- Существует два вида направленного движения свободных носителей заряда в полупроводнике, – дрейф и диффузия.
- Под действием внешнего электрического поля могут изменяться концентрации свободных носителей заряда в приповерхностном слое полупроводникового кристалла.

3. Контактные явления.  
 Контакты металл–полупроводник.  
 3.1.1. Работа выхода.

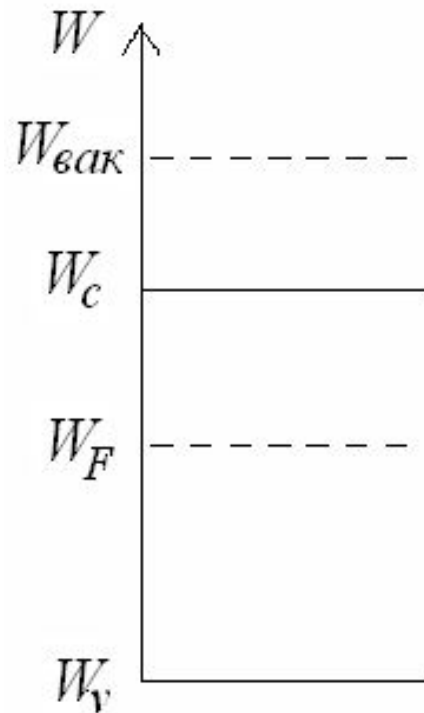


Рис. 3.1.

$$W_{\text{вых}} = W_{\text{вак}} - W_F ; \quad (3.1)$$

$$W_m = W_{F_m} ; \quad (3.2)$$

$$W_i = W_{F_i} = W_E + \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_p}{m_n} , \quad (3.3)$$

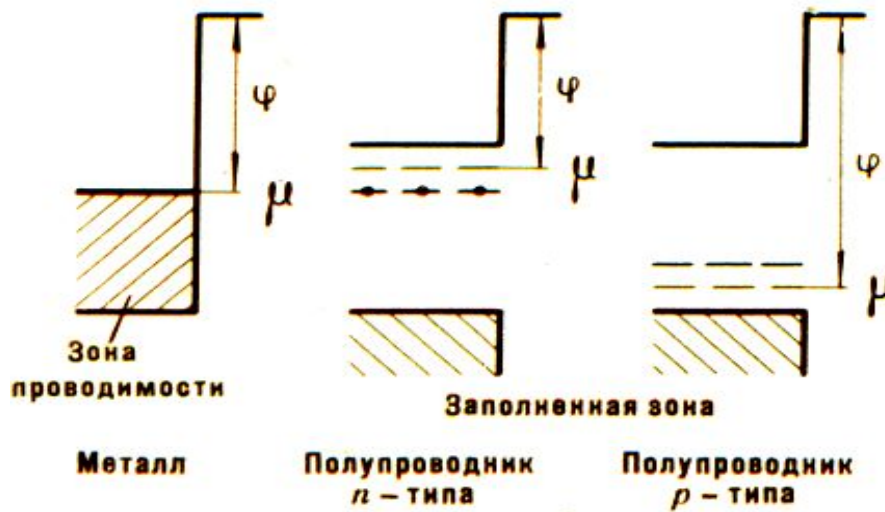
$$W_E = \frac{W_v + W_c}{2} = W_v + \frac{\Delta W}{2} = W_c - \frac{\Delta W}{2} ; \quad (3.4)$$

$$W_n = W_{F_n} = W_E + kT \ln \frac{n_n}{n_i} ; \quad (3.5)$$

$$W_p = W_{F_p} = W_E - kT \ln \frac{p_p}{n_i} \quad (3.6)$$

## Контактные явления.

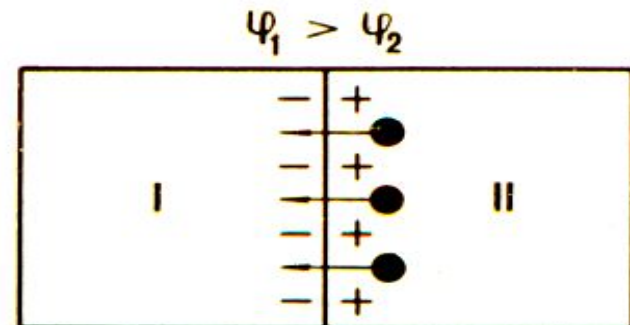
### Работа выхода и контактная разность потенциалов



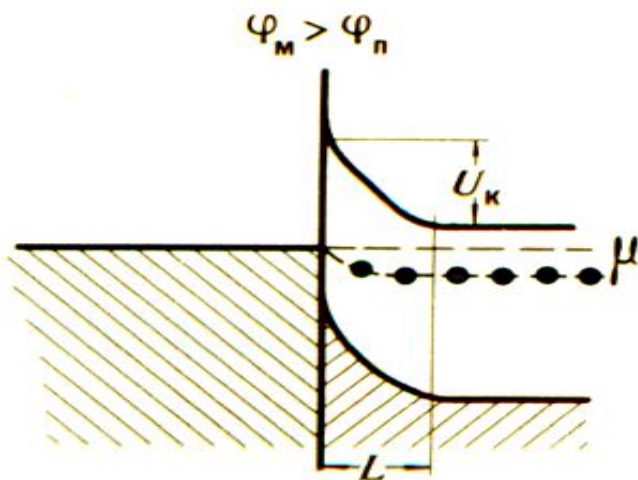
Электроны переходят из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода, пока возникшее скопление зарядов не создаст поле, препятствующее переходу электронов.  
 Контактная разность потенциалов

$$U_k = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Работа выхода  $\varphi$  равна энергии, необходимой для удаления электрона с уровня Ферми в бесконечность.



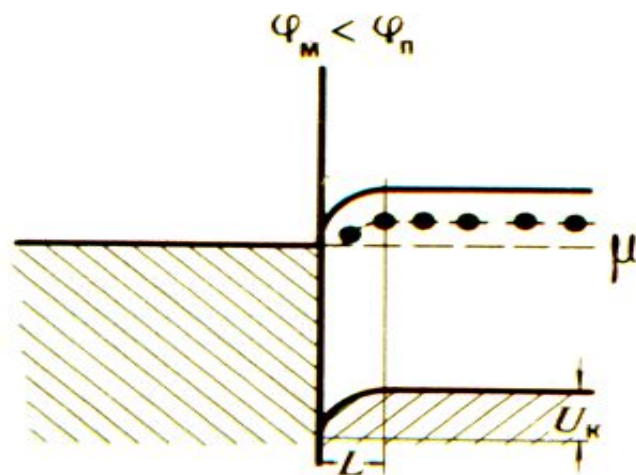
## Контакт металла с полупроводниками $n$ -типа



**Запорный слой**

Электроны переходят из полупроводника  $n$ -типа в металл, оставляя положительные ионы доноров.

В месте контакта — обедненный свободными электронами слой толщиной  $L$  и барьер высотой  $U_k$ .



**Слой повышенной проводимости**

Электроны переходят из металла в полупроводник, образуя слой повышенной проводимости толщиной  $L$ .

### 3.1.2. Потенциальные барьеры на границе токопроводящих материалов и вакуума

$$\varphi_m = \frac{W_m}{e} = \frac{W_{Fm}}{e}; \quad (3.7)$$

$$\varphi_i = \frac{W_i}{e} = \frac{W_{Fi}}{e} = \frac{W_E}{e} + \frac{3kT}{4e} \ln \frac{m_p}{m_n}, \quad (3.8)$$

$$\varphi_n = \frac{W_n}{e} = \frac{W_{Fn}}{e} = \frac{W_E}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_i}; \quad (3.9)$$

$$\varphi_p = \frac{W_p}{e} = \frac{W_{Fp}}{e} = \frac{W_E}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{n_i}; \quad (3.10)$$

$$\varphi_E = \frac{W_E}{e} = \frac{W_v + W_c}{2e}. \quad (3.11)$$



3.2.1. Виды контактов металл–полупроводник.  
Условия реализации

Таблица 3.1

Контакт	Тип контакта	Условия реализации
$m - n$	омический	$W_m < \underline{W_n}$ $\varphi_m < \varphi_n$
	выпрямляющий	$W_m > \underline{W_n}$ $\varphi_m > \varphi_n$
$m - p$	омический	$W_m > \underline{W_p}$ $\varphi_m > \varphi_p$
	выпрямляющий	$W_m < \underline{W_p}$ $\varphi_m < \varphi_p$

### 3.2.2. Виды контактов металл–полупроводник. Выпрямляющие контакты

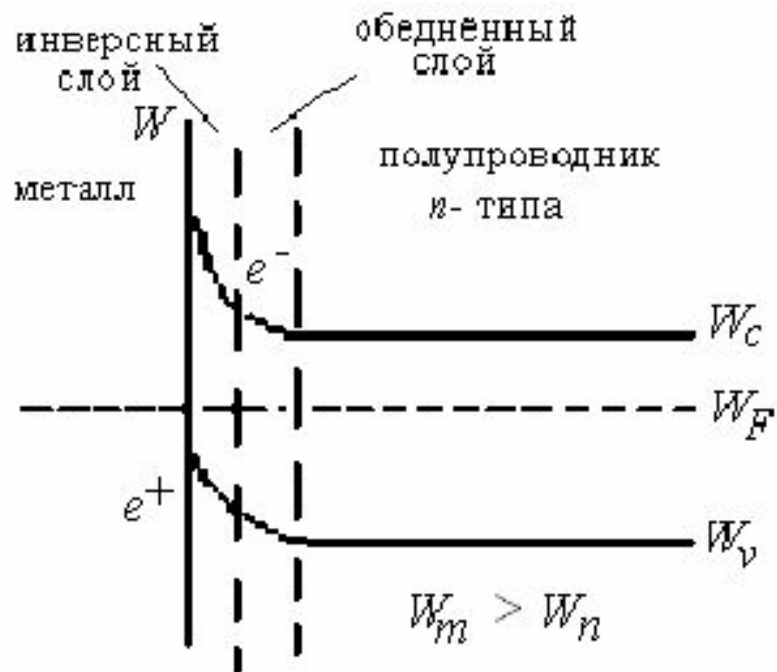


Рис. 3.2.

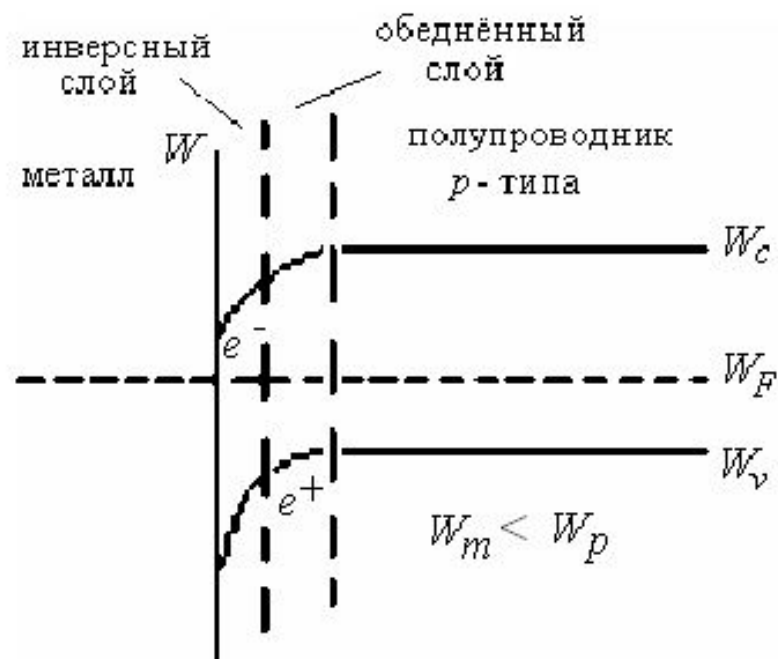


Рис. 3.3.

### 3.2.3. Виды контактов металл–полупроводник. Омические контакты.

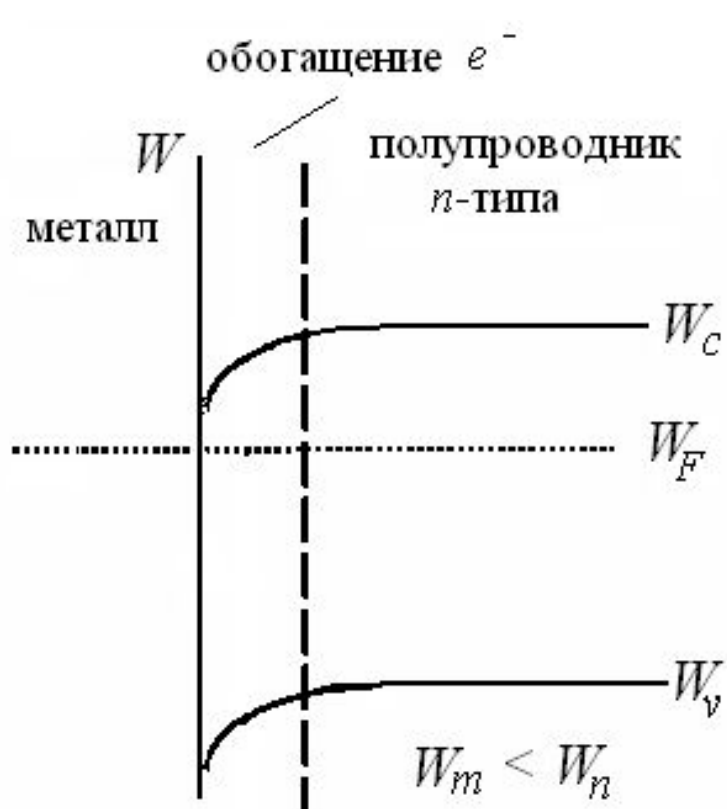


Рис. 3.4.

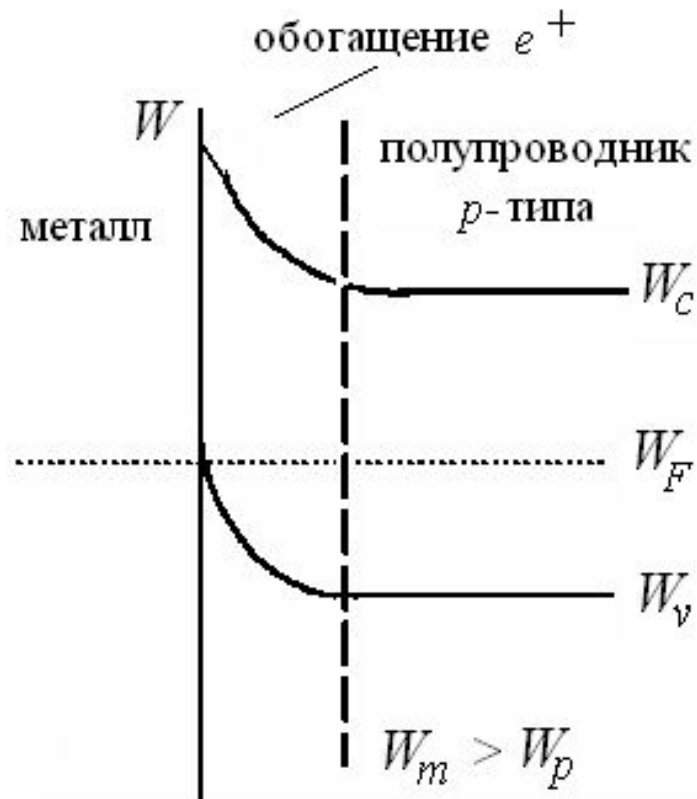


Рис. 3.5.

### 3.2.4. Вольтамперные характеристики контактов металл–полупроводник

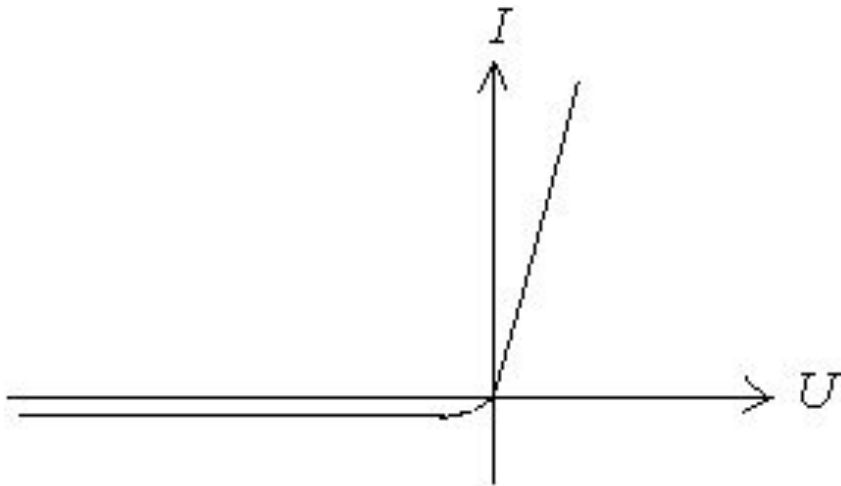


Рис.3.6. Выпрямляющий контакт

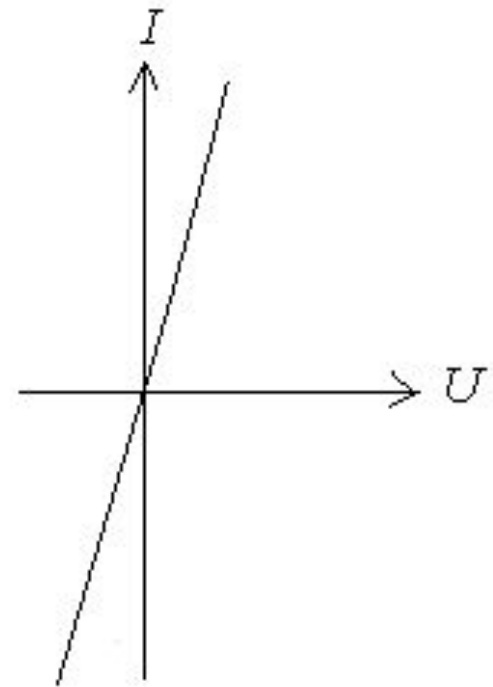
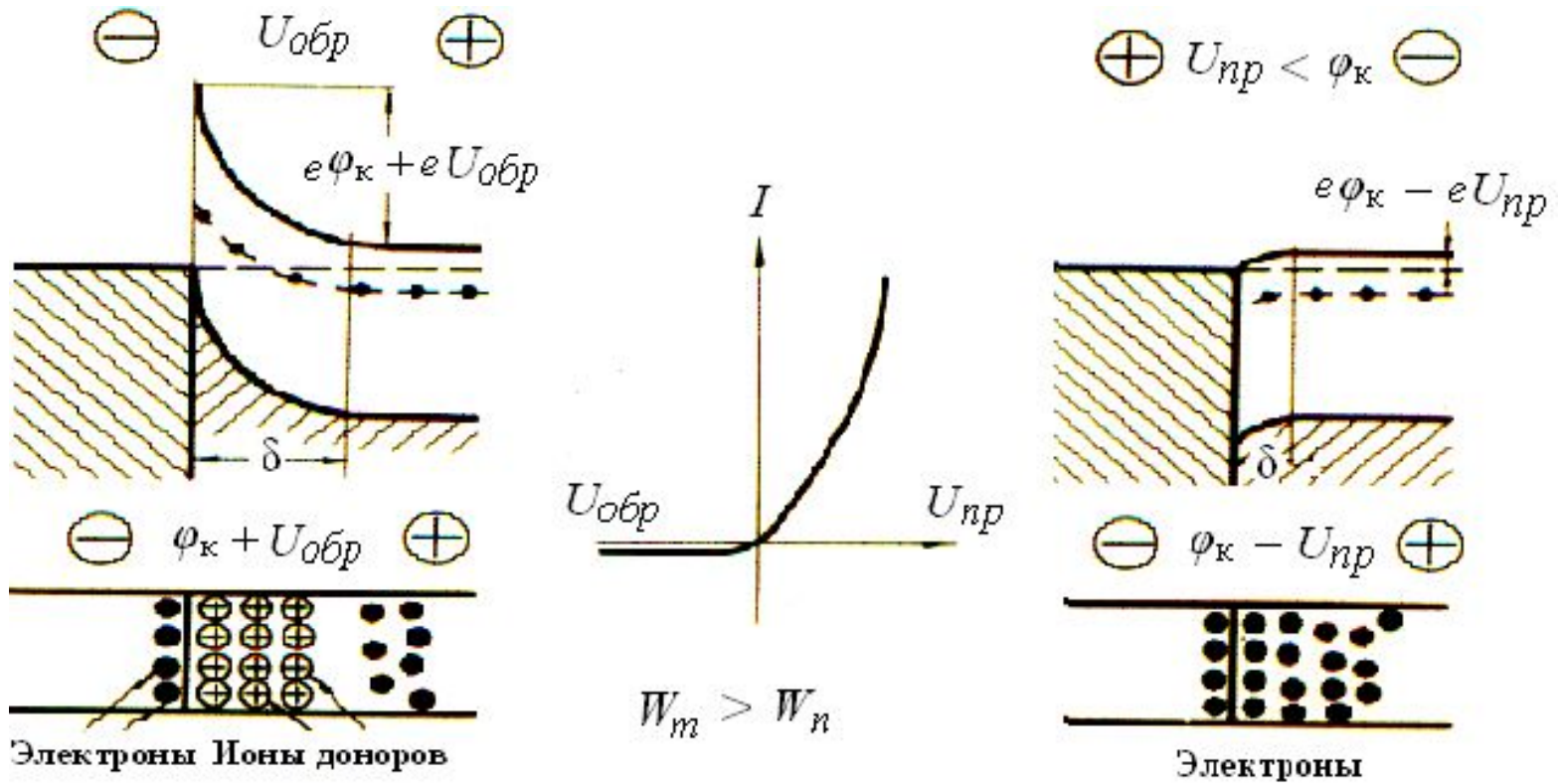


Рис.3.7. Омический контакт

Рис.3.8. Выпрямление на контакте металла с полупроводником  $n$ -типа



## Формулы для контактов металл–полупроводник

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]; \quad (3.12)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot (\varphi_k - U)}{e \cdot N_d}}, \quad (3.13) \quad C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{\delta} = S \sqrt{\frac{e \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot N_d}{2 \cdot (\varphi_k - U)}}; \quad (3.14)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot (\varphi_k - U)}{e \cdot N_a}}, \quad (3.15) \quad C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{\delta} = S \sqrt{\frac{e \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot N_a}{2 \cdot (\varphi_k - U)}}. \quad (3.16)$$

Преобразование выражений (3.13...3.16)

$$\Delta\varphi(U) = \varphi_x - U = \varphi_x \left(1 - \frac{U}{\varphi_x}\right), \quad (3.17)$$

$$\delta = \delta[\Delta\varphi(U)] = \delta_0 \left(1 - \frac{U}{\varphi_x}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.18)$$

$$C = C[\Delta\varphi(U)] = C_0 \left(1 - \frac{U}{\varphi_x}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.19)$$

Выражения для  $\delta_0$  и  $C_0$

$$\delta_0 = \left( \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \varphi_k}{e N_d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.20)$$

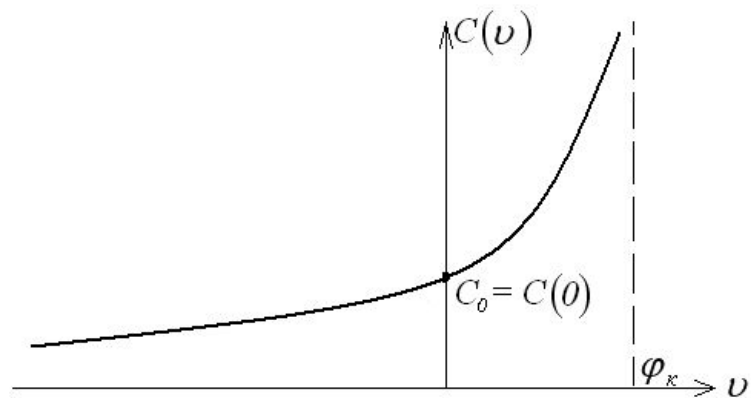
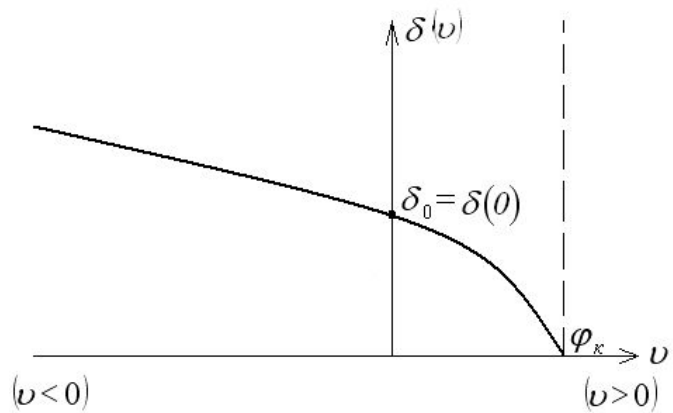
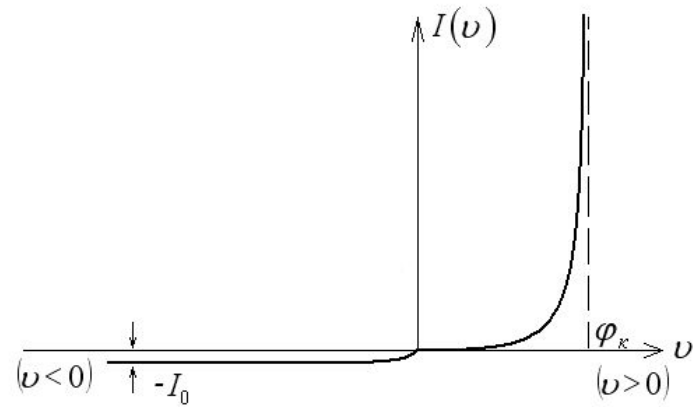
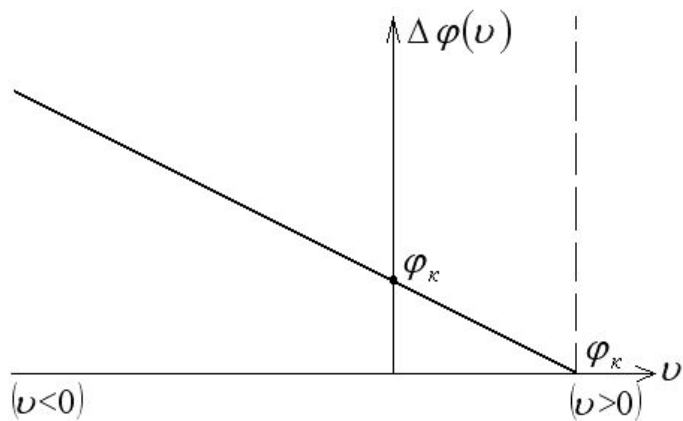
$$\delta_0 = \left( \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \varphi_k}{e N_a} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (3.21)$$

$$C_0 = S \left( \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot N_d}{e \varphi_k} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.22)$$

$$C_0 = S \left( \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot N_a}{e \varphi_k} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.23)$$



Рис.3.9. Графики  $\Delta\varphi(U)$ ,  $I(U)$ ,  $\delta(U)$  и  $C(U)$

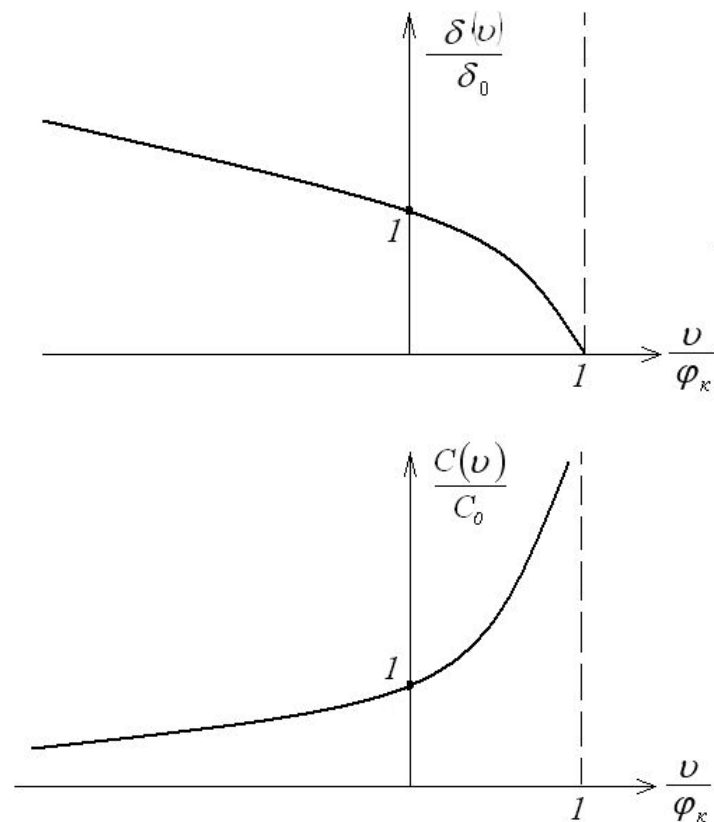
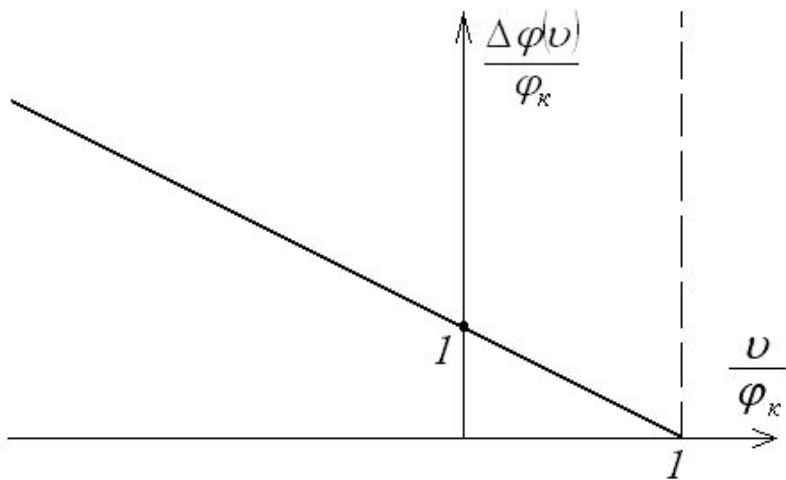


Нормирование функций  $\delta(U)$ ,  $\Delta\varphi(U)$  и  $C(U)$

$$\frac{\delta}{\delta_0} = \left(1 - \frac{U}{\varphi_k}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.24) \quad \frac{\Delta\varphi(U)}{\varphi_k} = 1 - \frac{U}{\varphi_k}, \quad (3.25)$$

$$\frac{C}{C_0} = \left(1 - \frac{U}{\varphi_k}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.26)$$

Рис.3.10. Графики нормированных функций  $\delta(U)$ ,  $\Delta\varphi(U)$  и  $C(U)$



### **3.3. Основной вывод по разделу 3**

- Существует два вида переходов металл–полупроводник, – выпрямляющие переходы и омические контакты. Выпрямляющие переходы обладают свойством односторонней проводимости. Омические контакты не обладают таким свойством.

## 4. Электронно-дырочный переход

### 4.1. Структура электронно-дырочного перехода

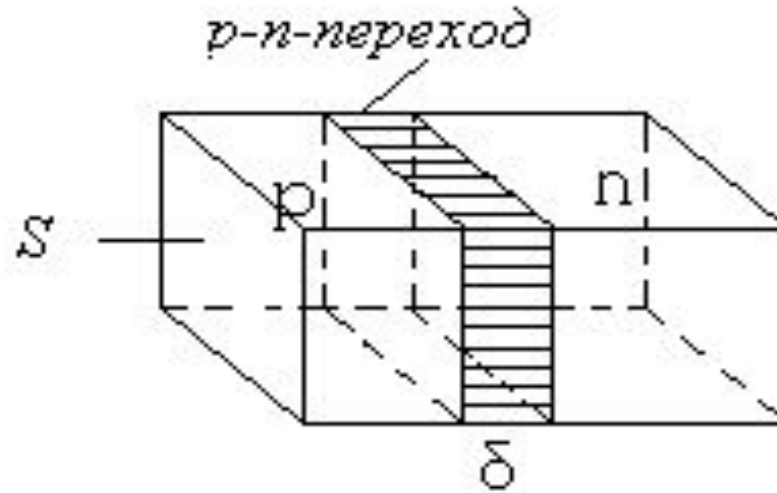
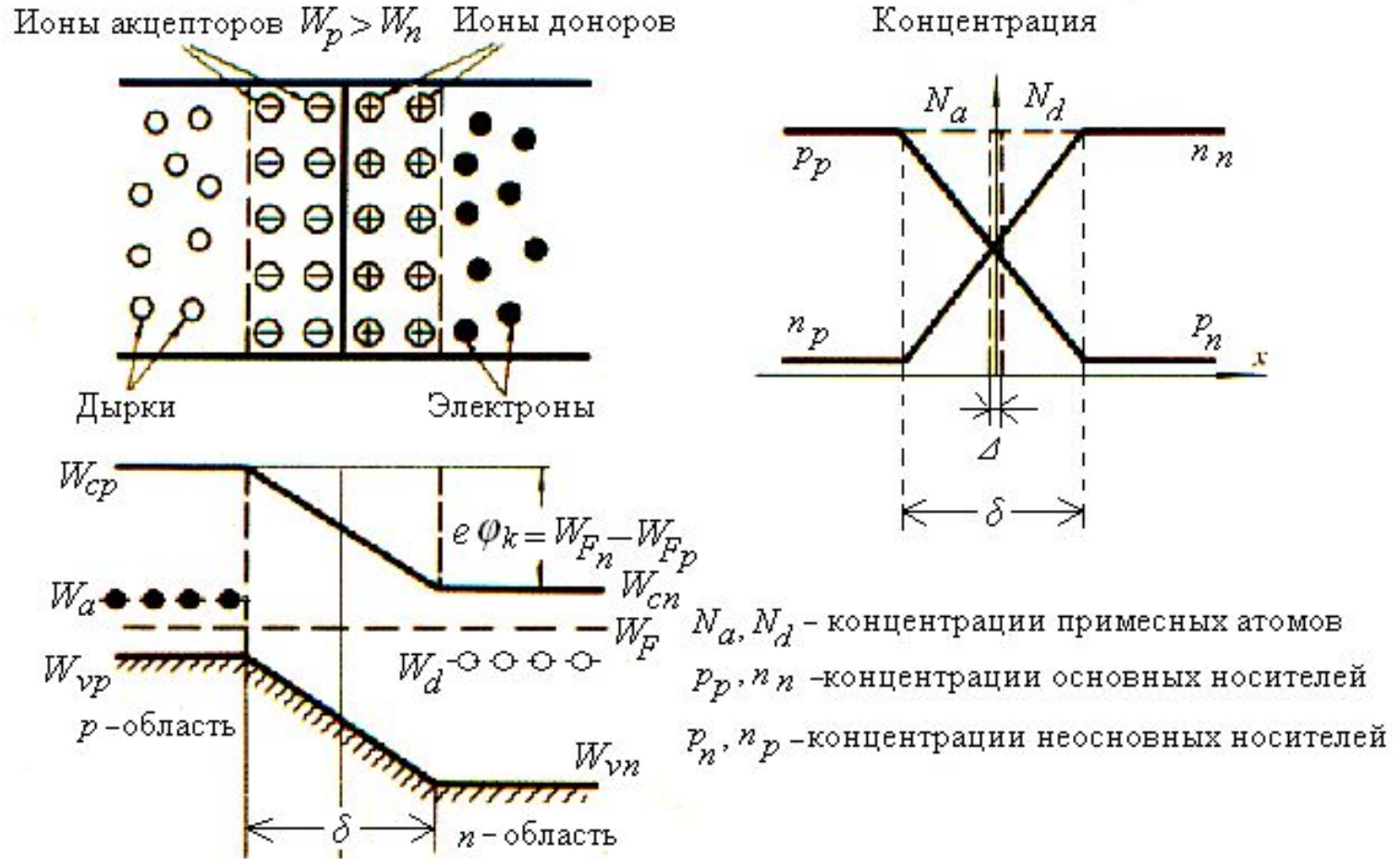


Рис. 4.1.

## 4.2. Электронно–дырочный переход в состоянии равновесия

### 4.2.1. Контакт двух полупроводников.

Рис.4.2. Образование  $p$ – $n$ –перехода



#### 4.2.2. Факторы динамического равновесия

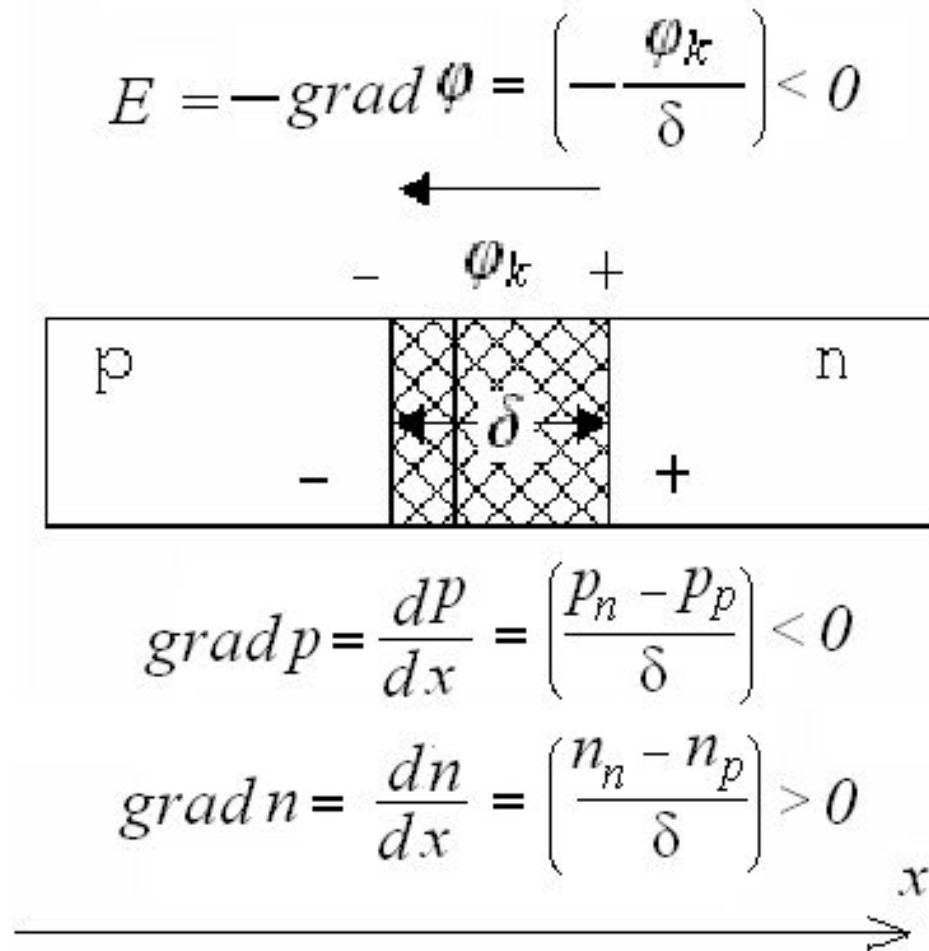


Рис.4.3

### 4.2.3. Равновесное состояние перехода

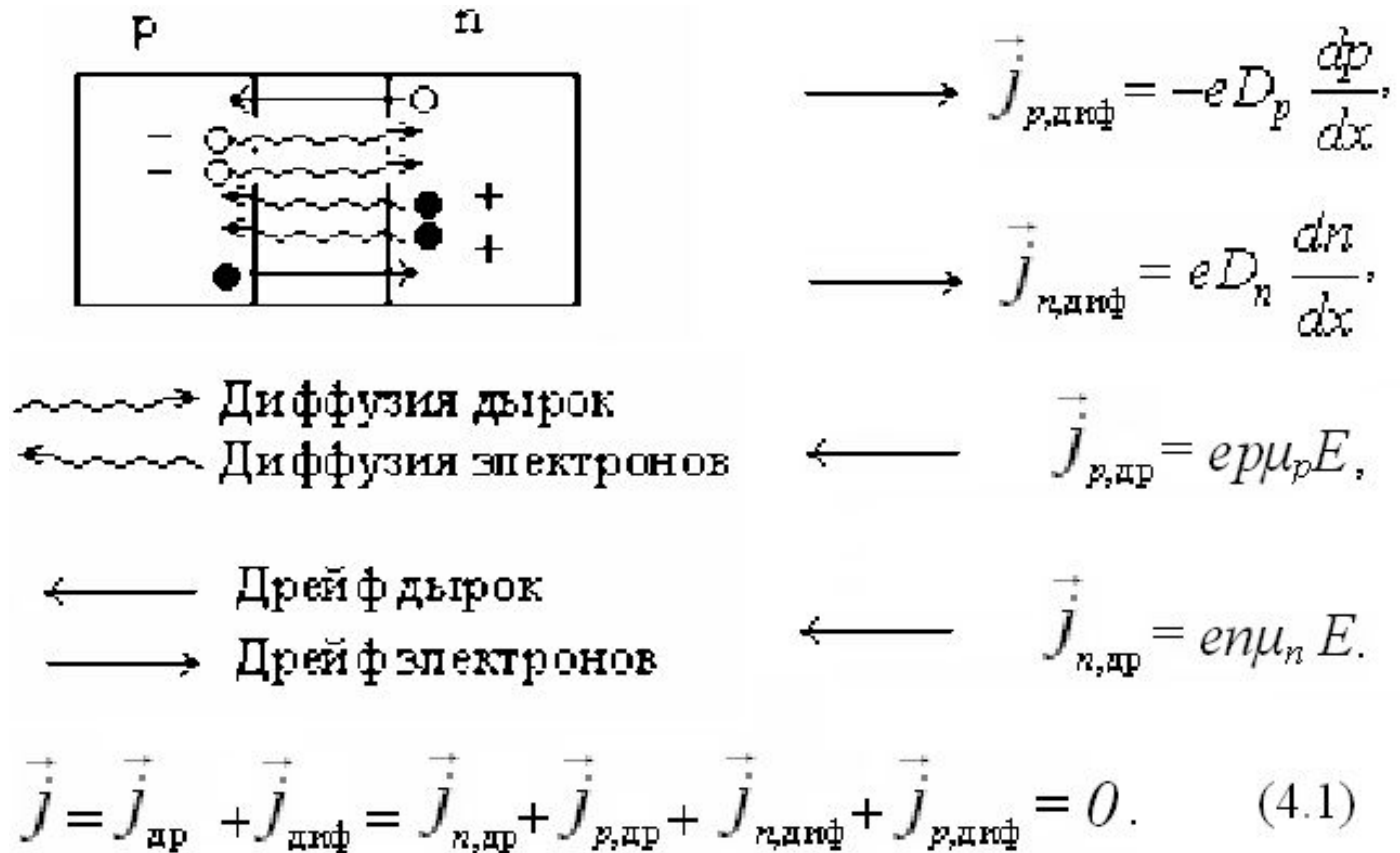


Рис. 4.4



#### 4.2.4. Распределение зарядов в $p$ - $n$ -переходе

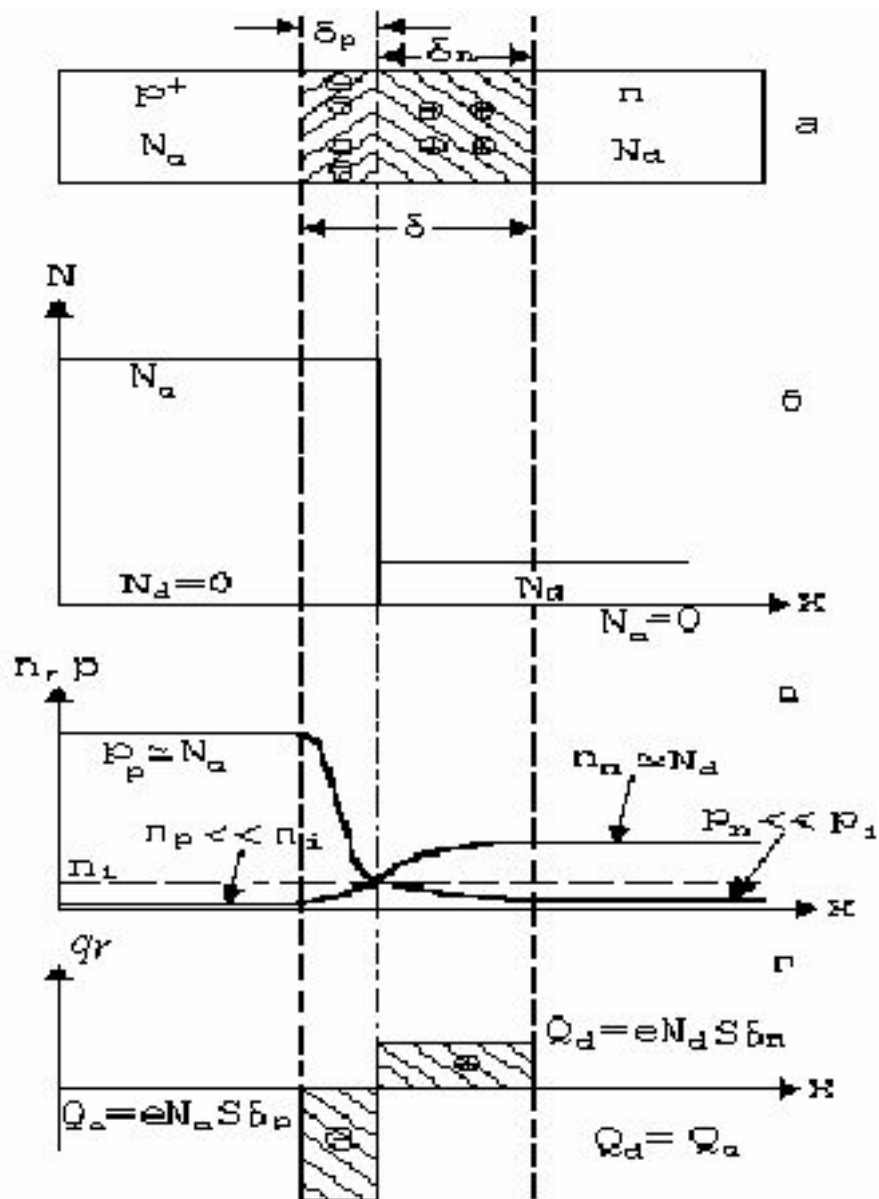


Рис.4.5

## Формулы к рис.4.5

$$p(x) = \begin{cases} p_p \exp\left[\frac{\varphi_p(-\delta_p) - \varphi_p(x)}{\varphi_T}\right] & \text{їđè } -\delta_p \leq x \leq 0, \\ p_p & \text{їđè } x \leq -\delta_p, \\ p_p \exp\left[\frac{\varphi_p(-\delta_p) - \varphi_n(x)}{\varphi_T}\right] & \text{їđè } 0 \leq x \leq \delta_n, \\ p_n & \text{їđè } x \geq \delta_n. \end{cases} \quad (4.2)$$

$$n(x) = \begin{cases} n_n \exp\left[\frac{\varphi_n(x) - \varphi_n(\delta_n)}{\varphi_T}\right] & \text{їđè } 0 \leq x \leq \delta_n, \\ n_n & \text{їđè } x \geq \delta_n, \\ n_n \exp\left[\frac{\varphi_p(x) - \varphi_n(\delta_n)}{\varphi_T}\right] & \text{їđè } -\delta_p \leq x \leq 0, \\ n_p & \text{їđè } x \leq -\delta_p. \end{cases} \quad (4.3)$$

### 4.2.5. Распределение поля и потенциала в $p$ - $n$ -переходе

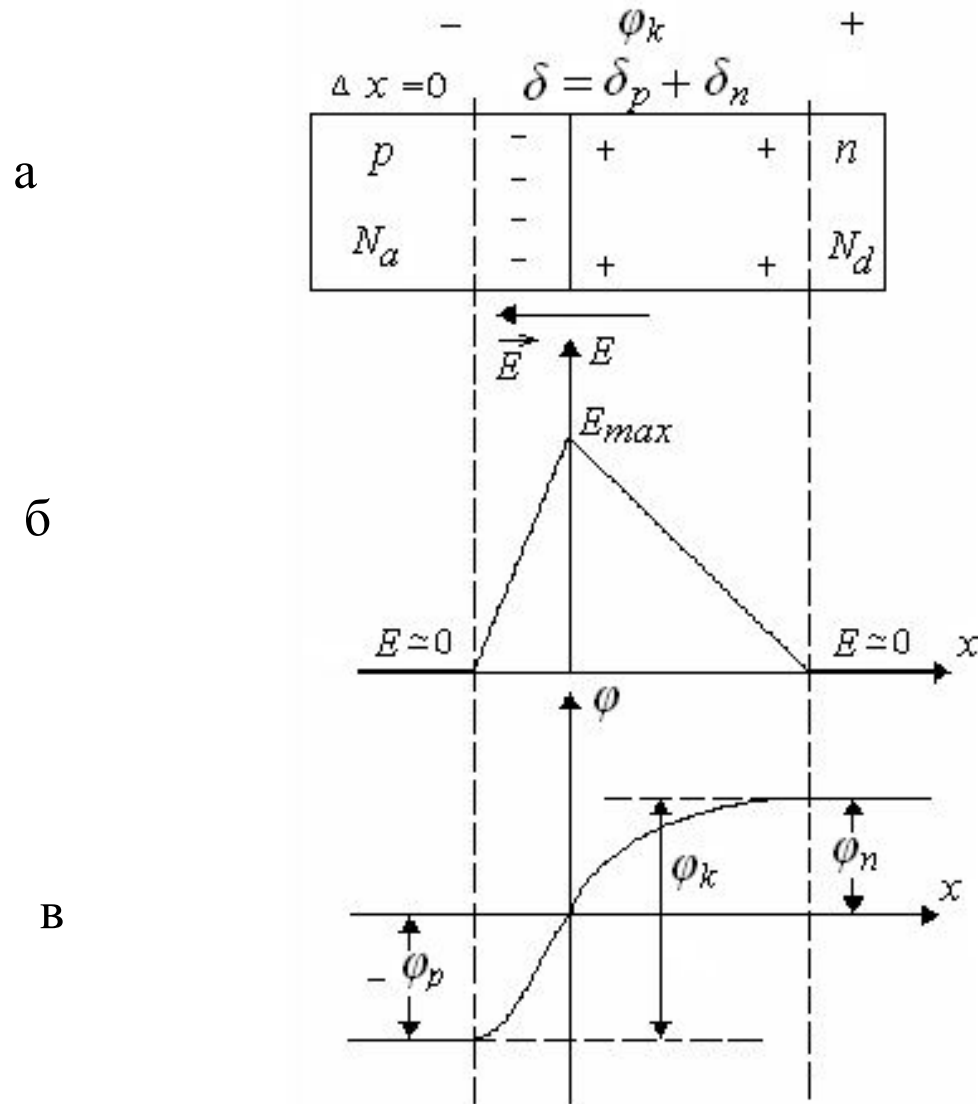


Рис.4.6

Формулы к рис.4.6

$$E(x) = \begin{cases} E_n(x) = \frac{eN_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} (\delta_n - x) & \text{при } 0 \leq x \leq \delta_n, \\ 0 & \text{при } x \geq \delta_n, \\ E_p(x) = \frac{eN_a}{\varepsilon_0 \varepsilon} (\delta_p + x) & \text{при } -\delta_p \leq x \leq 0, \\ 0 & \text{при } x \leq -\delta_p. \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\varphi(x) = \begin{cases} \varphi_n(x) = \frac{eN_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} \left( \delta_n - \frac{x}{2} \right) x & \text{при } 0 \leq x \leq \delta_n, \\ \varphi_n(\delta_n) & \text{при } x \geq \delta_n, \\ \varphi_p(x) = \frac{eN_a}{\varepsilon_0 \varepsilon} \left( \delta_p + \frac{x}{2} \right) x & \text{при } -\delta_p \leq x \leq 0, \\ \varphi_p(-\delta_p) & \text{при } x \leq -\delta_p. \end{cases} \quad (4.5)$$

### 4.2.6. Энергетическая диаграмма $p$ - $n$ -перехода в равновесном состоянии

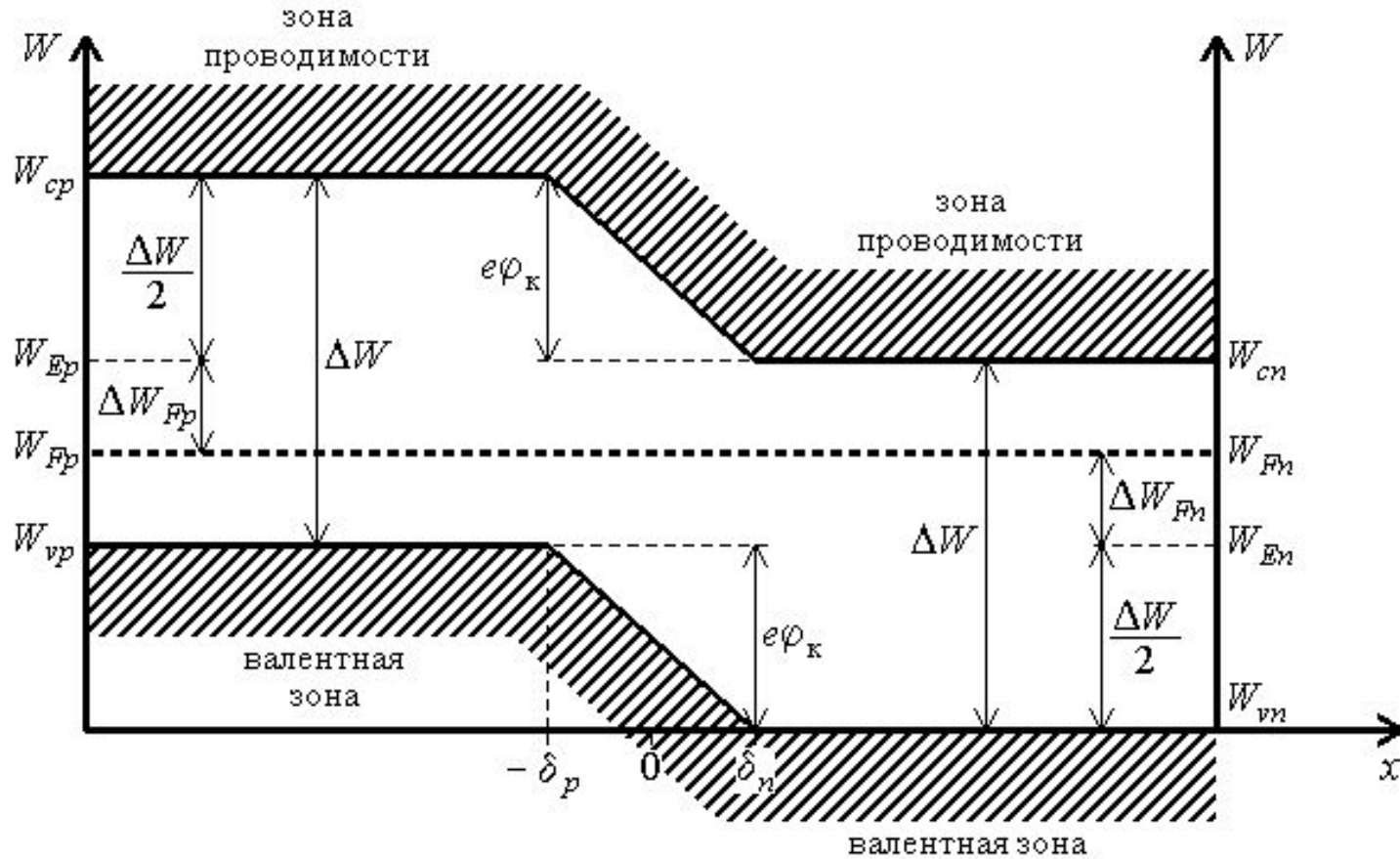


Рис.4.7

## Формулы для равновесного $p$ - $n$ -перехода

$$\delta = \delta_p + \delta_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{e} \frac{N_a + N_d}{N_a N_d}} \varphi_K, \quad (4.2)$$

$$N_a \delta_p = N_d \delta_n, \quad (4.3)$$

$$\delta_p = \frac{N_d}{N_a + N_d} \delta, \quad \delta_n = \frac{N_a}{N_a + N_d} \delta. \quad (4.4)$$

$$\varphi_K = \frac{e}{2\varepsilon_0\varepsilon} \left( N_a \delta_p^2 + N_d \delta_n^2 \right), \quad (4.5)$$

$$\varphi_K = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e} \ln \frac{P_p}{P_n}. \quad (4.6)$$

$$\Delta W_{Fp} = W_{Ep} - W_{Fp} = kT \ln \frac{P_p}{n_i}, \quad (4.7)$$

$$\Delta W_{Fn} = W_{Fn} - W_{En} = kT \ln \frac{n_n}{n_i}, \quad (4.8)$$

$$W_{vp} - W_{vn} = W_{cp} - W_{cn} = e\varphi_K. \quad (4.9)$$

$$E_{max} = \frac{e}{\varepsilon_0\varepsilon} N_a \delta_p = \frac{e}{\varepsilon_0\varepsilon} N_d \delta_n. \quad (4.10)$$

### 4.2.7. Энергетическая диаграмма $p$ - $n$ -перехода при $U > 0$

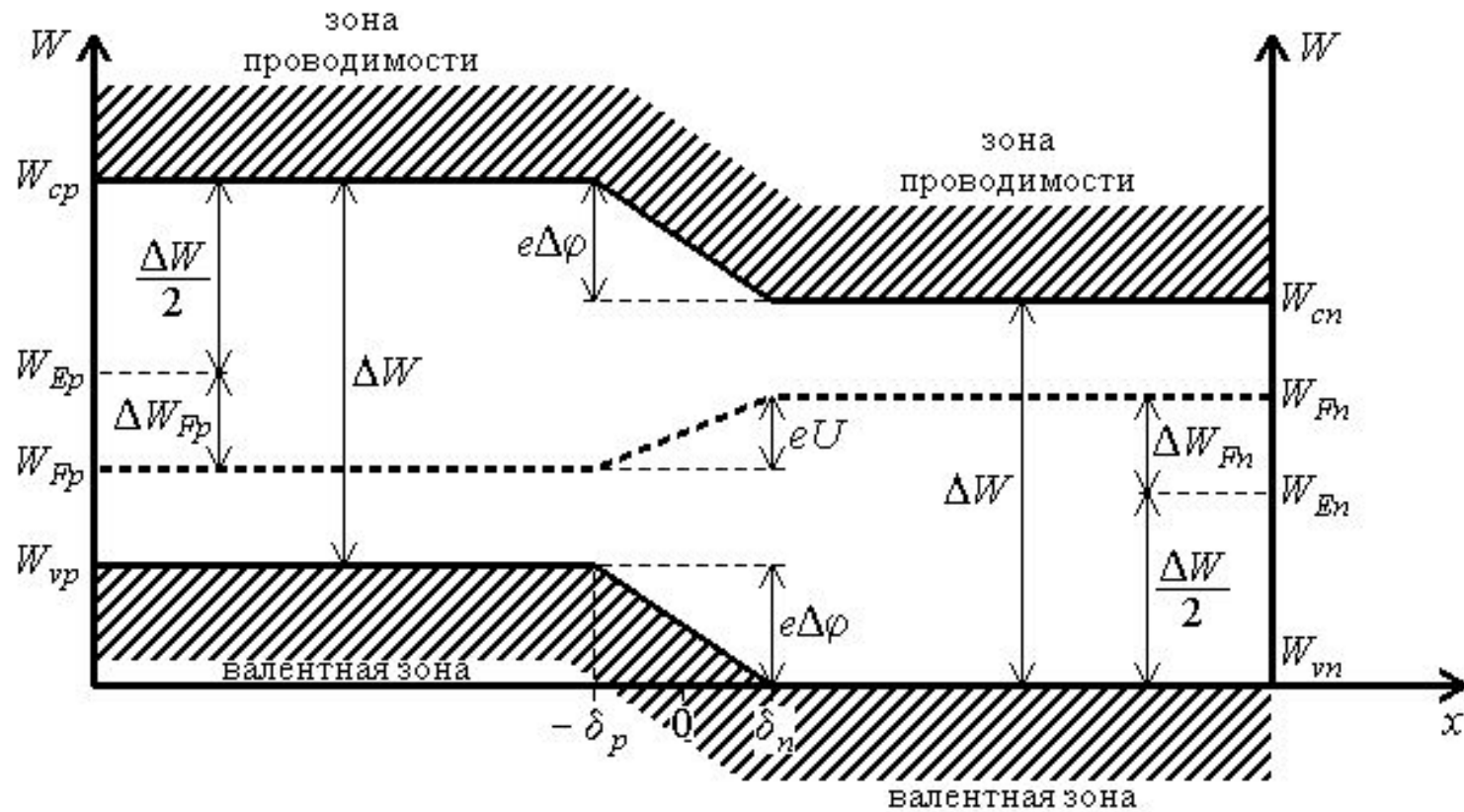


Рис.4.8

### 4.2.8. Энергетическая диаграмма $p$ - $n$ -перехода при $U < 0$

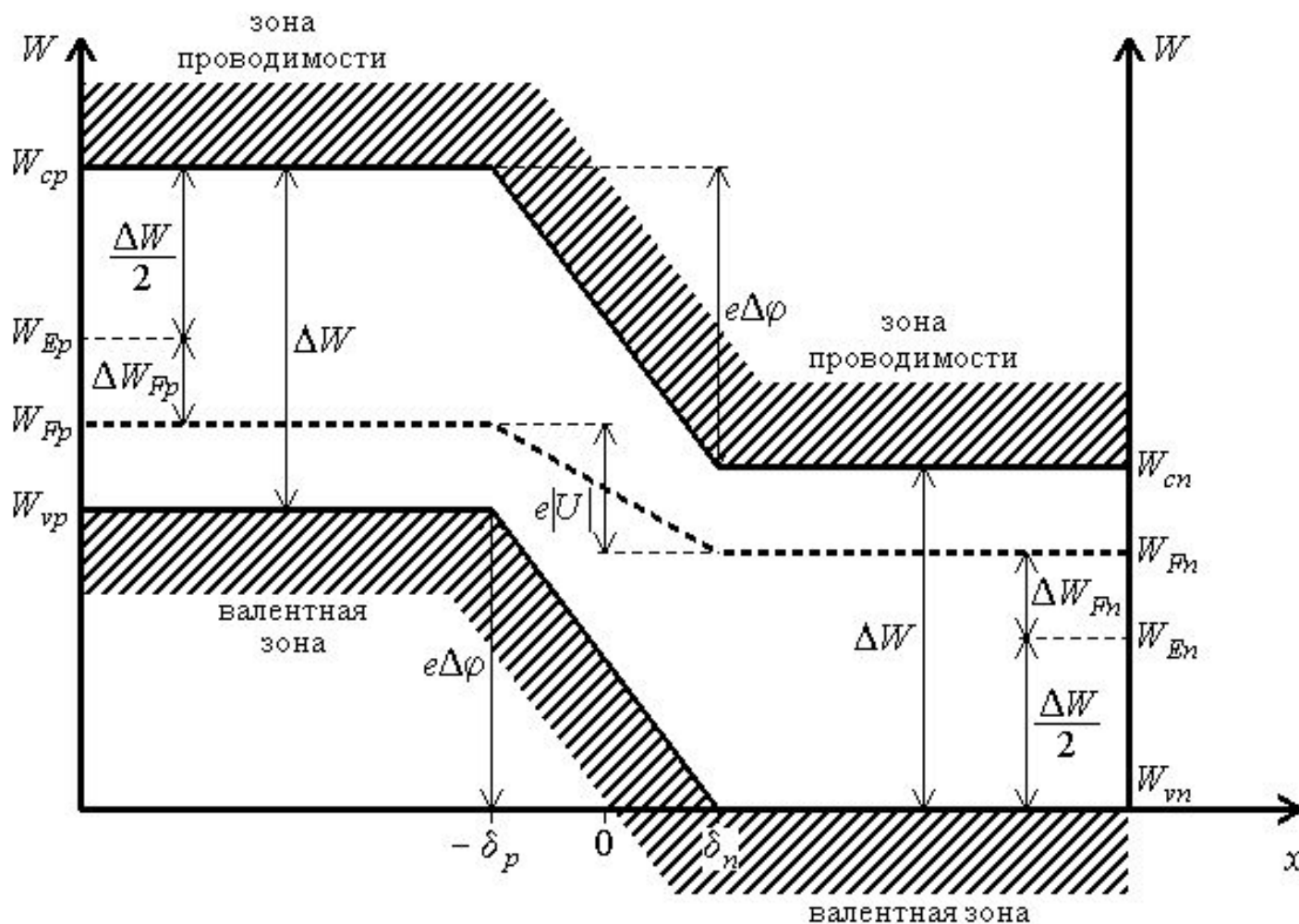


Рис.4.9



## Формулы для неравновесного состояния перехода

$$\delta(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{e} \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \Delta\varphi(U)}; \quad (4.11)$$

$$E(U) = \sqrt{\frac{2e}{\varepsilon_0\varepsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \Delta\varphi(U)}; \quad (4.12)$$

$$\Delta\varphi(U) = \varphi_k - U; \quad (4.13)$$

$$E(0) = E_0 = \sqrt{\frac{2e}{\varepsilon_0\varepsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \varphi_k}. \quad (4.14)$$

### 4.3. Прямое и обратное включение $p-n$ -перехода

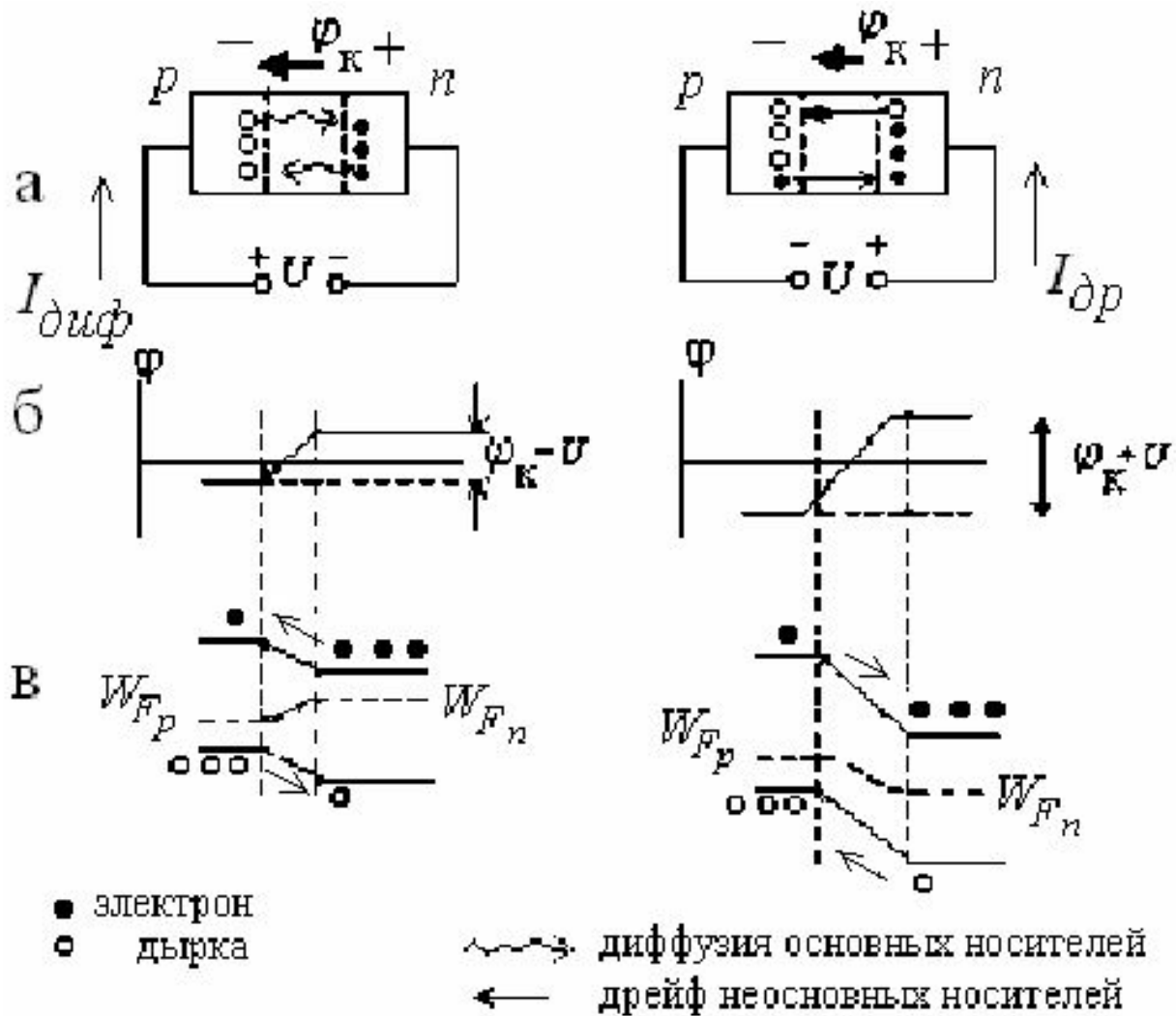


Рис.4.10

## 4.4. Инжекция и экстракция. Вольт–амперная характеристика $p-n$ -перехода

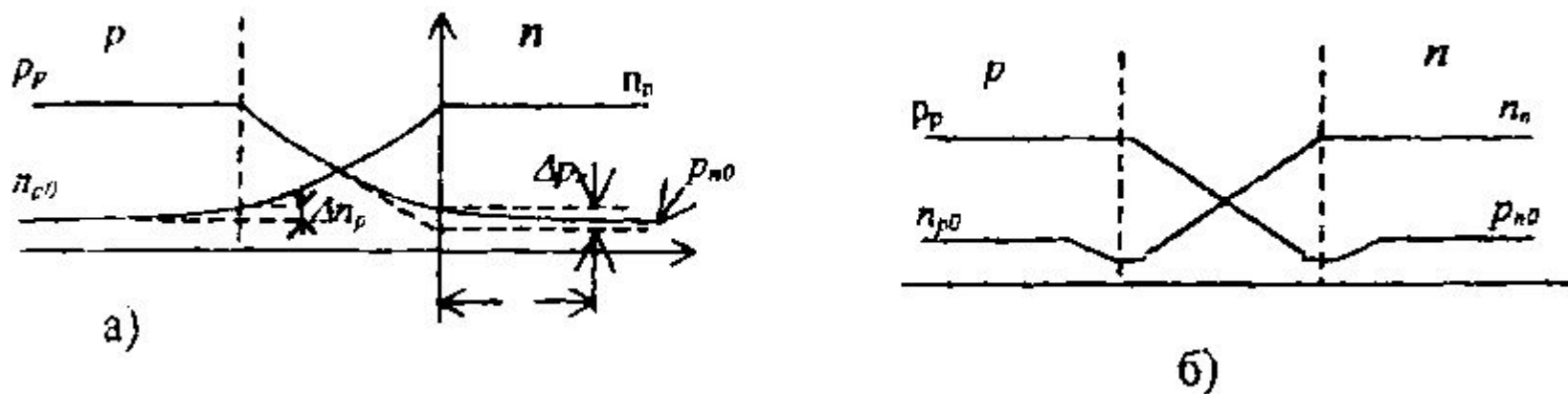


Рис. 4.11.

$$\Delta p_n = p_n - p_{n0}, \quad \Delta n_p = n_p - n_{p0} \quad (4.15)$$

## Аналитическое представление ВАХ

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (4.16)$$

$$I_0 = eS \left( \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right), \quad (4.17)$$

$$I_0 = eS \left( \frac{D_p}{w_p} p_{n0} + \frac{D_n}{w_n} n_{p0} \right). \quad (4.18)$$

# Вольтамперная характеристика $p-n$ -перехода

93

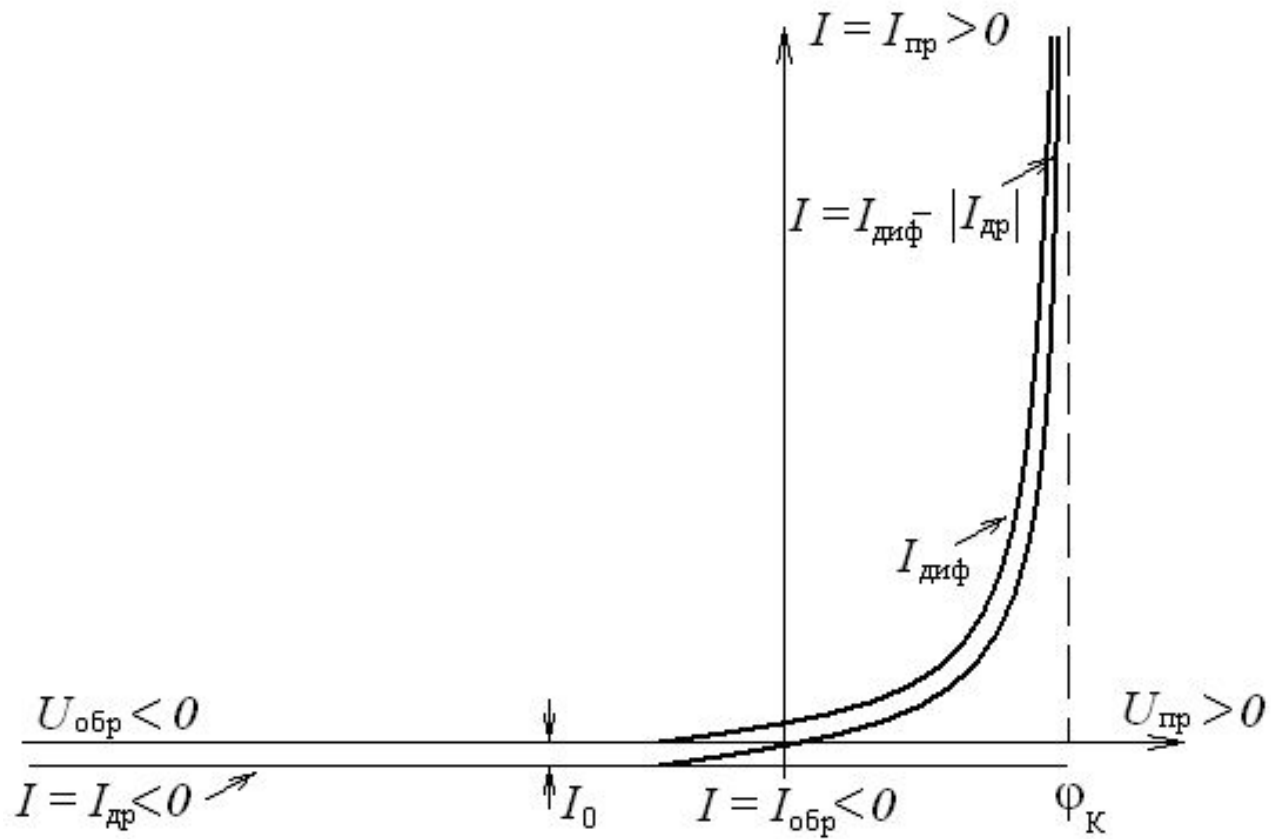


Рис.4.12

#### 4.5. Барьерная и диффузионная ёмкости $p$ – $n$ –перехода

$$C = C_{\text{б}} + C_{\text{д}}. \quad (4.19)$$

$$C_{\text{б}} = S \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon \ell}{2} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \frac{1}{\varphi_{\text{к}} - U}}. \quad (4.20)$$

$$C_{\text{д}} = \frac{e^2 S}{kT} (L_p p_n + L_n n_p) \exp\left(\frac{eU}{kT}\right). \quad (4.21)$$

Нормированные функции  $\delta$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $C$  и  $E$

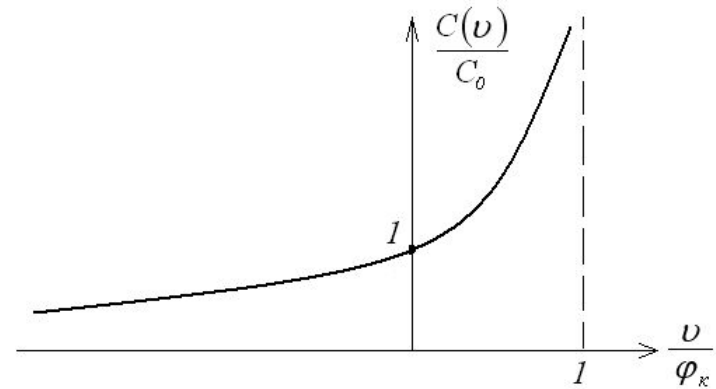
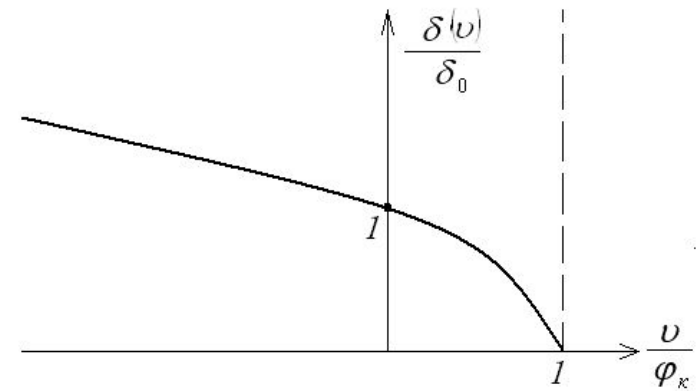
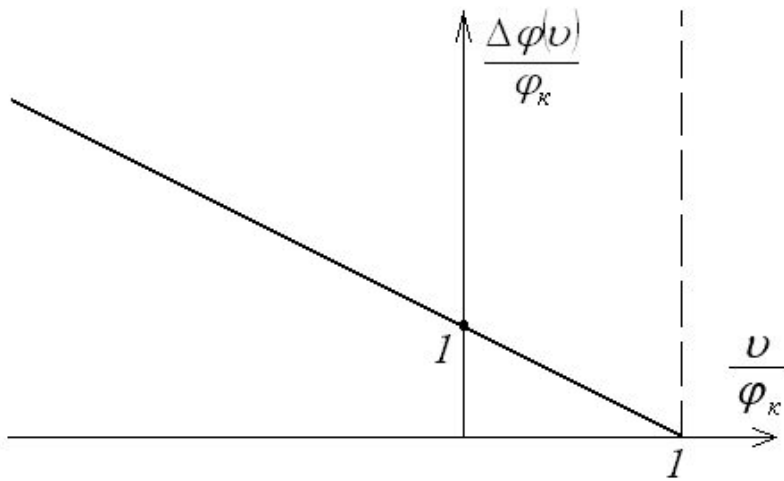
$$\frac{\delta}{\delta_0} = \left(1 - \frac{U}{\varphi_x}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.22)$$

$$\frac{\Delta\varphi(U)}{\varphi_x} = 1 - \frac{U}{\varphi_x}, \quad (4.23)$$

$$\frac{C}{C_0} = \left(1 - \frac{U}{\varphi_x}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.24)$$

$$\frac{E}{E_0} = \left(1 - \frac{U}{\varphi_x}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.25)$$

# Графики нормированных функций





## 4.5. Барьерная и диффузионная ёмкости $p$ – $n$ –перехода

$$C_{\delta} = \frac{dQ}{dU} \quad (4.19)$$

$$\frac{dQ}{dI} = \tau \quad (4.23)$$

$$C_{\delta} = \frac{dQ}{dI} \frac{dI}{dU} \quad (4.20)$$

$$C_{\delta} = \frac{eI_0\tau}{kT} \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \quad (4.24)$$

$$\frac{dI}{dU} = \frac{eI_0}{kT} \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \quad (4.22)$$

$$C_{\delta} = S \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon e}{2} \frac{N_a N_{\delta}}{N_a + N_{\delta}} \frac{1}{\varphi_K - U}} \quad (4.25)$$

$$r_{\delta} = \frac{dU}{dI} = \frac{kT}{eI_0} \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right) \quad (4.26)$$

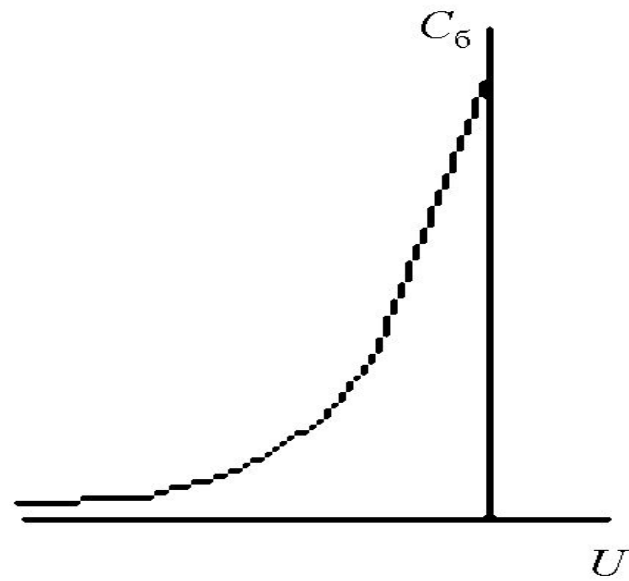


Рис. 4.6.

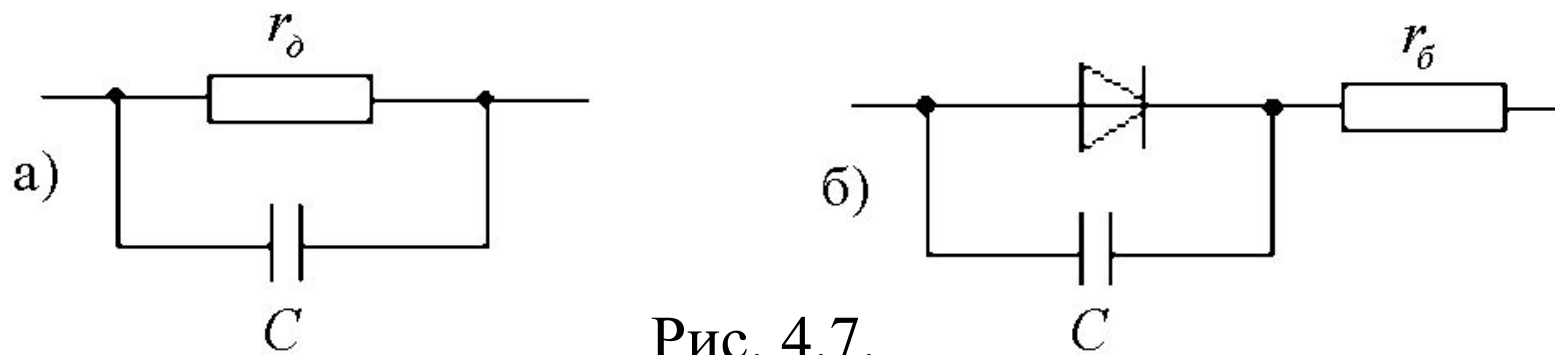


Рис. 4.7.

## 4.6. Инерционные свойства $p-n$ -перехода

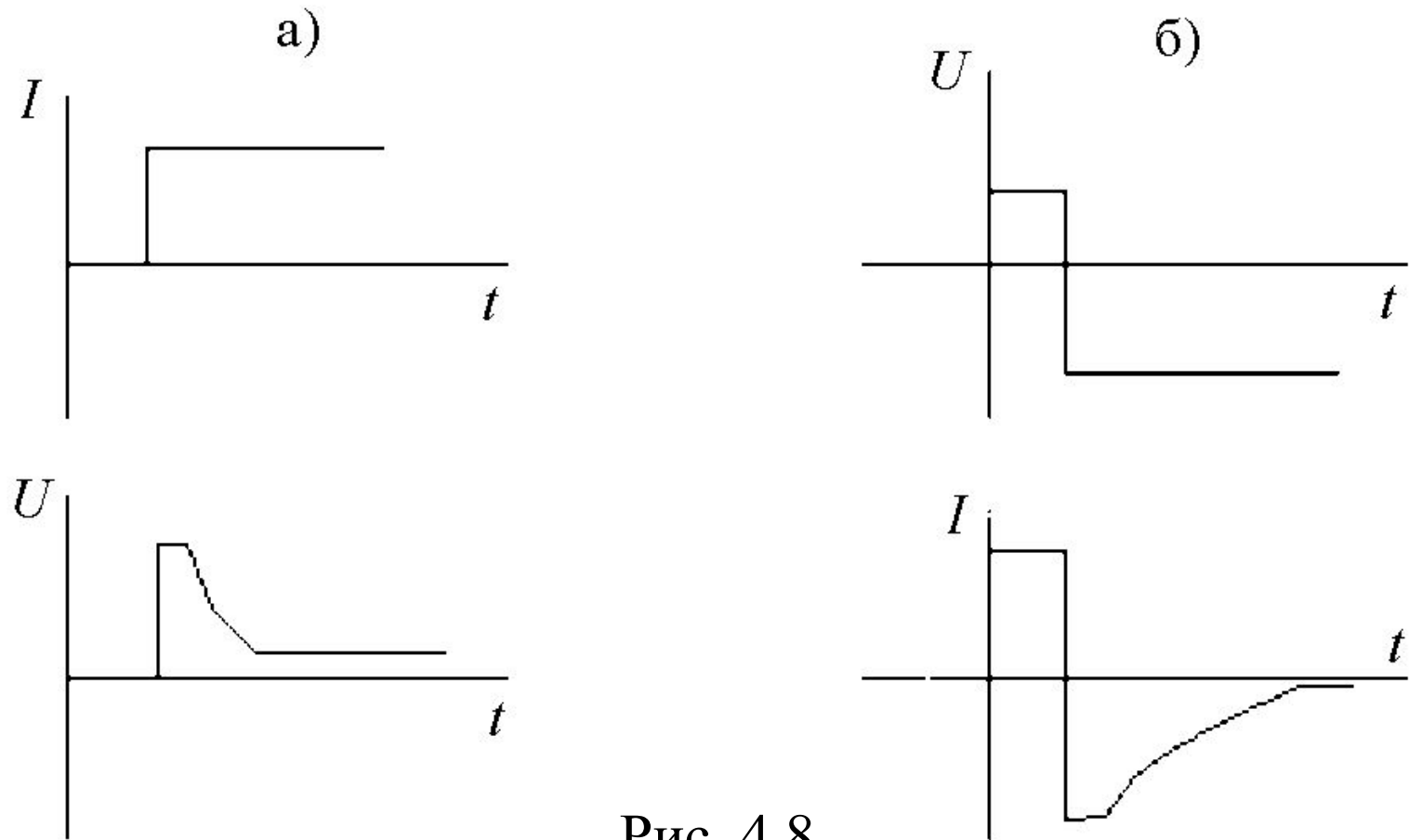


Рис. 4.8.

## 4.6. Основные выводы по разделу 4

- В  $p$ – $n$ –переходе образуются обеднённый слой, внутреннее электрическое поле и потенциальный барьер.
- При прямом включении  $p$ – $n$ –переход обладает малым сопротивлением, а при обратном включении – большим сопротивлением.
- Вольт–амперная характеристика  $p$ – $n$ –перехода нелинейна.
- Электронно–дырочный переход обладает барьерной и диффузионной ёмкостями. Барьерная ёмкость обусловлена зарядами примесных ионов, сосредоточенными в обеднённом слое. Диффузионная ёмкость обусловлена неравновесными свободными носителями заряда, сконцентрированными вне обеднённого слоя.

## 5. Физические явления, вызывающие отклонения от идеализированной модели $p-n$ -перехода

### 5.1. Тепловой пробой

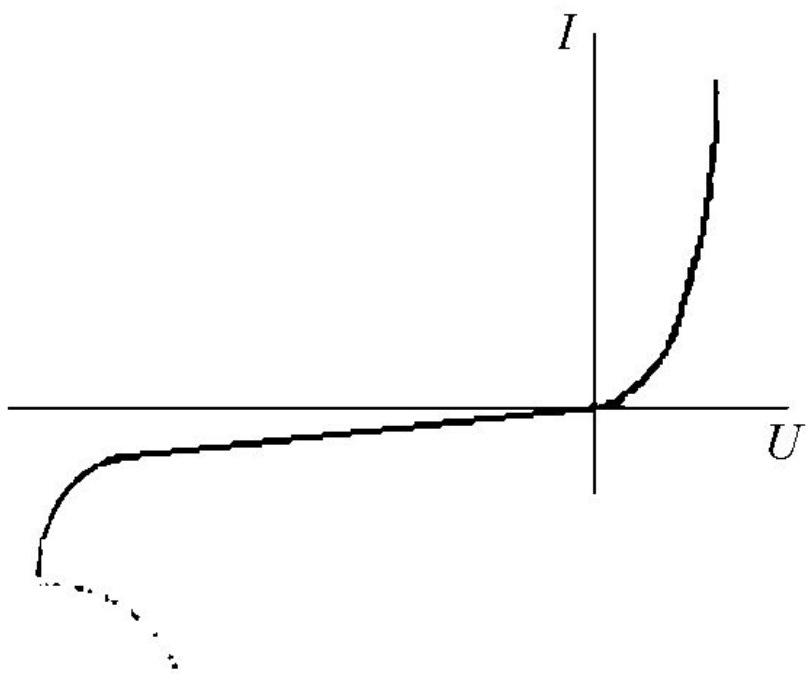


Рис. 5.1.

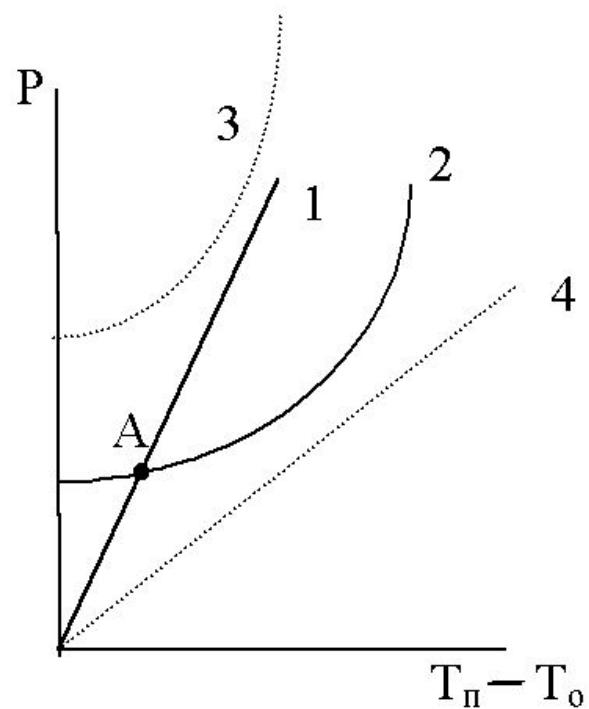


Рис. 5.2.

$$P_{\text{под}} = U_{\text{обp}} I_{\text{обp}} \exp\left(\frac{\Delta W(T_{\text{п}} - T_{\text{o}})}{kT_{\text{п}}T_{\text{o}}}\right) \quad (5.1)$$

$$P_{\text{отв}} = \frac{(T_{\text{п}} - T_{\text{o}})}{R_T} \quad (5.2)$$

$$R_T = \frac{d}{\lambda S} \quad (5.3)$$

$$U_{\text{обp,max}} = \frac{(T_{\text{п,max}} - T_{\text{o}})}{R_T I_{\text{обp}}} \quad (5.4)$$

## 5.2. Электрический (лавиновый) пробой

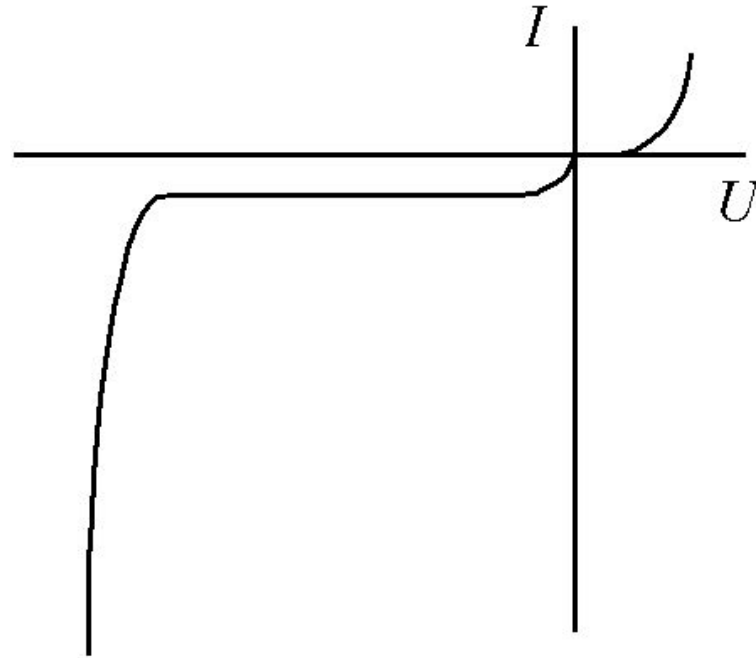


Рис. 5.3)

$$M = \frac{1}{1 - (U / U_{\text{проб}})^m} \quad (5.5)$$

### 5.3. Туннельный эффект

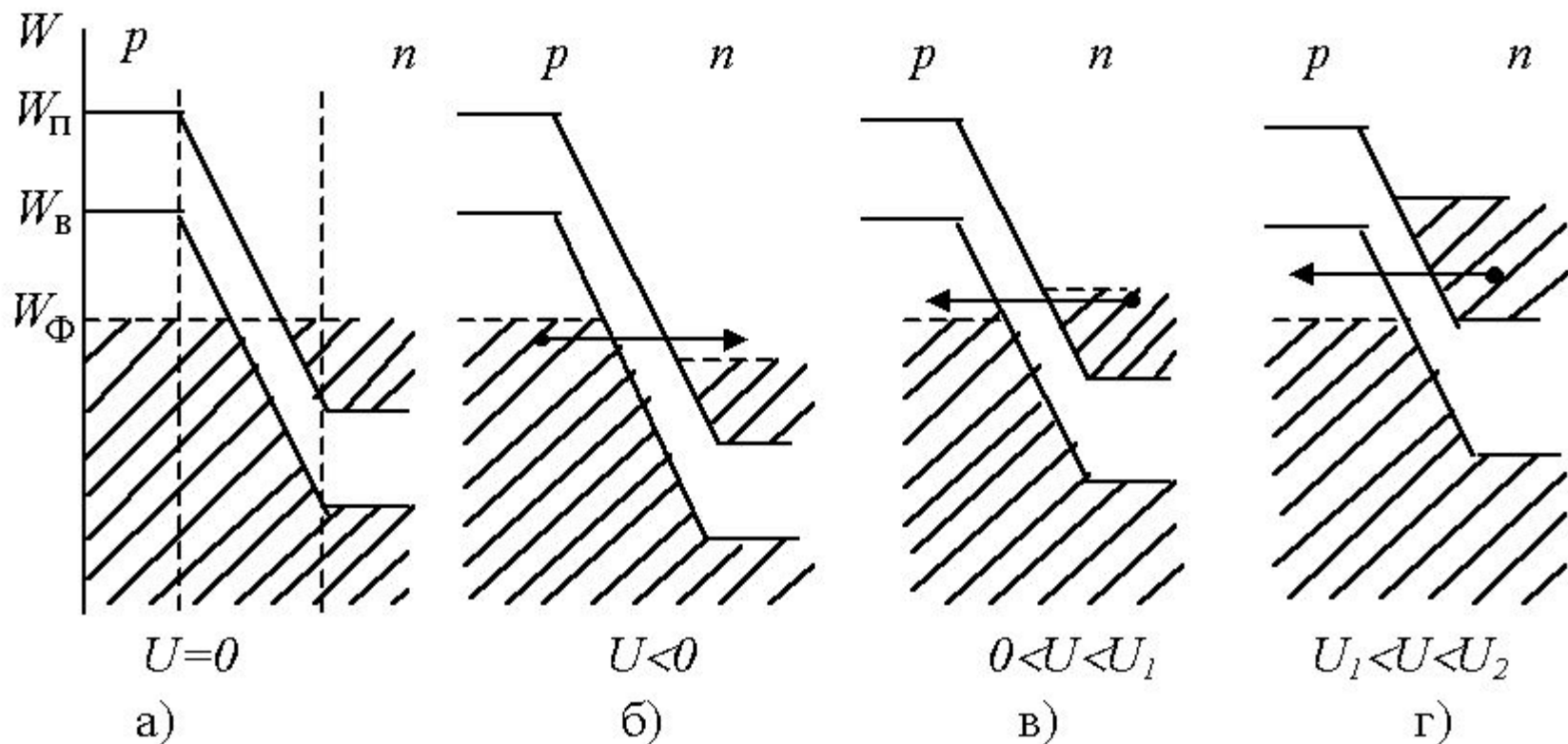


Рис. 5.4.



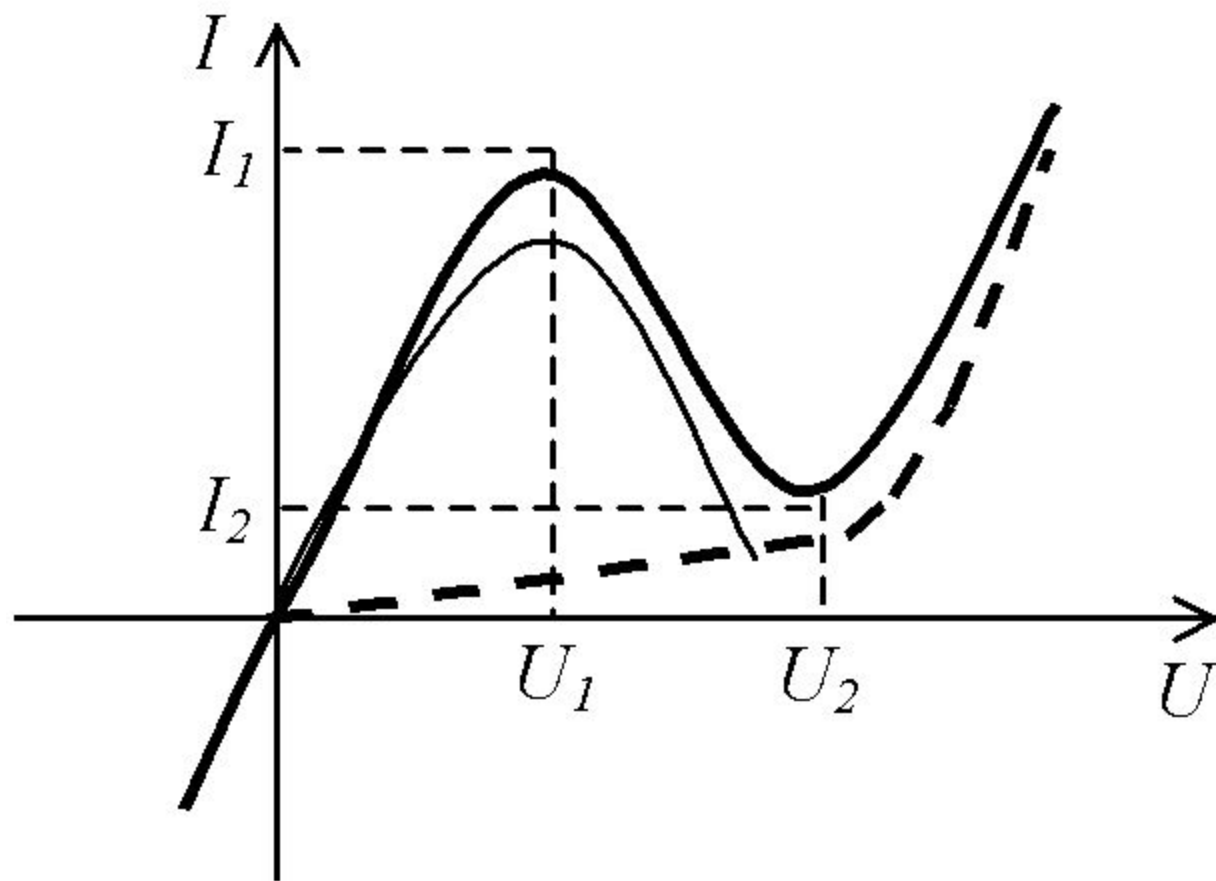


Рис. 5.5.

## 5.4. Основные выводы по разделу 5

- Тепловой пробой  $p$ – $n$ –перехода обусловлен увеличением концентраций свободных носителей заряда, сопровождающимся увеличением температуры полупроводника.
- Лавинный пробой  $p$ – $n$ –перехода обусловлен увеличением концентраций свободных носителей заряда, происходящим в результате ударной ионизации атомов полупроводника.
- Туннельный пробой  $p$ – $n$ –перехода обусловлен проникновением электронов сквозь потенциальный барьер, что возможно при больших значениях концентраций примесей в  $p$ – и  $n$ –области, а также при большом по модулю обратном напряжении, приложенном к переходу.

## 6. Гетеропереходы

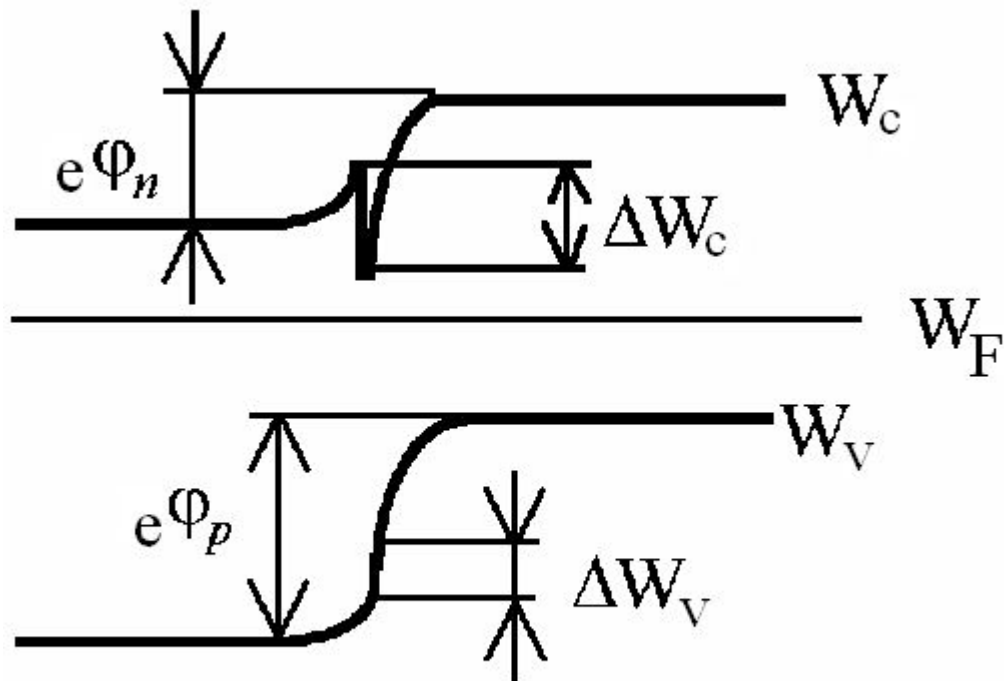


Рис. 6.1.

$$\Delta W_{\text{II}} + \Delta W_{\text{B}} = \Delta W_1 - \Delta W_2 \quad (6.1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_n\varepsilon_p(N_a + N_d)^2\varphi_0}{qN_aN_d(\varepsilon_nN_d + \varepsilon_pN_a)}} \quad (6.2)$$

$$\varphi_0 = \frac{W_{\Phi 1} - W_{\Phi 2}}{q} \quad (6.3)$$

## **Основной вывод по разделу 6**

- Переходы между полупроводниками с различной шириной запрещённой зоны обладают свойством односторонней проводимости.

## 7. Фотоэлектрические явления

### 7.1. Воздействие оптического излучения на полупроводник

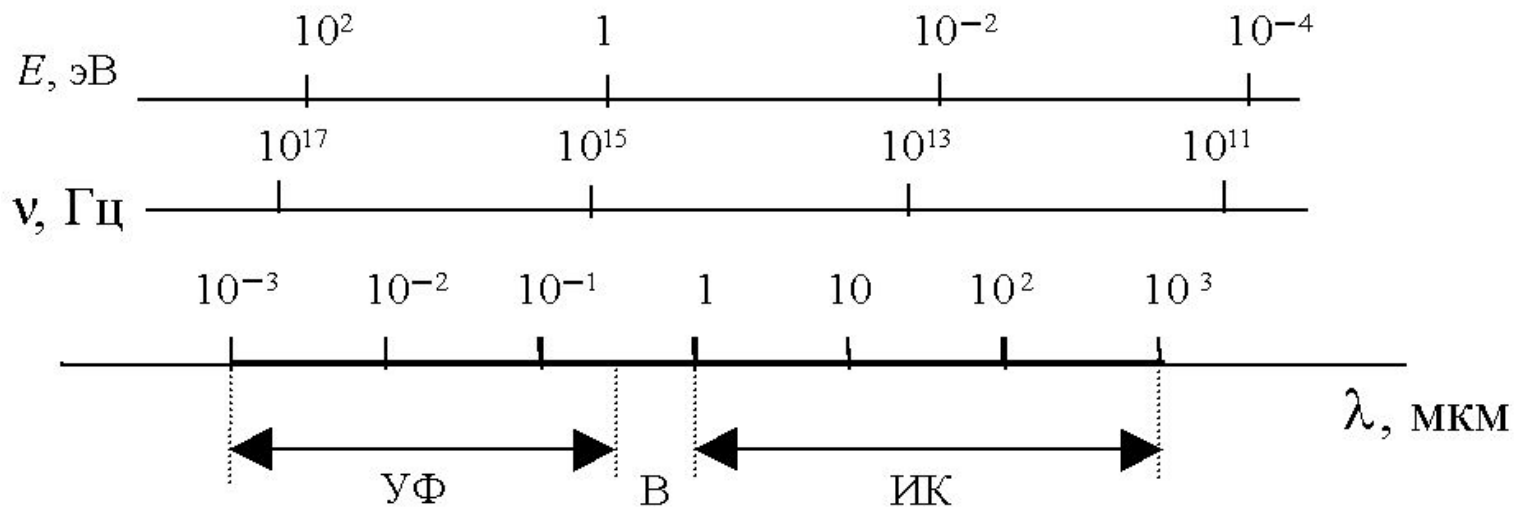


Рис. 7.1.

$$E_{\phi} = h\nu = \frac{ch}{\lambda} \quad (7.1)$$

## 7.2. Фотопроводимость

$$\Phi(x) = \Phi(0) \exp(-\alpha_{\phi} x) \quad (7.2)$$

$$\frac{dN}{dx} = -(1 - R_{\phi}) N_0 \exp(-\alpha_{\phi} x) \quad (7.3)$$

$$\sigma_{\phi} = q(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p) \quad (7.4)$$

$$K_{\Sigma} = \frac{I_{\phi}}{\Phi} \quad (7.5)$$

$$K_{\Sigma, \text{уд}} = \frac{K_{\Sigma}}{U} \quad (7.6)$$

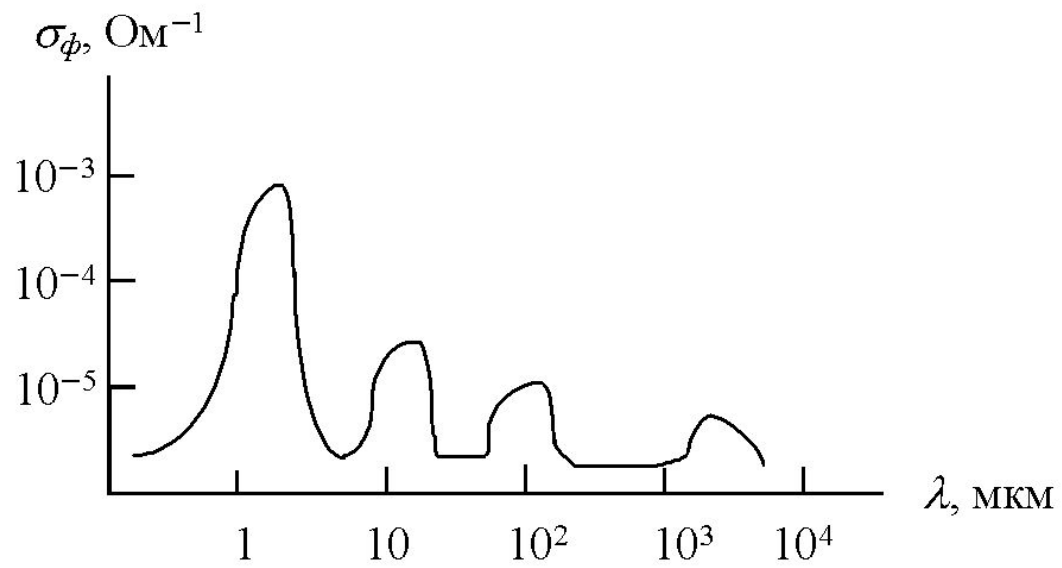


Рис. 7.2.

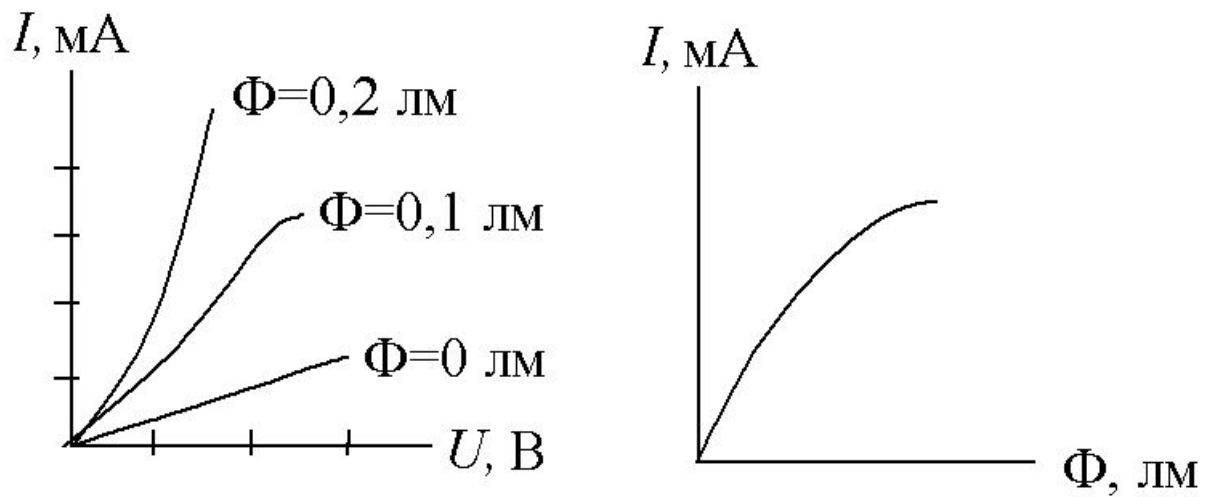


Рис. 7.3.



### 7.3. Фотогальванический эффект

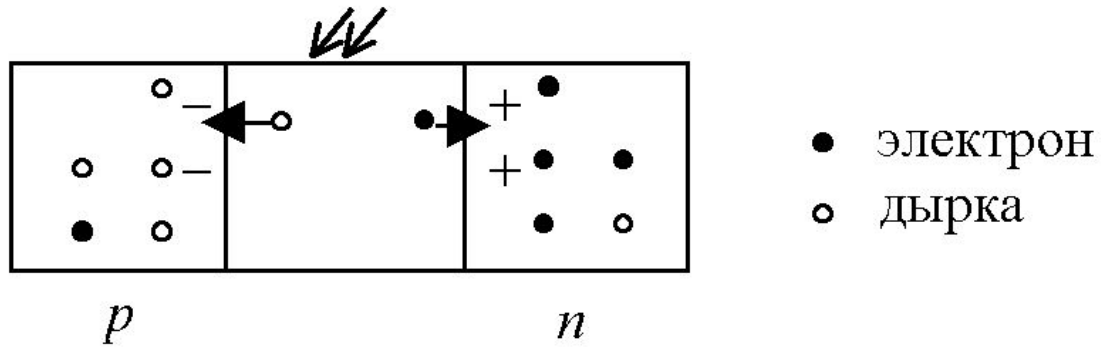


Рис. 7.7.

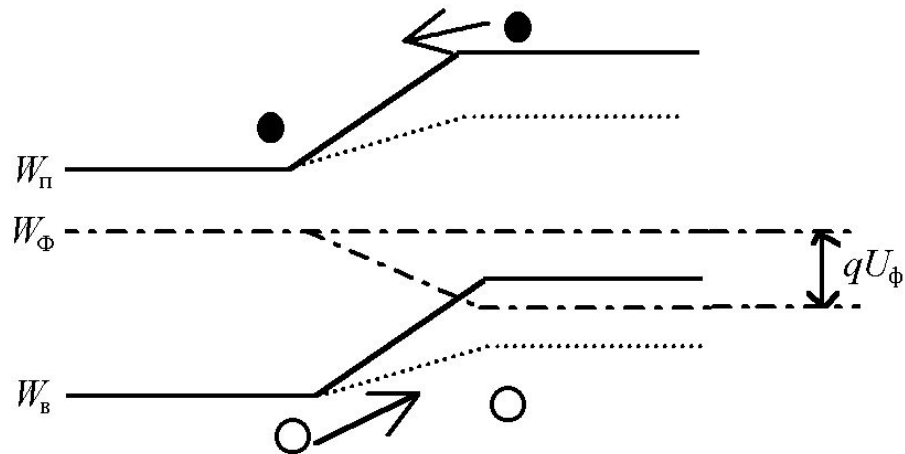


Рис. 7.8.

$$U_{\Phi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{\Phi}}{I_0} + 1\right) \quad (7.7)$$

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] - I_{\Phi} \quad (7.8)$$

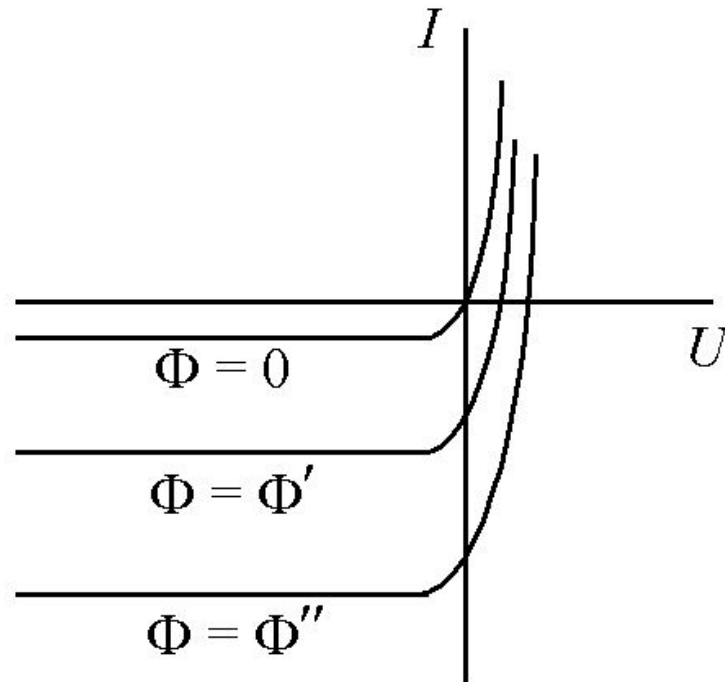


Рис. 7.9.

## 7.4. Основные выводы по разделу 7

- Под действием светового облучения может происходить увеличение проводимости полупроводника.
- При световом облучении р–п–перехода в нём возникает фото–ЭДС.

# 8. Термoeлектрические явления в полупроводниках

## 8.1. Эффект Зеебека

$$E = \alpha_T \Delta T \quad (8.1)$$

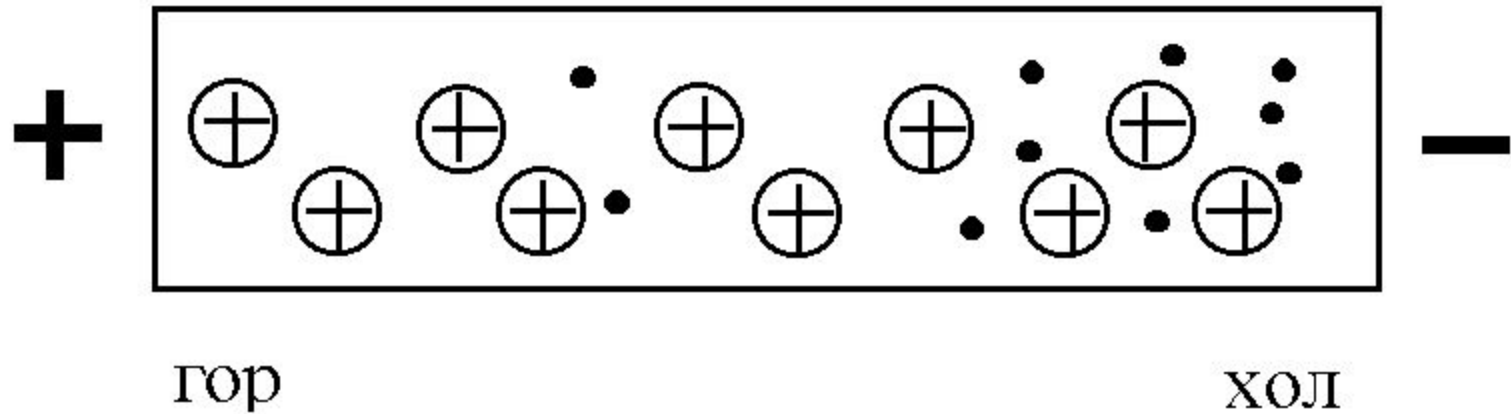
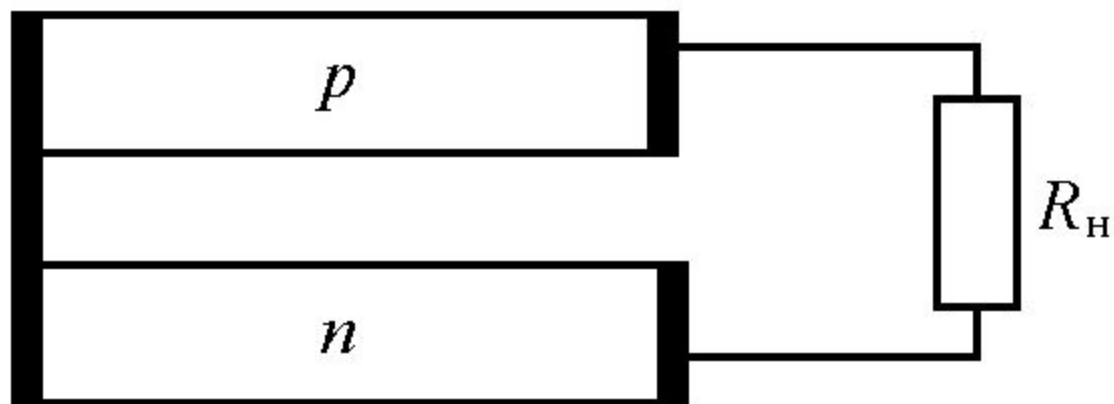


Рис. 8.1.



гор

ХОЛ

Рис. 8.2.

$$I = \frac{U}{R + R_{\text{H}}} = \frac{\alpha_T \Delta T}{R + R_{\text{H}}} \quad (8.2)$$

$$P = I^2 R_{\text{H}} = \frac{\alpha_T^2 \Delta T^2}{(R + R_{\text{H}})^2} R_{\text{H}} \quad (8.3)$$

## 8.2. Эффект Зеебека

$$Q_{\Pi} = \Pi It \quad (8.4)$$

$$\Pi = \alpha_T T \quad (8.5)$$

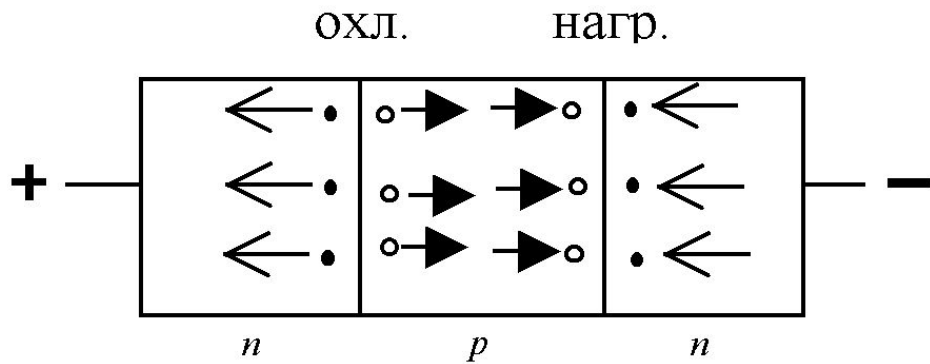


Рис. 8.3.

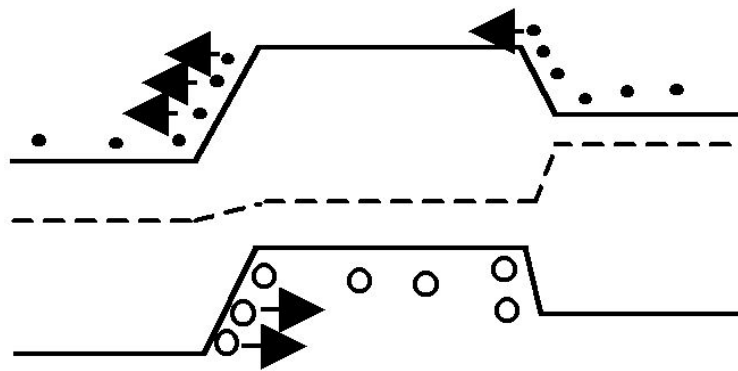
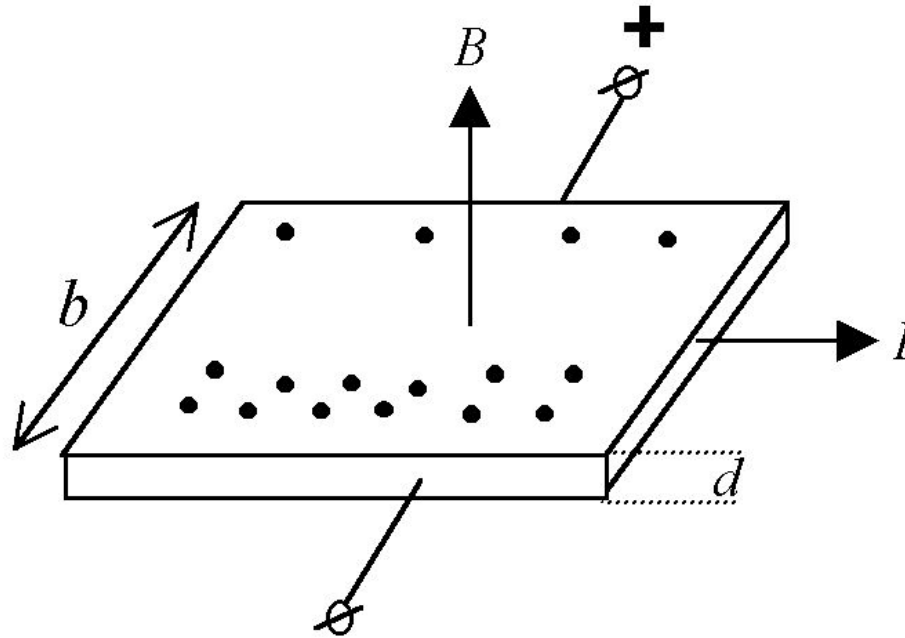


Рис. 8.4.

## 8.3. Основные выводы по разделу 8

- При различной температуре контактов в цепи с термоэлементом появляется ЭДС.
- При пропускании постоянного тока в спаях термоэлемента происходит поглощение и выделение тепла.

## 9. Гальваномагнитный эффект Холла



— Рис. 9.1.

$$-qE = qVB \quad (9.1)$$

$$E = -VB \quad (9.2)$$

$$I = jS = jbd \quad (9.3)$$

$$j = qnV = qn\mu E_0 \quad (9.4)$$



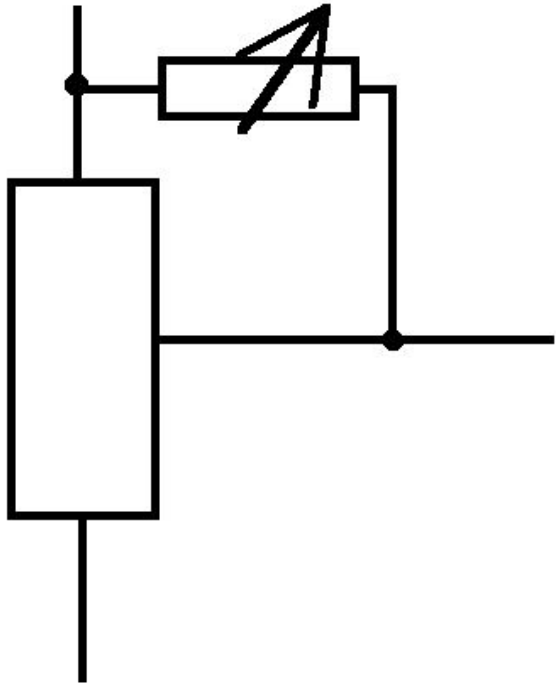


Рис. 9.2.

$$U_X = bE = -\frac{IB}{qnd} \quad (9.5)$$

$$U_X = R \frac{IB}{d} \quad (9.6)$$

$$R = -\frac{A}{qn} \quad (9.7)$$

$$R = \frac{A(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)}{q(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (9.8)$$

$$R = \frac{A(\mu_p - \mu_n)}{qn(\mu_p + \mu_n)} \quad (9.9)$$

## **Основной вывод по разделу 9**

- Под действием постоянного магнитного поля в полупроводнике возникает ЭДС.

# 10. Электронная эмиссия

## 10.1. Термоэлектронная эмиссия

$$W_{\text{ВЫХ}} = W_0 - W_{\Phi} \quad (10.1)$$

$$j_{\text{э}} = AT^2 \exp\left(-\frac{W_{\text{ВЫХ}}}{kT}\right) \quad (10.2)$$

$$H = \frac{I_{\text{э}}}{P_{\text{н}}} \quad (10.3)$$

Таблица 10.1

Тип катода	$W_0$ , эВ	$J_{\text{э}}$ , А/см <sup>2</sup>	$T^{\circ}$ С	$H$ , мА/Вт
однородный металлический	2÷5	<1	>2000	<15
активированный	<2	≤10	≈ 1600	20÷70
полупроводниковый	<2	<15	<1000	80÷200

## 10.2. Вторичная эмиссия

$$\sigma = \frac{n_2}{n_1} \quad (10.4)$$

## 10.3. Автоэлектронная эмиссия

## 10.4. Фотоэлектронная эмиссия

$$I_{\phi} = s\Phi \quad (10.5)$$

$$\frac{mV^2}{2} = h\nu - W_{\text{ВЫХ}} \quad (10.6)$$

## 10.5. Основные выводы по разделу 10

- В электровакуумных приборах используются 4 вида электронной эмиссии:
  - 1) термоэлектронная эмиссия, – эмиссия электронов из катода под действием тепловой энергии;
  - 2) вторичная электронная эмиссия, – эмиссия электронов, происходящая при бомбардировке поверхности катода потоками электронов или ионов;
  - 3) автоэлектронная эмиссия, – эмиссия электронов из катода под действием электрического поля;
  - 4) фотоэлектронная эмиссия, – эмиссия электронов из катода под действием светового облучения.

# 11. Электрический разряд в газе

## 11.1. Взаимодействие частиц в газовой среде

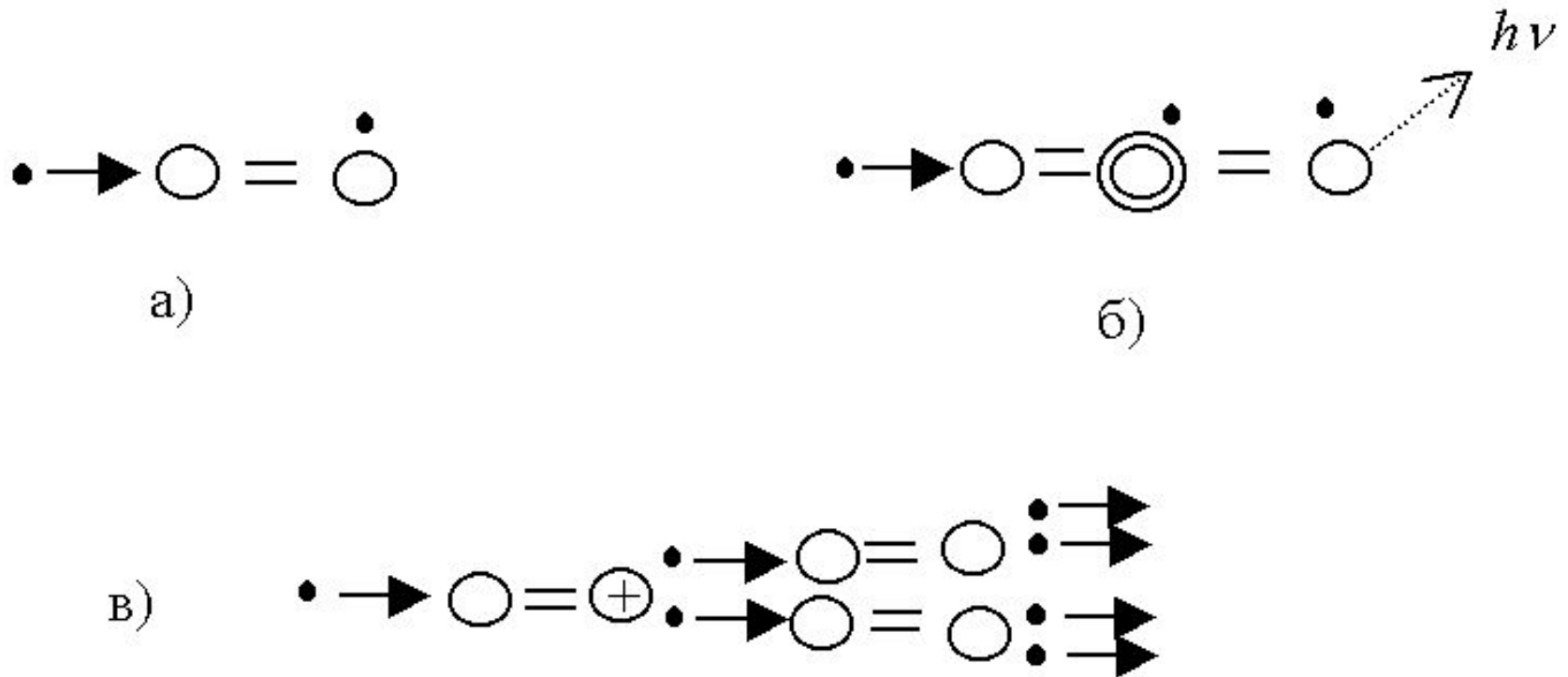


Рис. 11.1.



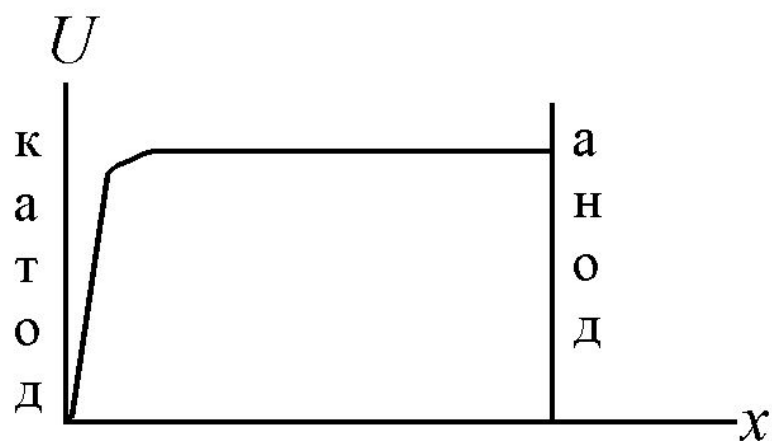


Рис. 11.2

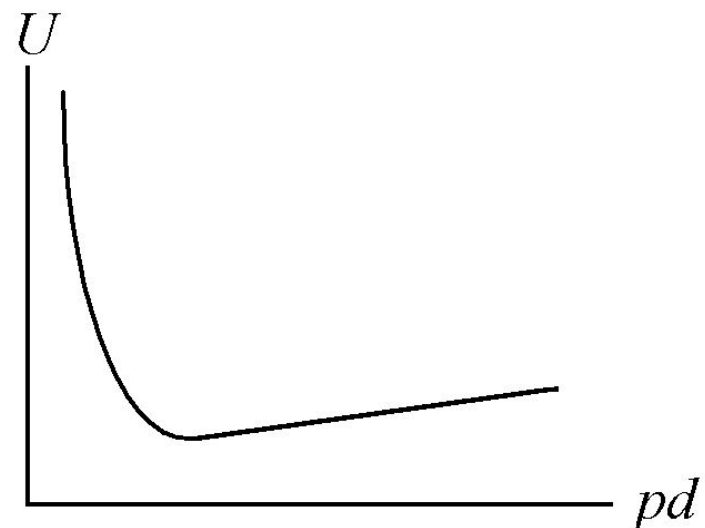


Рис. 11.3.

Таблица 11.1

катод	газ	$U_{з\ min}, В$	$Pd_{min}, Па \cdot м$
Fe	He	150	0,33
Fe	Ne	244	0,40
Fe	Ne+0,01%Ar	183	6,65
Ni	He	211	0,53

## 11.2. Виды электрических разрядов

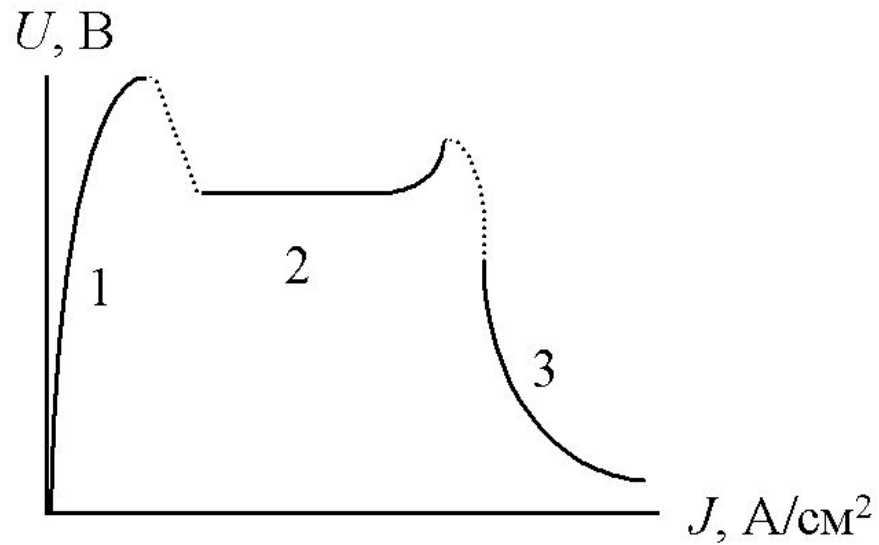


Рис. 11.4.

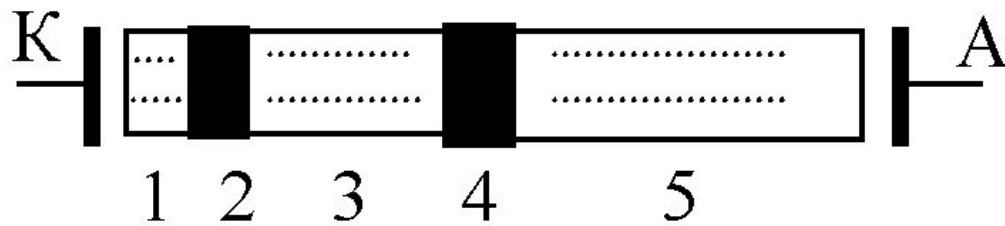


Рис. 11.5.

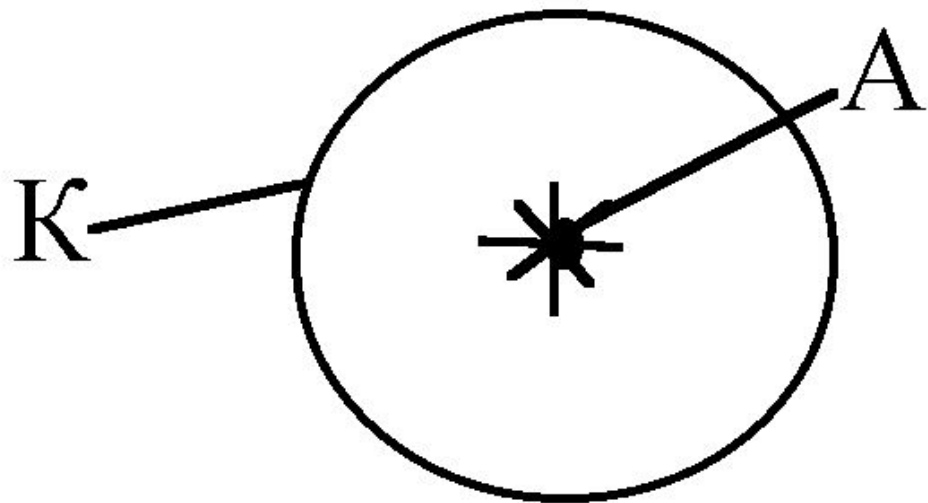


Рис. 11.6.

## 11.3. Основной вывод по разделу 11

- Различают 4 вида электрических разрядов в газе: тихий разряд, тлеющий разряд, дуговой разряд и коронный разряд.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Пасынков В. В., Чиркин Л. К.* Полупроводниковые приборы. – СПб.: Издательство «Лань», 2003.
2. *Петров К. С.* Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. – СПб.: Питер, 2003.
3. *Степаненко И. П.* Основы микроэлектроники. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000.
4. *Электронные приборы/ В. Н. Дулин, Н. А. Аваев, В. П. Дёмин и др.; Под ред. Г. Г. Шишкина.* – М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. *Фридрихов С. А., Мовнин С. М.* Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1982.
6. *Батушев В. А.* Электронные приборы. – М.: Высшая школа, 1980.
7. *Арефьев А.С., Рудь В.В.* Физические основы электроники. – Самара: ООО «САМБР», 2006. – 52 с.