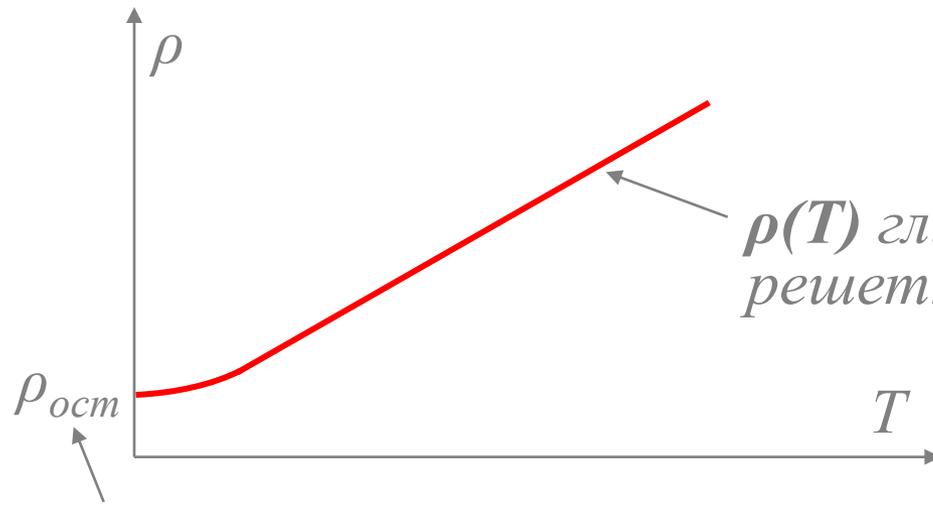


Тема 6. Квантовая теория электропроводности

- 6.1. Электропроводность металлов

$$m^* \vec{a} = e \vec{E}_{\text{эл}} + \vec{F}_{\text{сопр}}$$

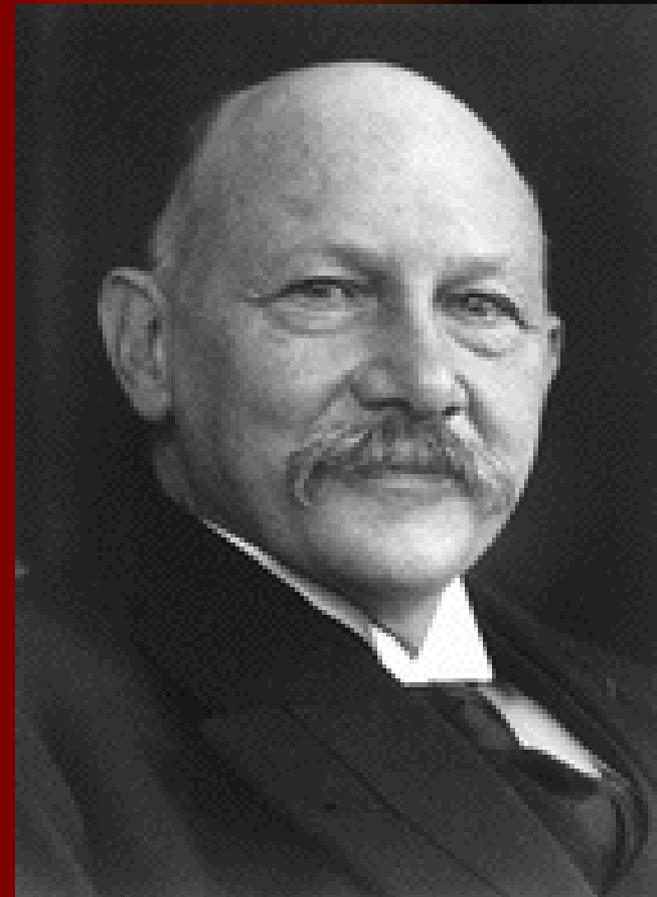


$\rho(T)$ гл. обр. связано с колебаниями решетки (рассеяние на фононах).

$\rho_{\text{ост}}$ связано с рассеянием на примесях и нулевых фононах.

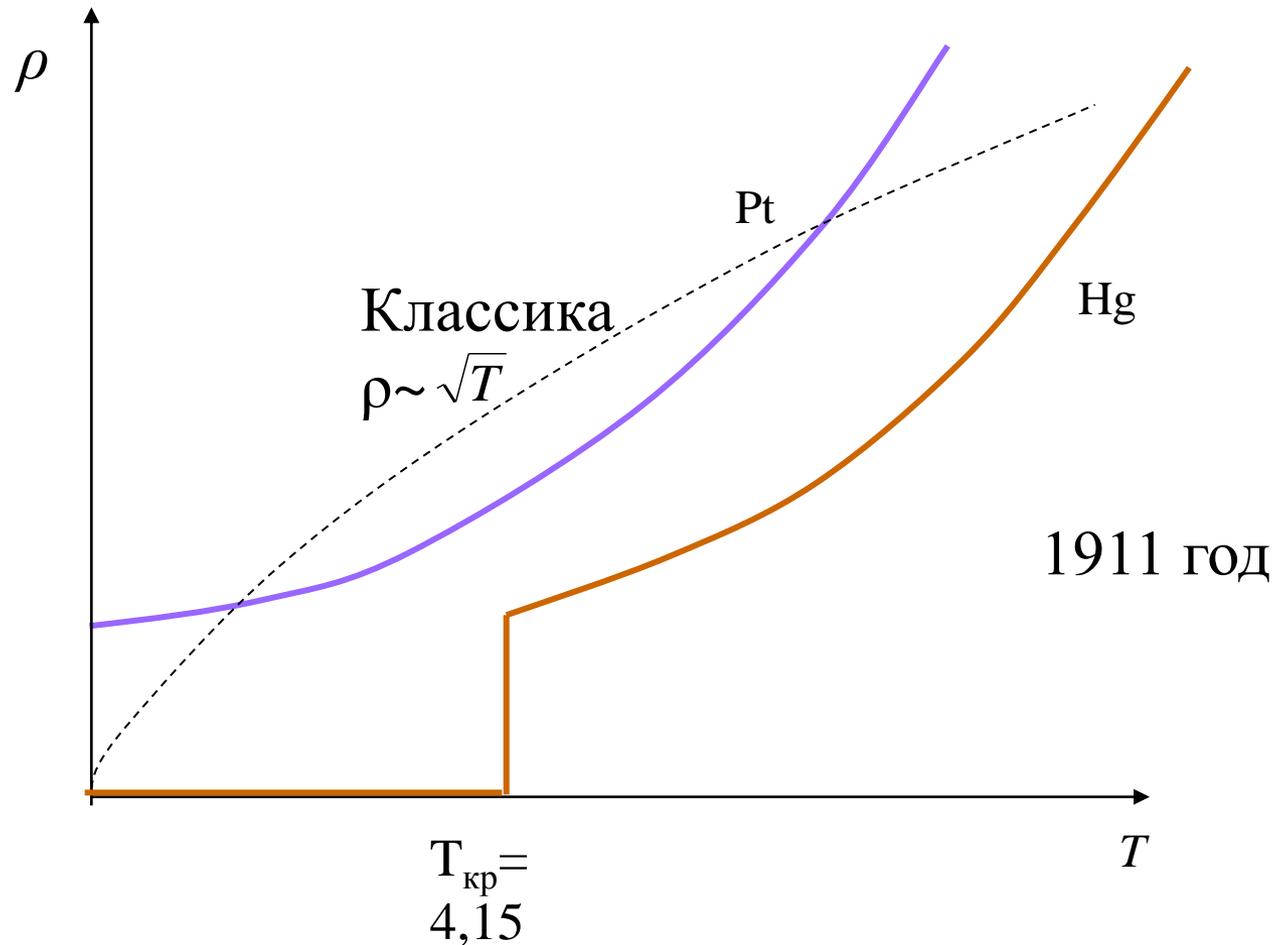
Тема 6. Квантовая теория электропроводности

- 6.2. Сверхпроводимость

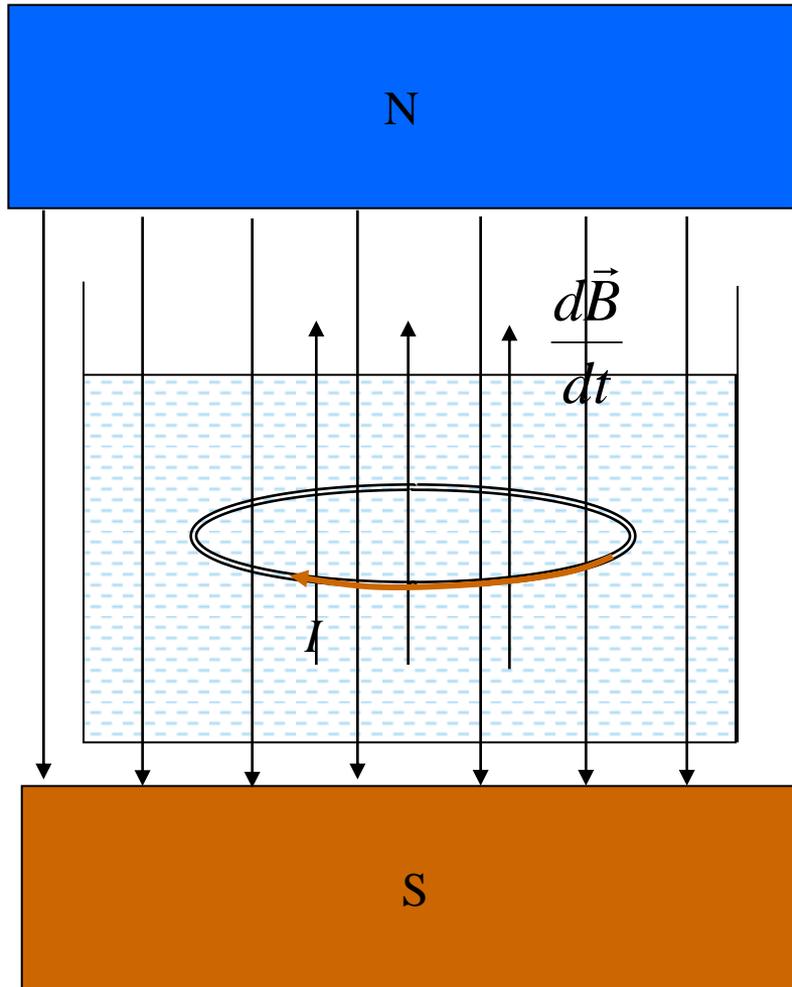


Каммерлинг-Оннес
Хайке (21.IX.1853–21.II.1926).

Зависимость удельного сопротивления от абсолютной температуры T при низких температурах

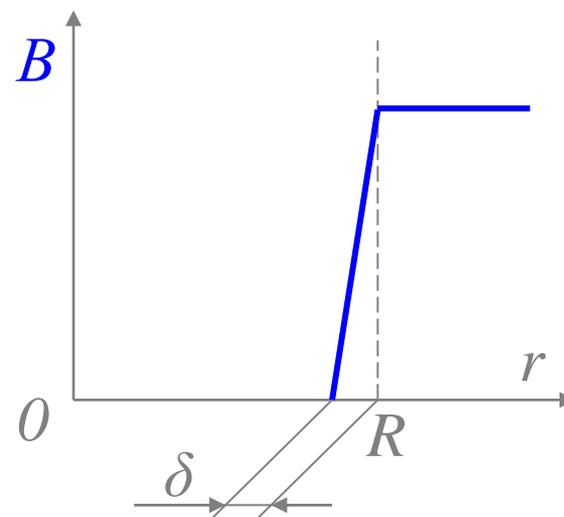
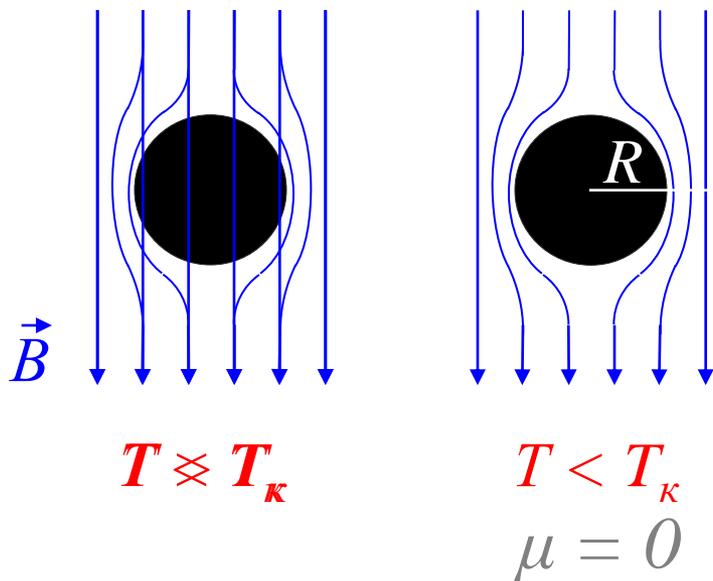


Наблюдение сверхпроводимости

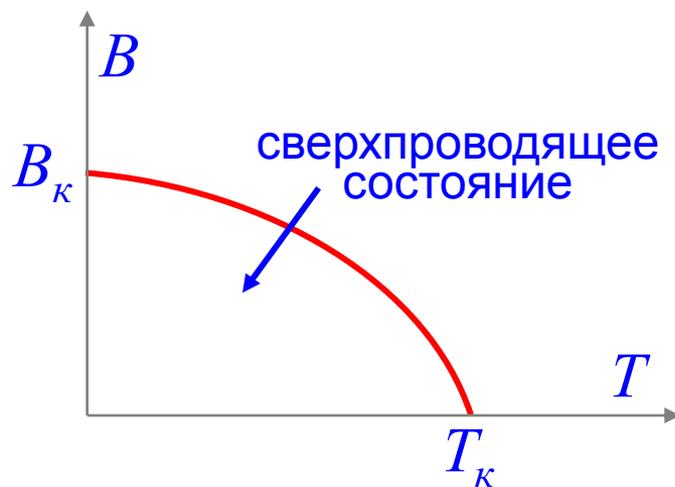


$$\rho < 10^{-25} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Эффект Мейсснера (1933 г.)

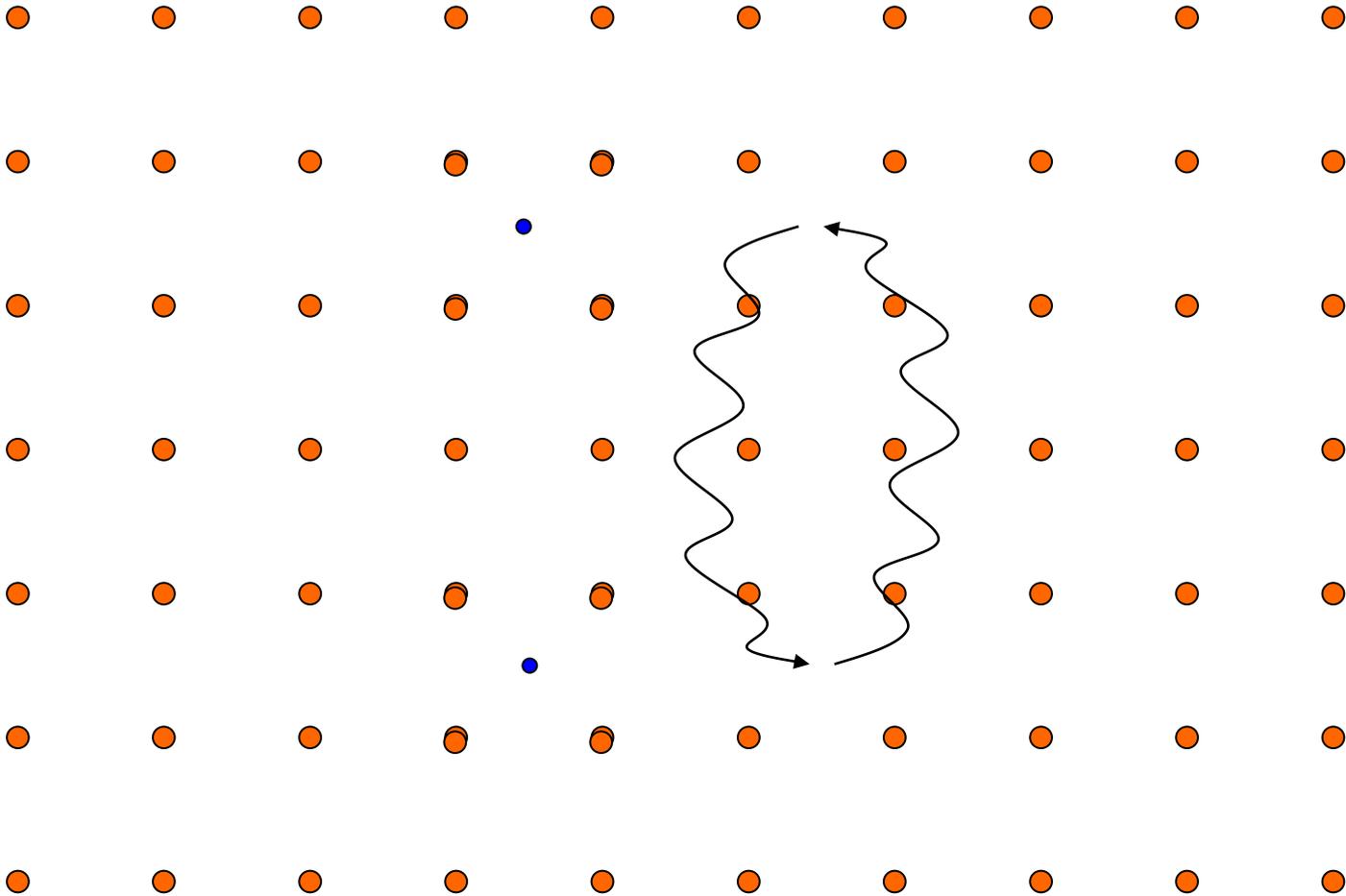


$$\delta \sim 10^{-7} - 10^{-8} \text{ м}$$

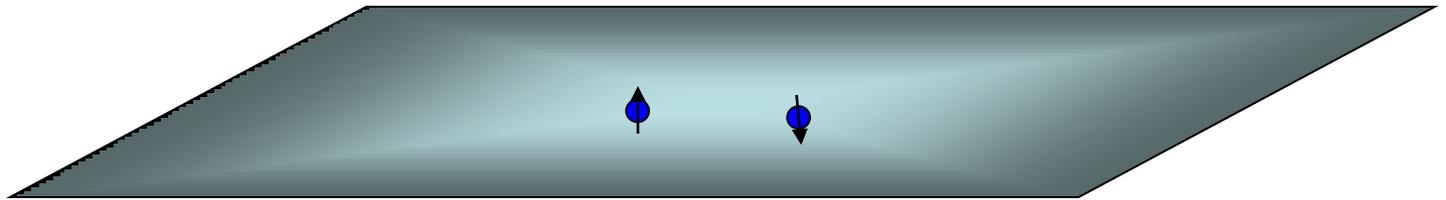


Мейсснер
Вальтер Фриц
(1882-1974)
немецкий физик

Образование куперовской пары



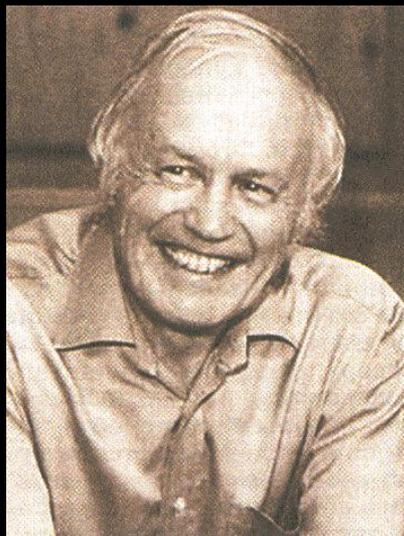
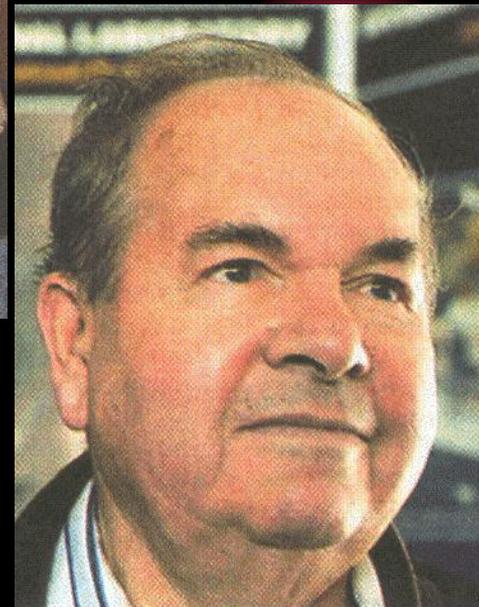
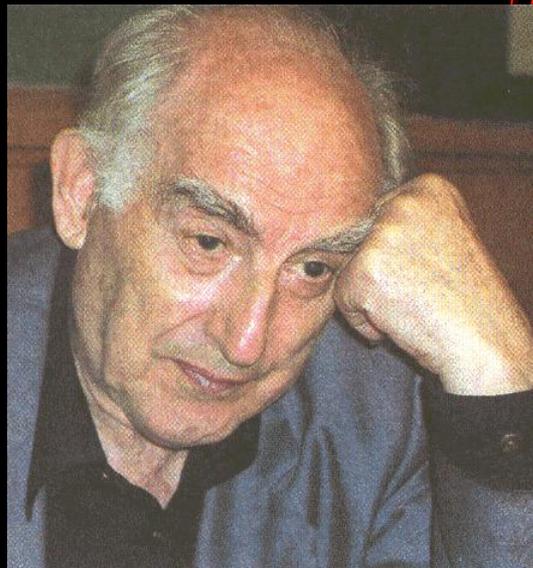




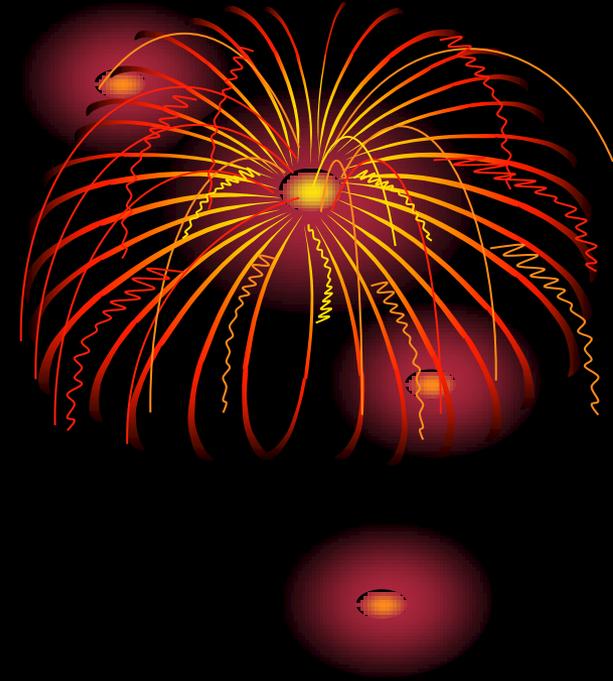
Нобелевские лауреаты 2003 г.



- **Виталий Лазаревич Гинзбург**
- **Алексей Алексеевич Абрикосов**
- **Энтони Дж. Легgett**



Высокотемпературная сверхпроводимость



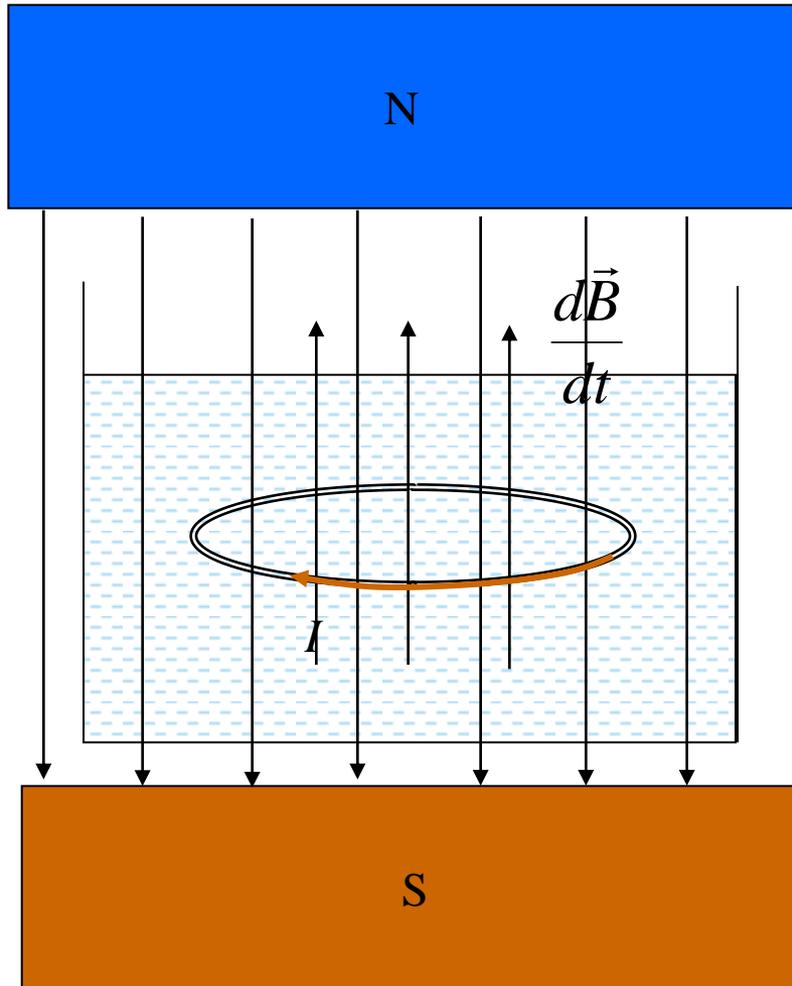
- 1987 Мюллер, Беднорц
- Металлооксидная керамика
- Ва – La – Си – О
- $T_{кр} \approx 30 \text{ К}$ ($T_{ж.азот} = 78 \text{ К}$)

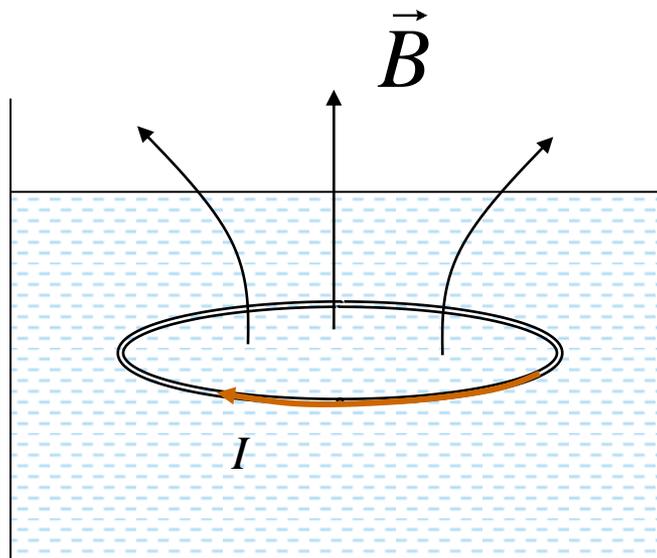
К 1990 г. - $T_{к} \approx 125 \text{ К}$
(керамики типа $TlBa_2Ca_2Cu_3O_{10}$)

Тема 6. Квантовая теория электропроводности

- 6.3. Квантование магнитного потока

Наблюдение сверхпроводимости





Квантование
момента импульса

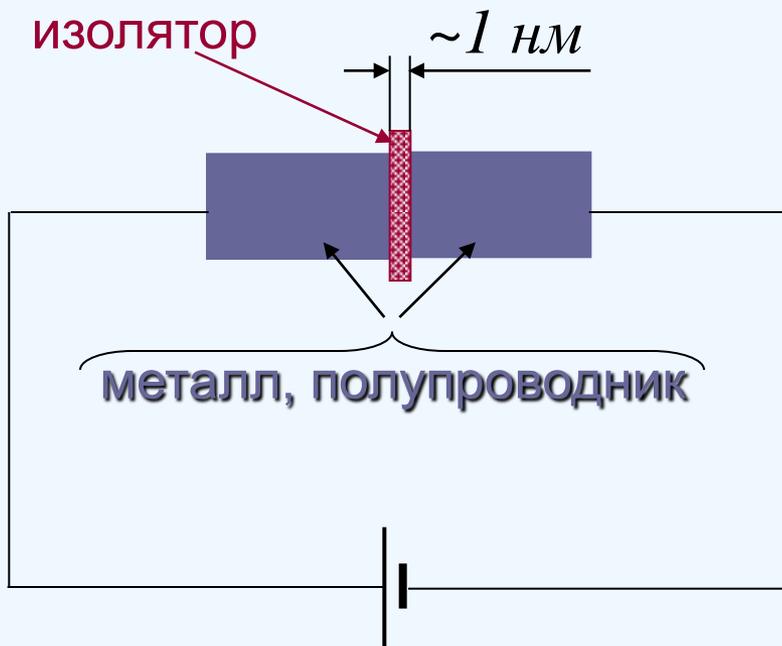
$$\Phi = \frac{2\pi\hbar}{q} n = \Phi_0 n$$

Из опытов $\Phi_0 = 2,1 \cdot 10^{-15}$ Вб

$q = 3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл $= 2e$

Тема 6. Квантовая теория электропроводности

- 6.4. Эффект Джозефсона (1962 г.)



1. Если $T > T_K$, то туннелируют неспаренные электроны.

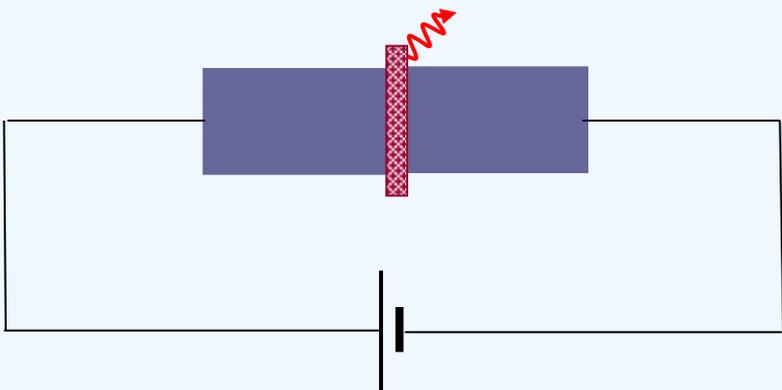
2. Если $T < T_K$, то туннелируют куперовские пары.

2а. ($T < T_K$) При $I < I_{кр}$ $U_{конт} = 0$
(Стационарный эффект Джозефсона)

2б. ($T < T_K$) При $I > I_{кр}$ $U_{конт} \neq 0$
(Нестационарный эффект Джозефсона)

$$\hbar\omega = 2eU$$

Переменный ток при постоянном напряжении!

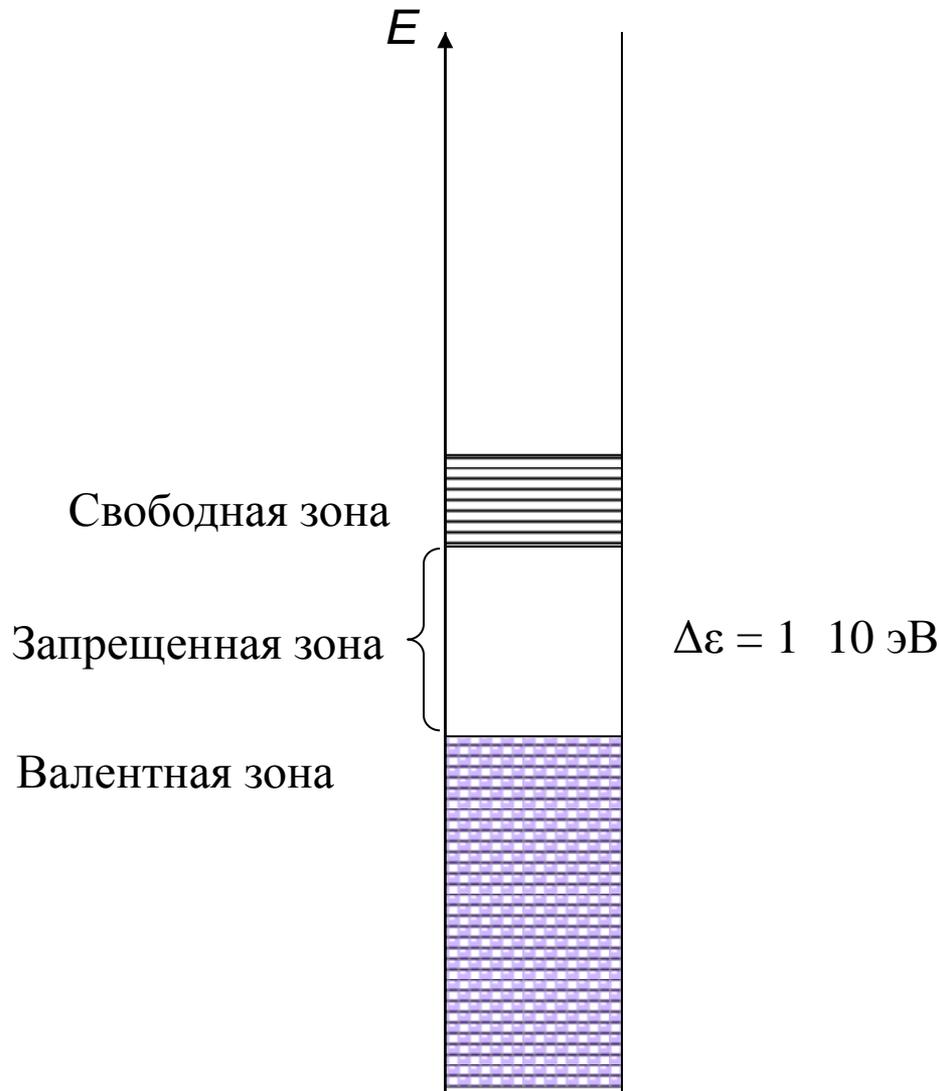


Тема 6. Квантовая теория электропроводности

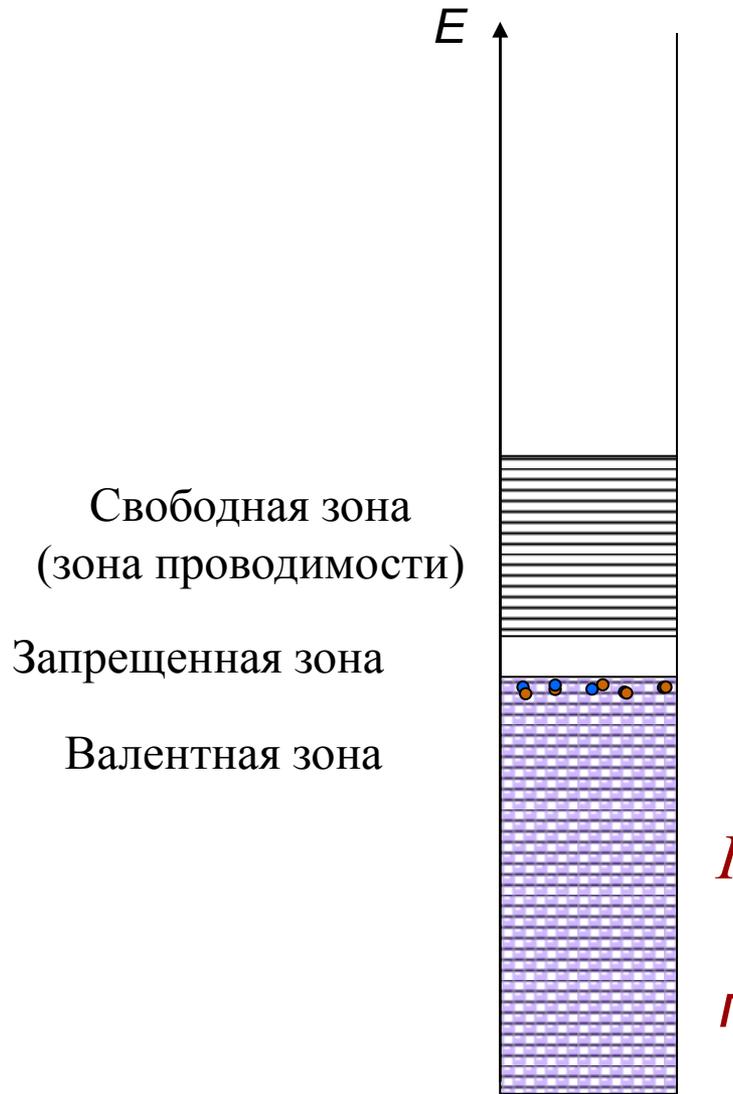
- 6.5. Собственная проводимость
полупроводников

Диэлектрики

$$kT \sim 10^{-2} \text{ эВ}$$



Полупроводники

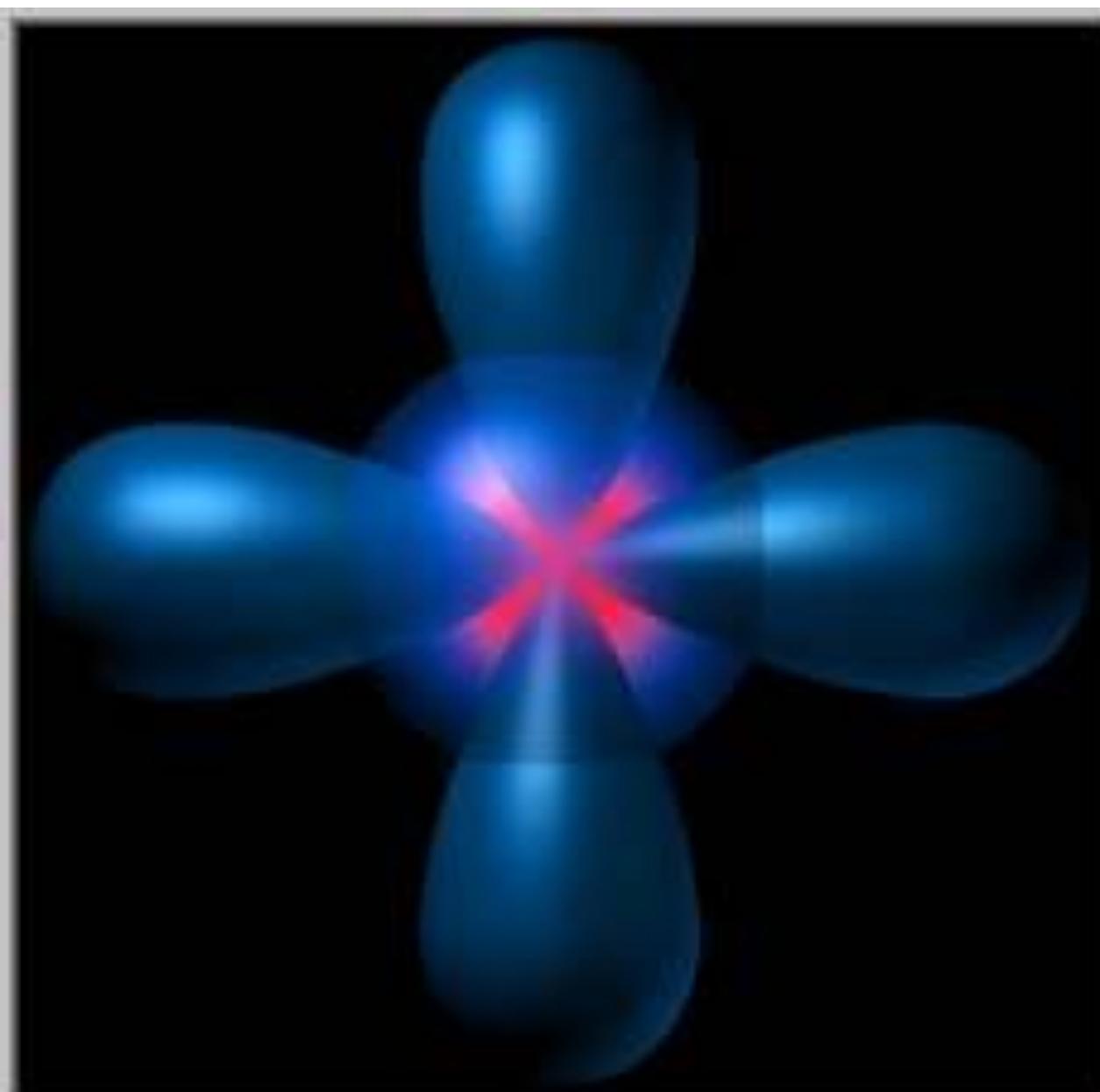


ΔE (ширина запрещенной зоны):
для **Ge** - 0,72 эВ, для **Si** - 1,09 эВ

$\Delta\varepsilon \sim 0,1$ эВ

При $T = 300$ К концентрация
электронов в зоне
проводимости $n \sim 10^{19} - 10^{20}$
 $1/\text{м}^3$

(у металлов $n \sim 10^{28} - 10^{29} 1/\text{м}^3$)



${}^{12}_{6}\text{C}$
 $2s^2 2p^2$ 12.011

1S



2S

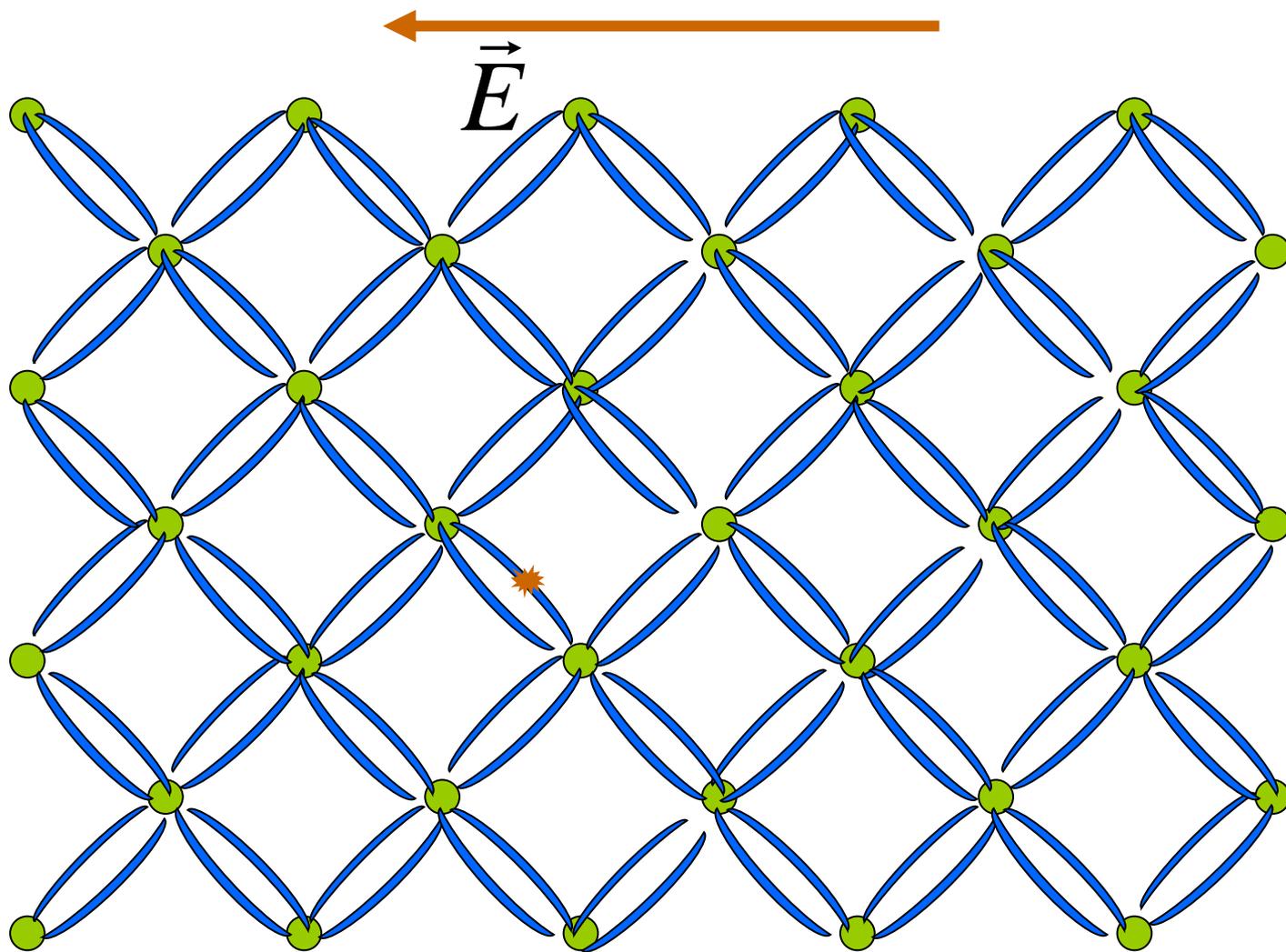


2P

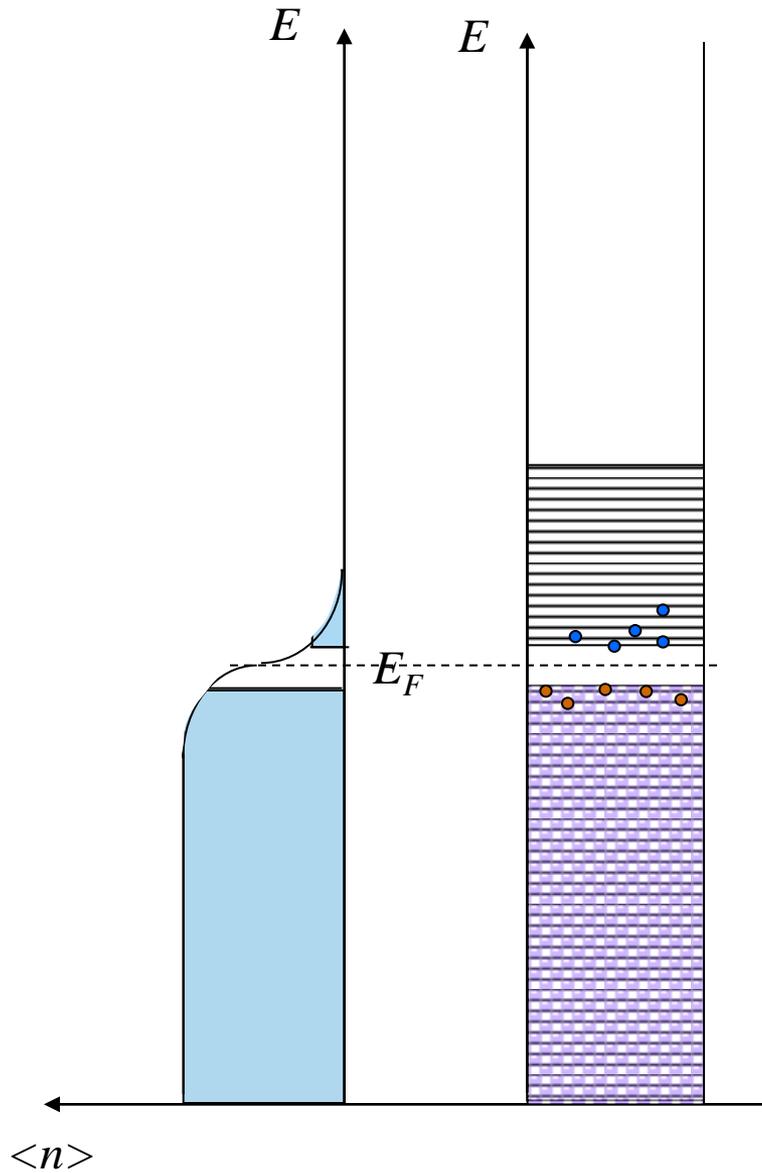


1	H
2	He
3	Li
4	Be
5	B
6	C
7	N
8	O
9	F
10	Ne

Электронные связи в кристалле германия и образование электронно-дырочной пары



Полупроводники

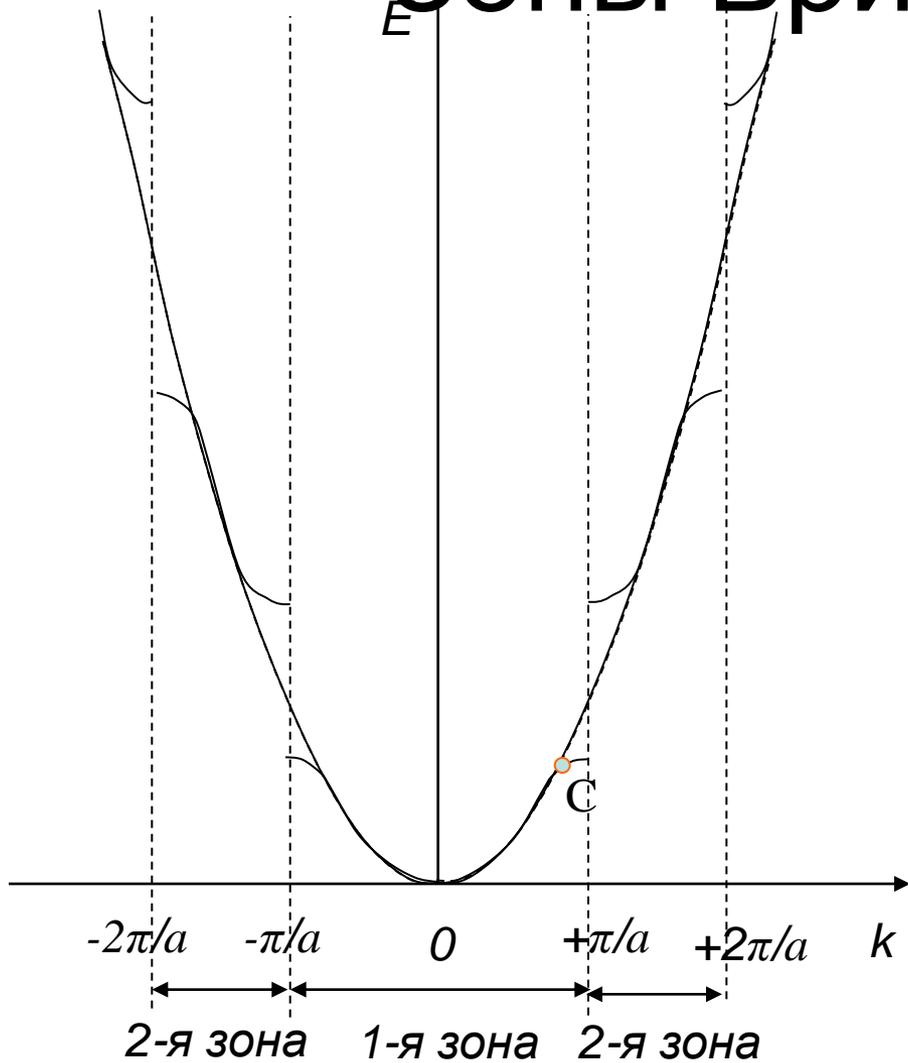


$$T > 0 \text{ K}$$

$$kT \sim 10^{-2} \text{ эВ (при 100 K)}$$

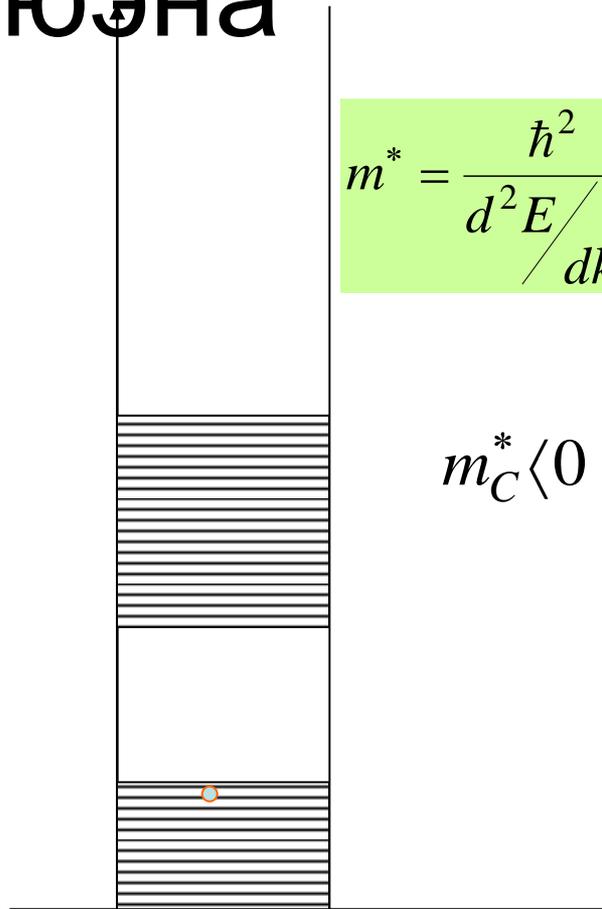
$$\Delta\varepsilon \sim 0,1 \text{ эВ}$$

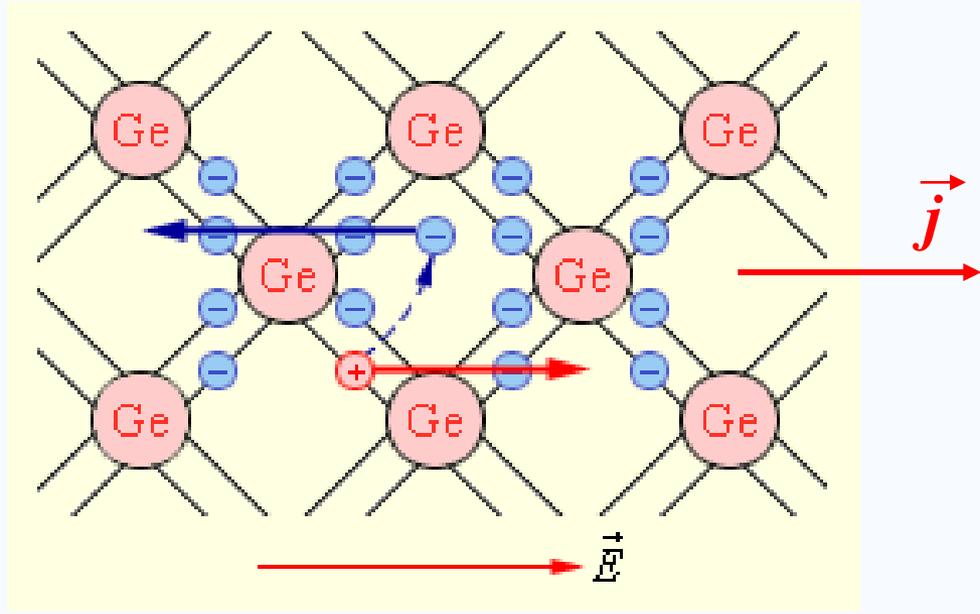
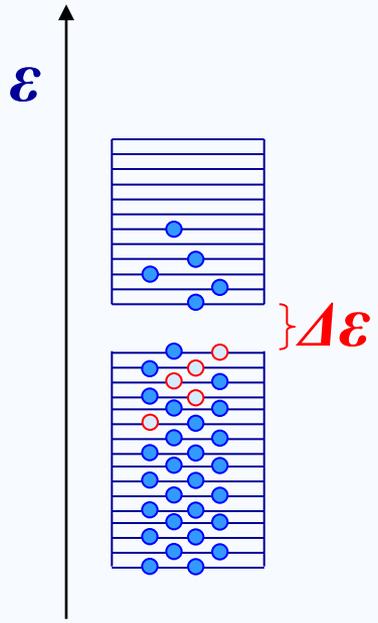
Зоны Бриллюэна

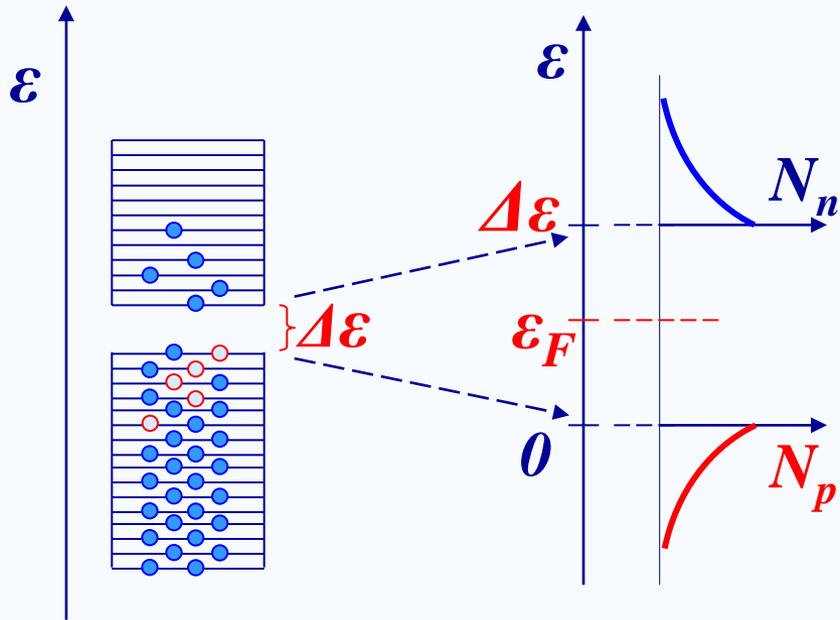


$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dk^2}$$

$$m_C^* < 0$$



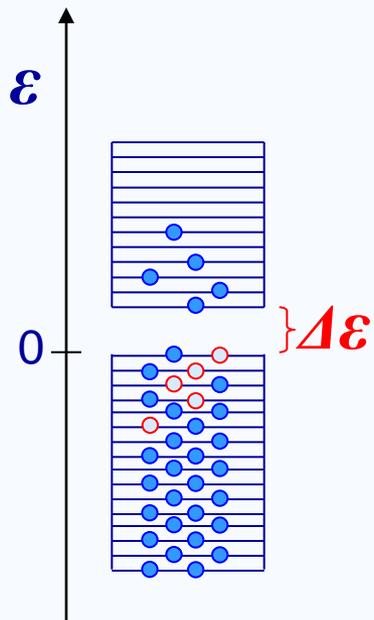




$$\boxed{2} \quad \varepsilon_F = ?$$

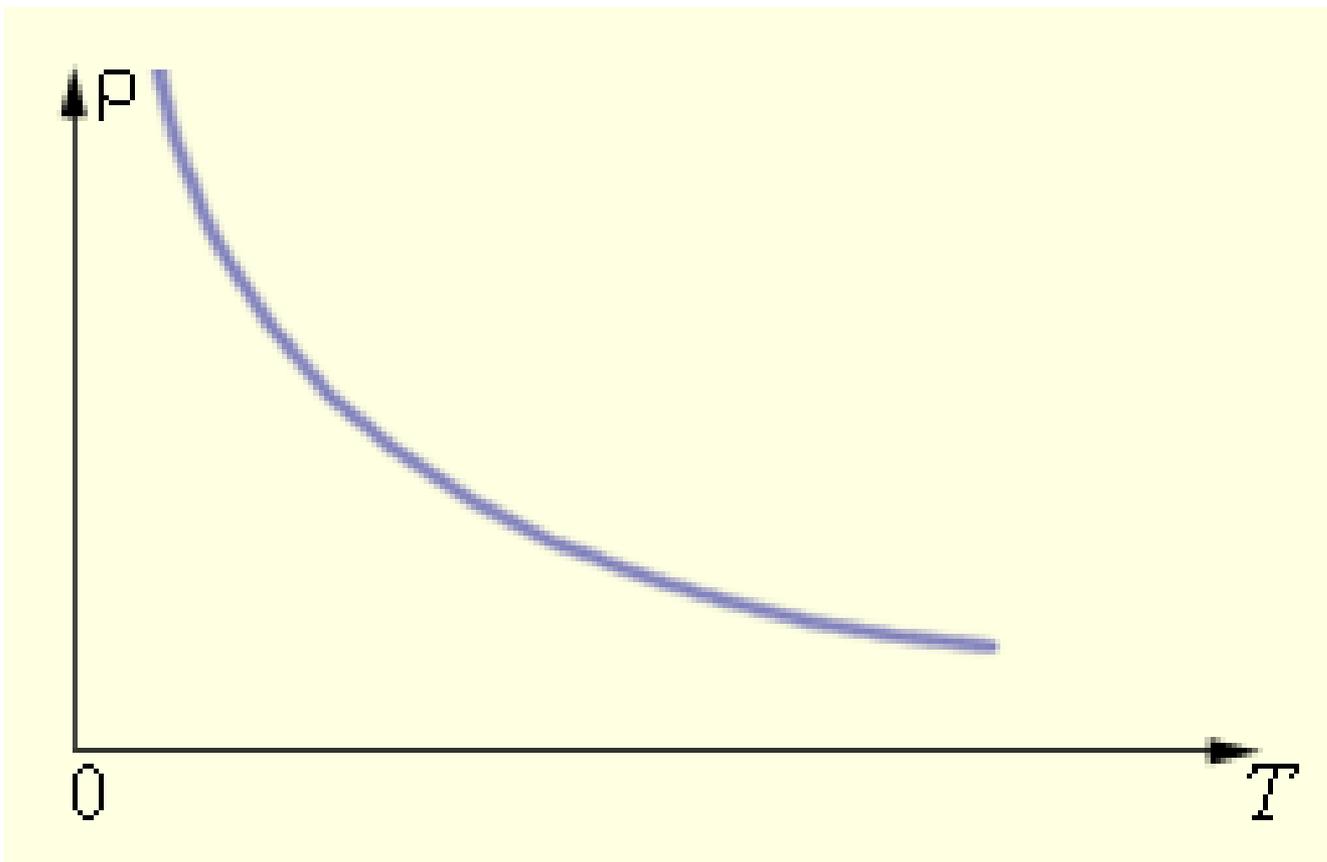
$$\langle N_n(\Delta\varepsilon) \rangle = \langle N_p(0) \rangle$$

$$\langle N_n(\Delta\varepsilon) \rangle = 1 - \langle N_n(0) \rangle$$



$$\sigma(T) = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{2kT}}$$

	$\Delta\varepsilon$ эВ	μ_n $\text{м}^2/\text{Вс}$	μ_p $\text{м}^2/\text{Вс}$	σ $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1} \equiv \text{Сум}$
Si	1,09	0,12	0,05	0,001
Ge	0,72	0,39	0,19	2



Зависимость удельного сопротивления ρ
чистого полупроводника
от абсолютной температуры T .

Температурная зависимость электропроводности собственных полупроводников

$$n_e \sim e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

Использование:

1. Термисторы

2. Фотосопротивления

Тема 6. Квантовая теория электропроводности

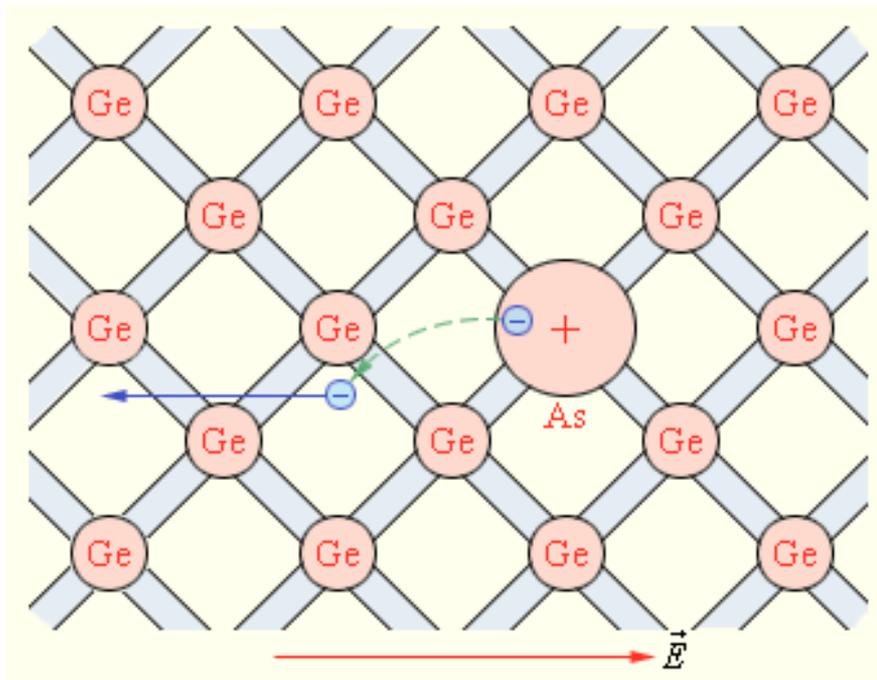
- 6.6. Примесная проводимость
полупроводников

Заполнение электронных уровней в атоме

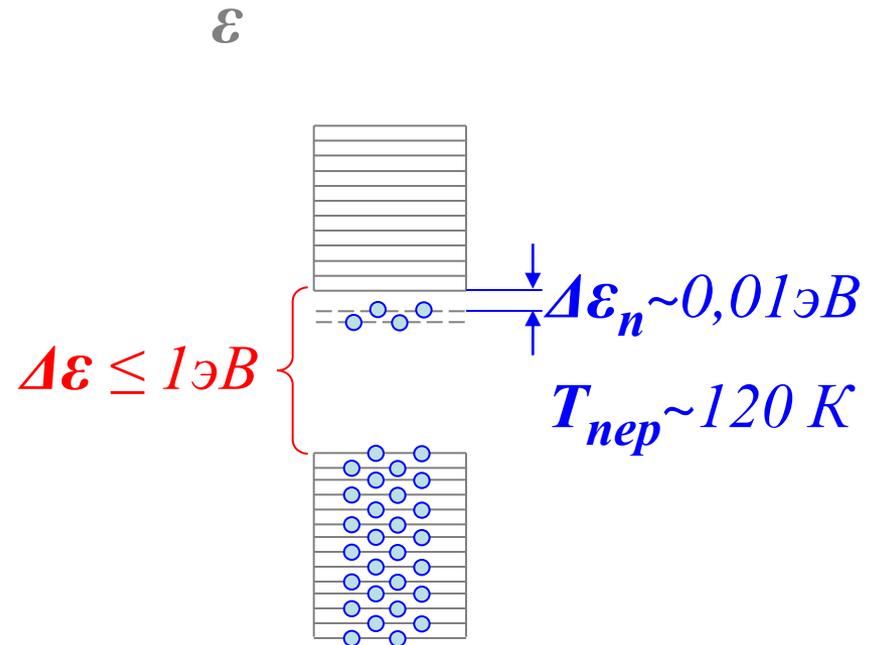
Кликните на элемент, чтобы посмотреть его электронную конфигурацию

1a																		VIIa	2
1	IIa											IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa		He	
H	Be											5	6	7	8	9		10	
3	4											B	C	N	O	F		Ne	
Li	Be											13	14	15	16	17		18	
11	12	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb			Ib	IIb	Al	Si	P	S	Cl		Ar	
Na	Mg											31	32	33	34	35		36	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	49	50	51	52	53		54	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	In	Sn	Sb	Te	I		Xe	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	81	82	83	84	85		86	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	Tl	Pb	Bi	Po	At		Rn	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	113							
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	Uut							
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub								
			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
			90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Полупроводники *n* – типа: доноры (5-вал.) P, As, Sb



Атом мышьяка (донорная примесь) в решетке германия.

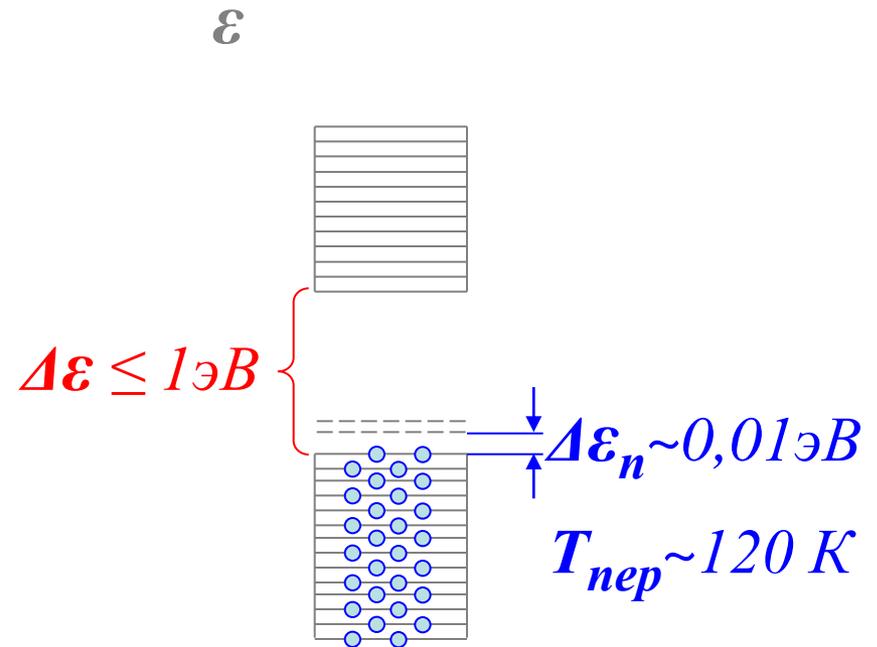
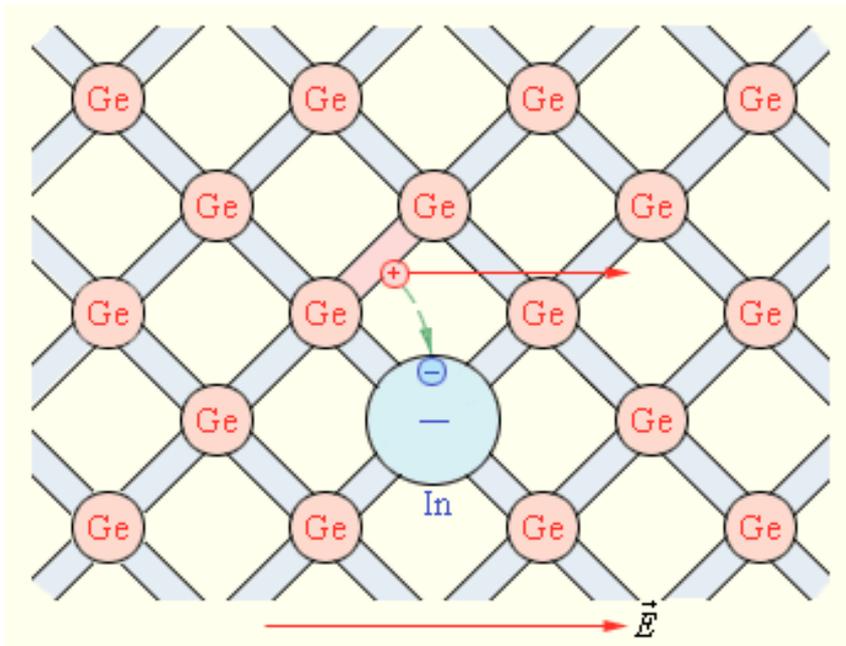


Концентрация основных носителей тока практически не зависит от температуры: $n_{\text{осн}} \sim 10^{22} - 10^{23} \text{ 1/м}^3$

$$(n_{\text{неосн}} \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ 1/м}^3)$$

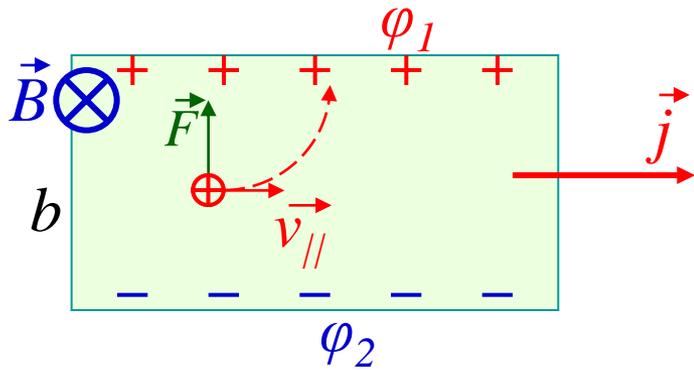
Полупроводники p -типа

Акцепторы (3-вал.): **B, Al, Ga, In**

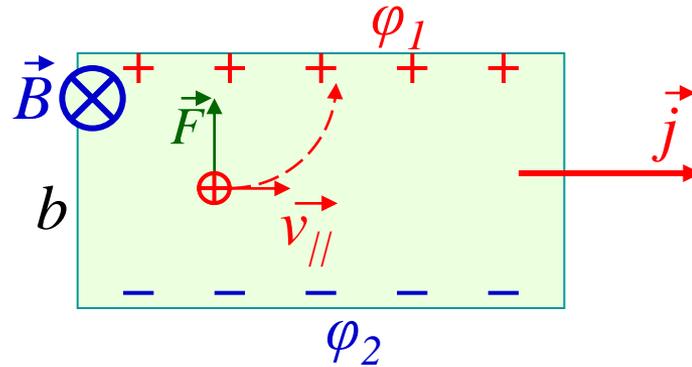


Атом индия (акцепторная примесь) в решетке германия.

Эффект Холла (гальваномагнитное явление)



Положительные носители заряда



Отрицательные носители заряда

