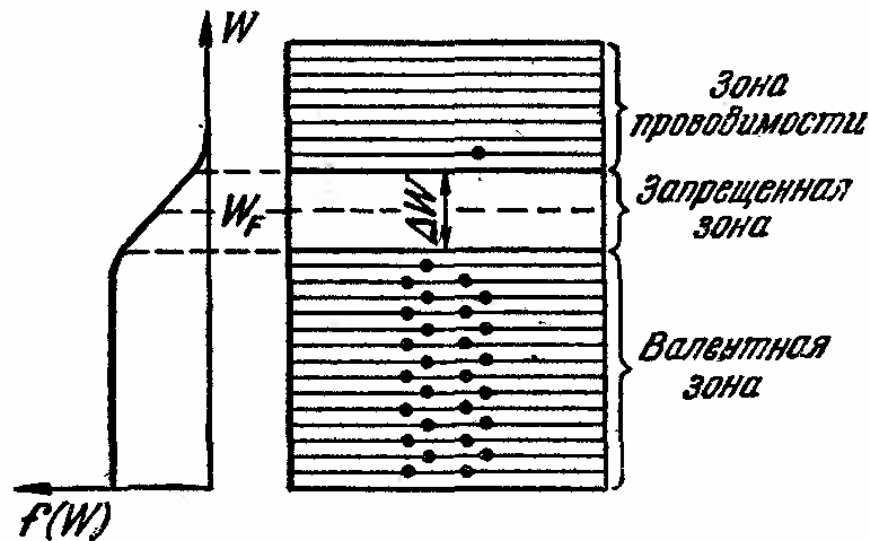


Лекция 23.

- Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводники р- и n-типа .р – n-переход. Применение полупроводников: полупроводниковые диоды, транзисторы, фотодиоды, фоторезисторы.
- Контактные явления. Контактная разность потенциалов. Термоэлектричество. Термодвижущая сила. Термопары. Эффект Пельтье. Явление Томсона.
- Сверхпроводимость. Основные свойства сверхпроводников. Магнитная индукция внутри сверхпроводника. Эффект Мейснера. Критическое поле. Высокотемпературная сверхпроводимость. Применение сверхпроводников.

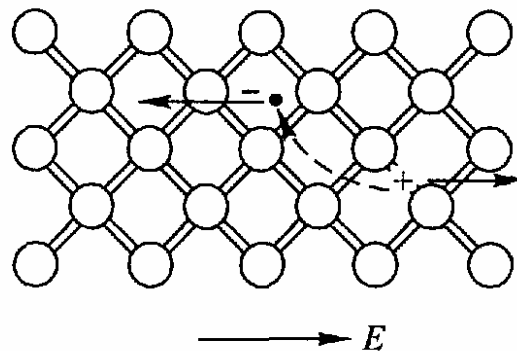
Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников.



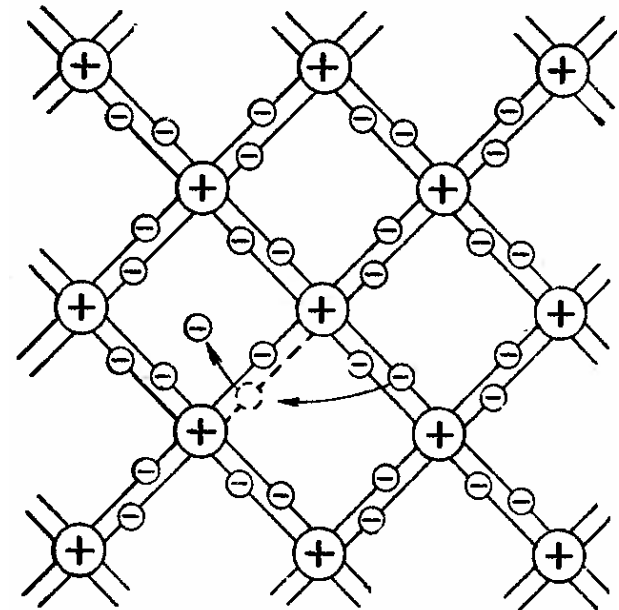
$$f(W) = \frac{1}{1 + \exp[(W - \underbrace{F}_{W_F}) / k_B T]} \approx e^{-\frac{\Delta W}{k_B T}}.$$

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{\Delta W}{k_B T}}.$$

Собственная
проводимость
полупроводников

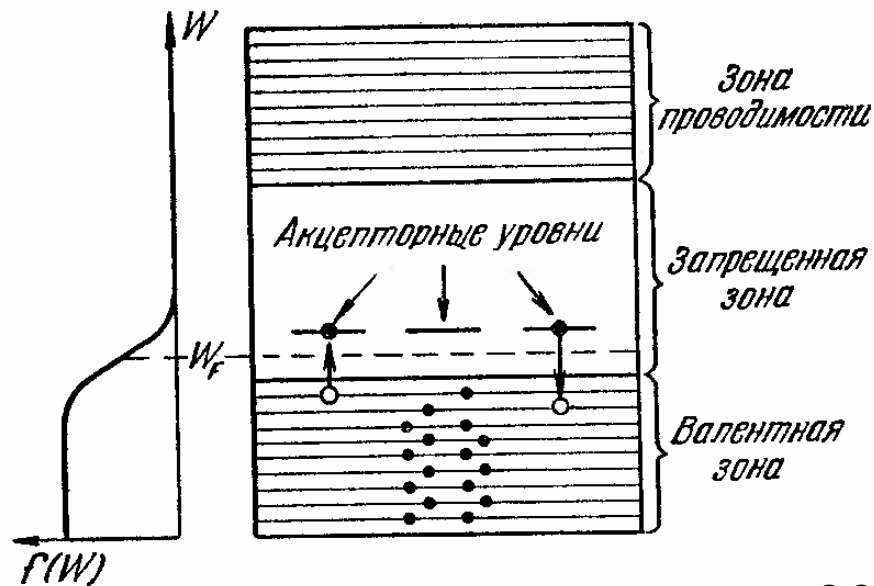
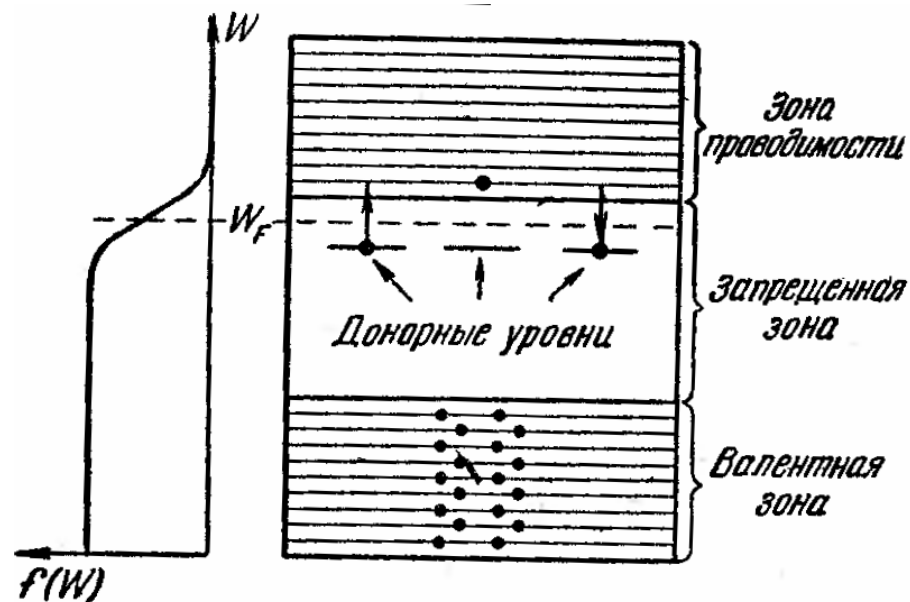
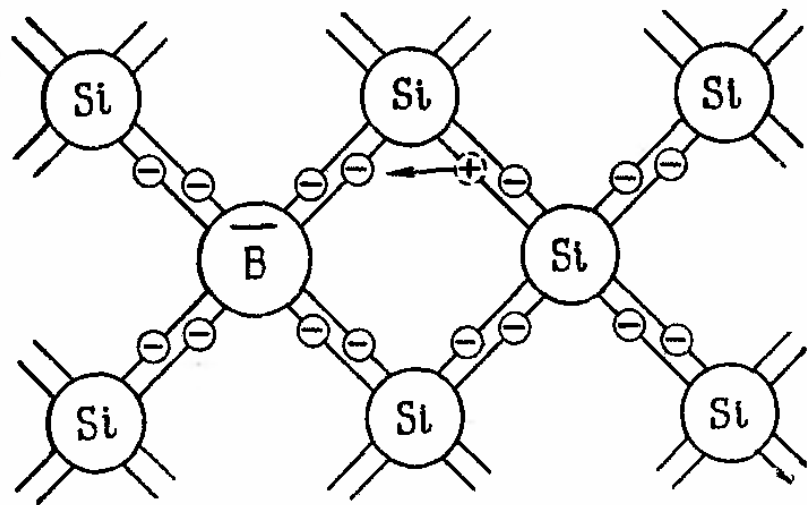
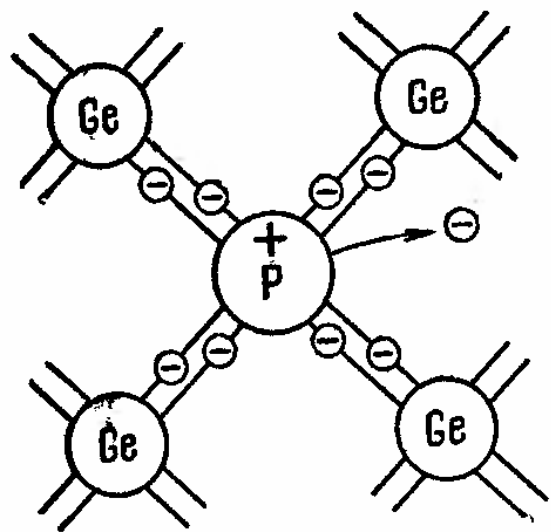


Возникновение электрона проводимости и дырки в решетке кремния

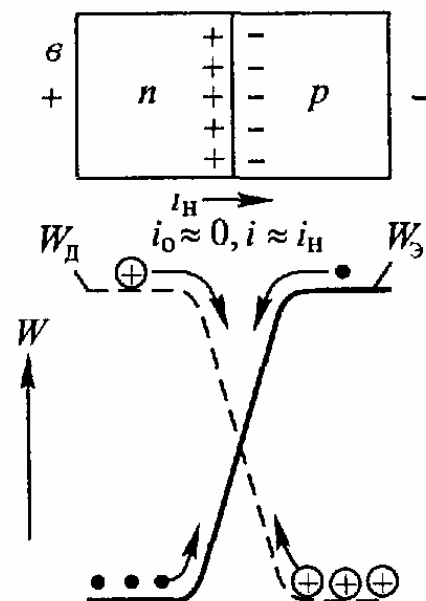
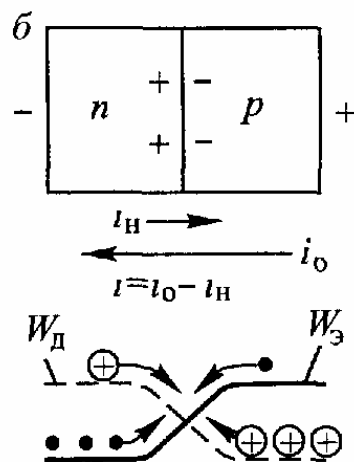
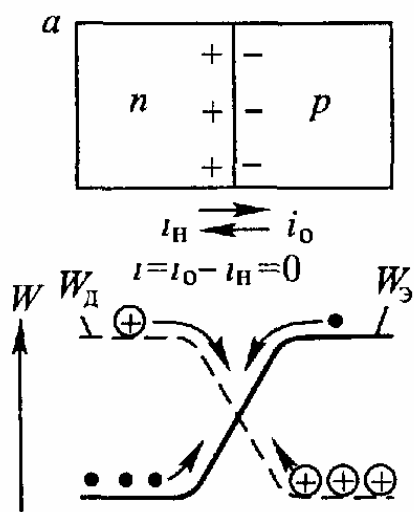
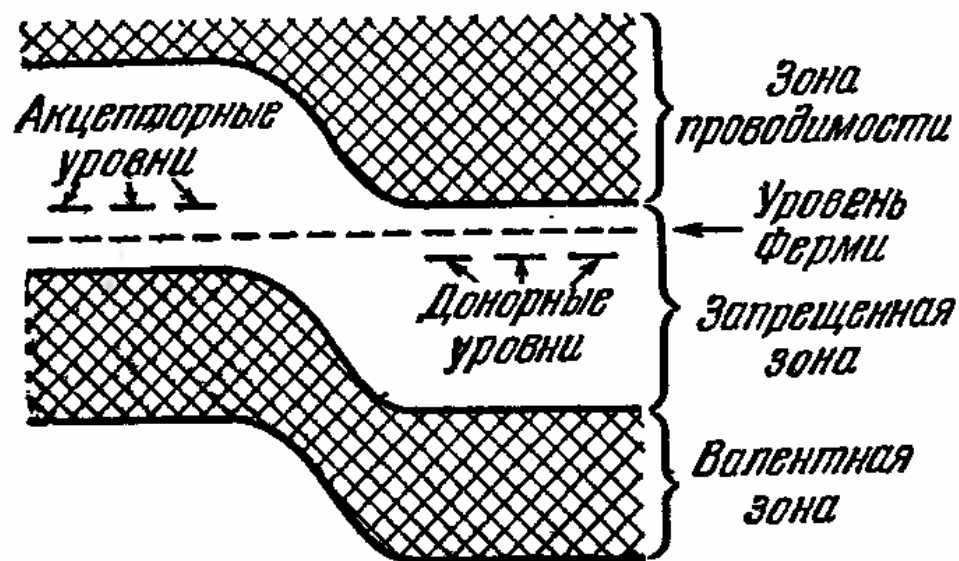
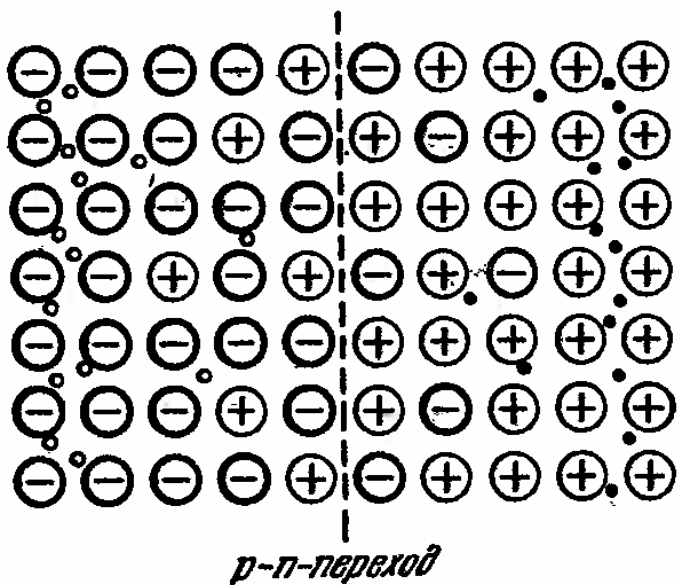


Примесная проводимость полупроводников.

Полупроводники p- и n-типа.

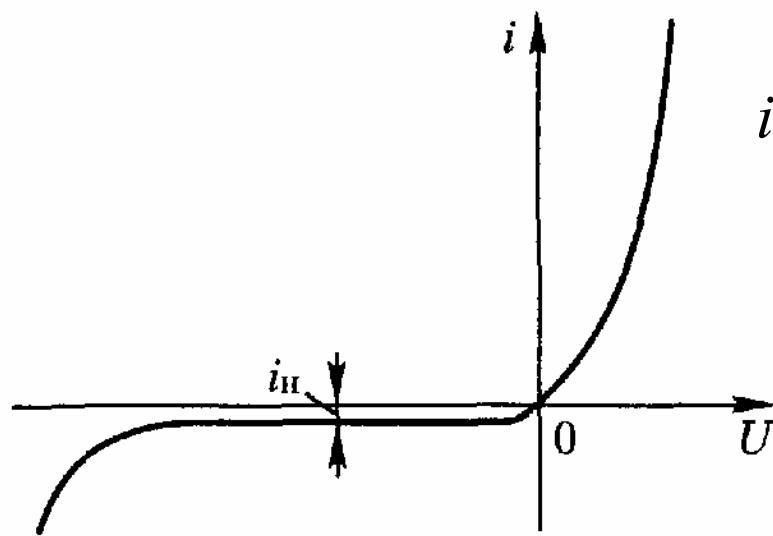


$p - n$ -переход.

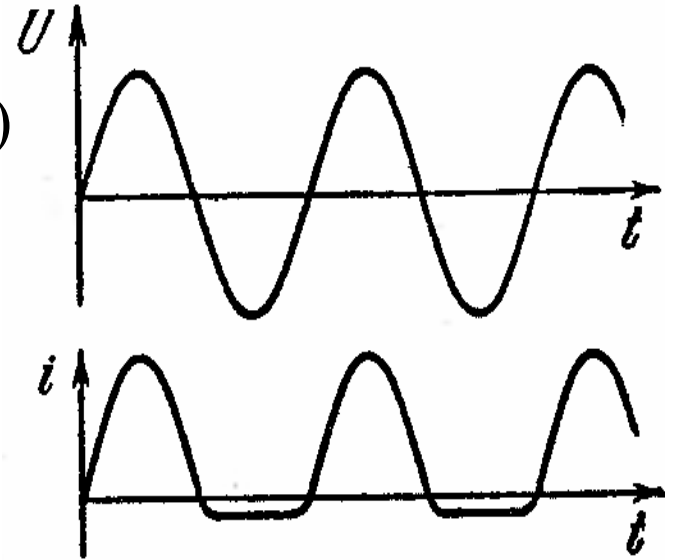


Электрический ток в $p - n$ -переходе

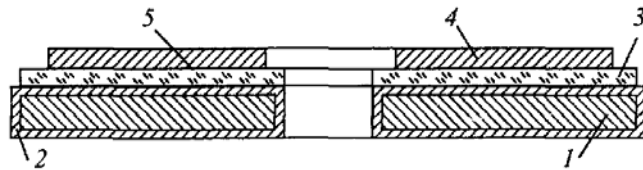
Применение полупроводников. Полупроводниковый диод.



$$i = i_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$



Вольт-амперная характеристика $p - n$ -перехода



Селеновая шайба: 1 — железная шайба, 2 — слой никеля (контактный переход), 3 — слой селена, 4 — слой сплава Bi-Cd-Sn (вентильный электрод), 5 — запирающий слой, возникающий на границе вентильного электрода и селена

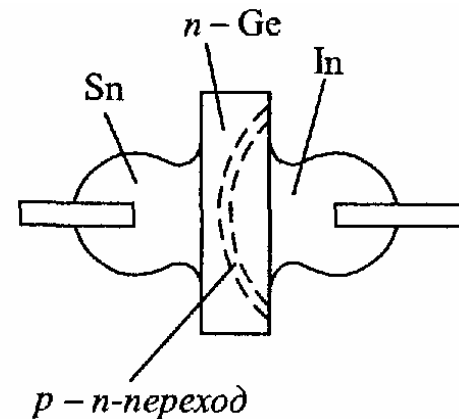
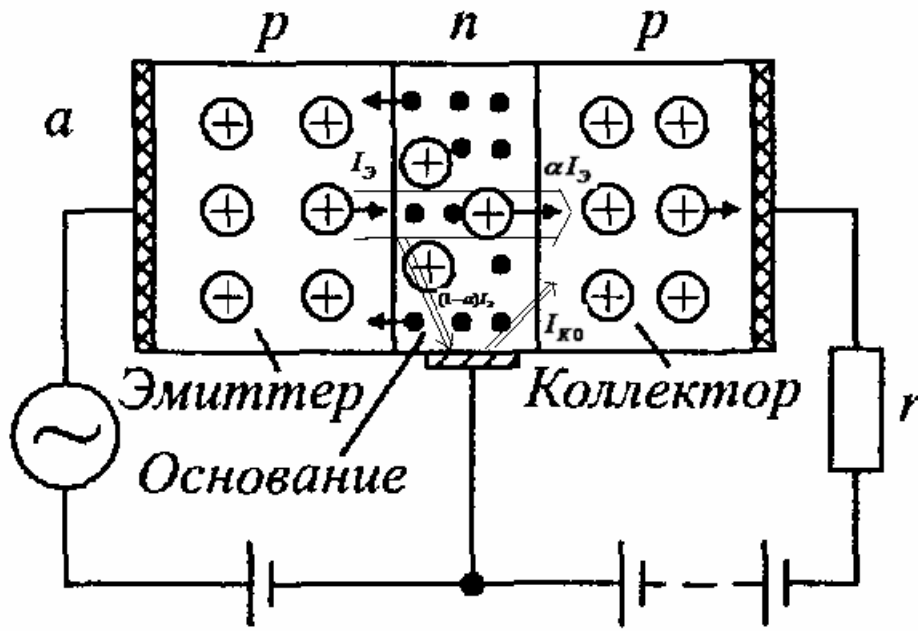


Схема германиевого выпрямителя

Применение полупроводников. Биполярные и полевые транзисторы.

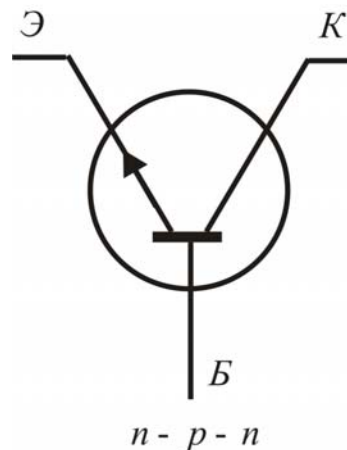
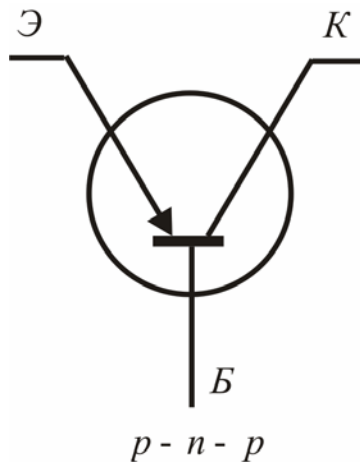


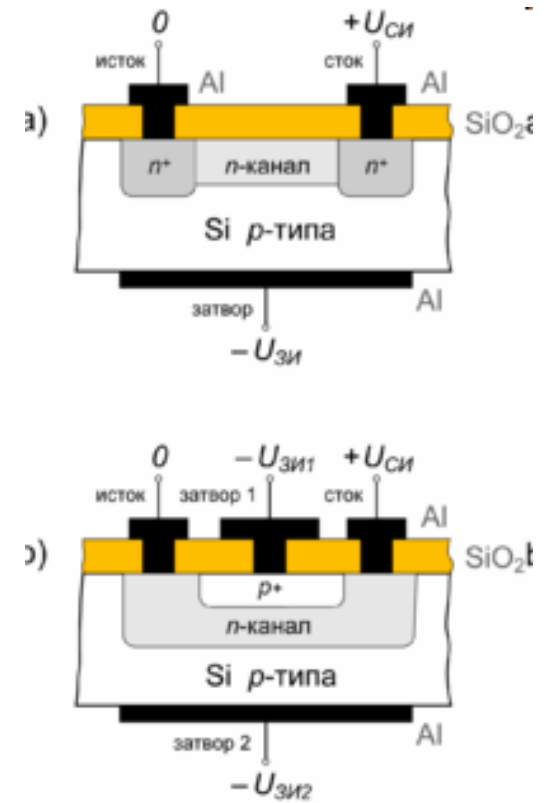
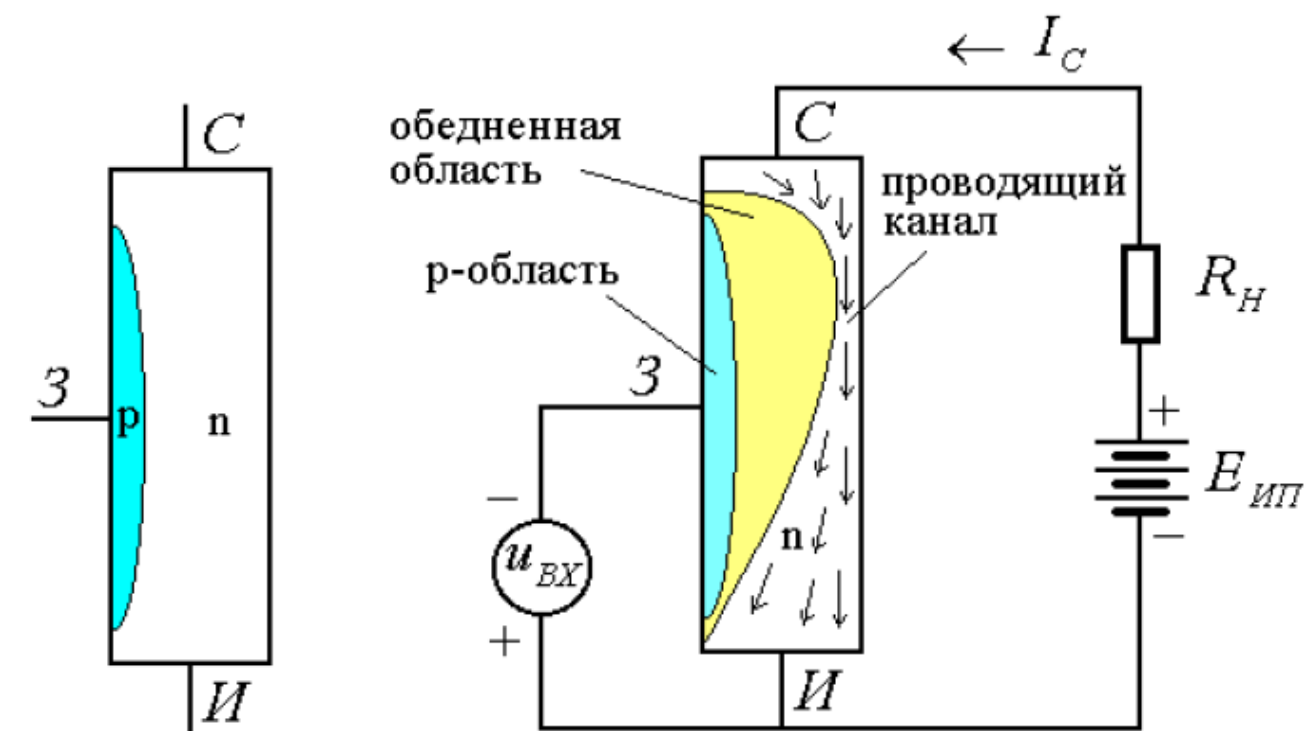
$$I_K = I_{K0} + \alpha I_{\mathcal{E}} \approx \alpha I_{\mathcal{E}}$$

$$\frac{I_K}{I_{\mathcal{E}B}} \approx \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

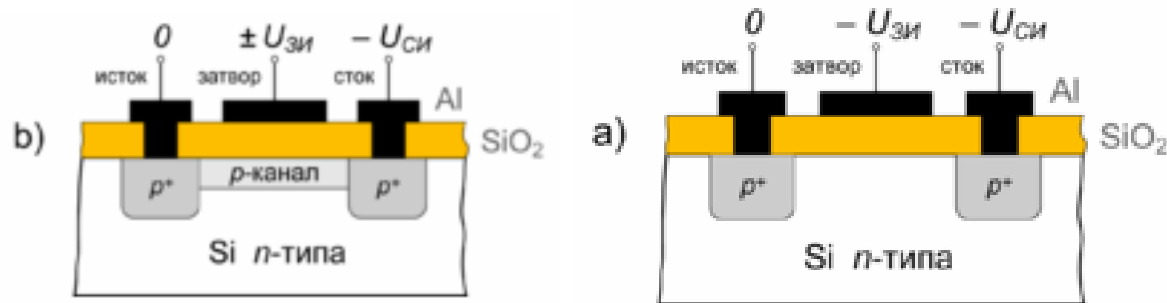
- коэффициент
усиления по току

$$\alpha = 0,98 - 0,99.$$





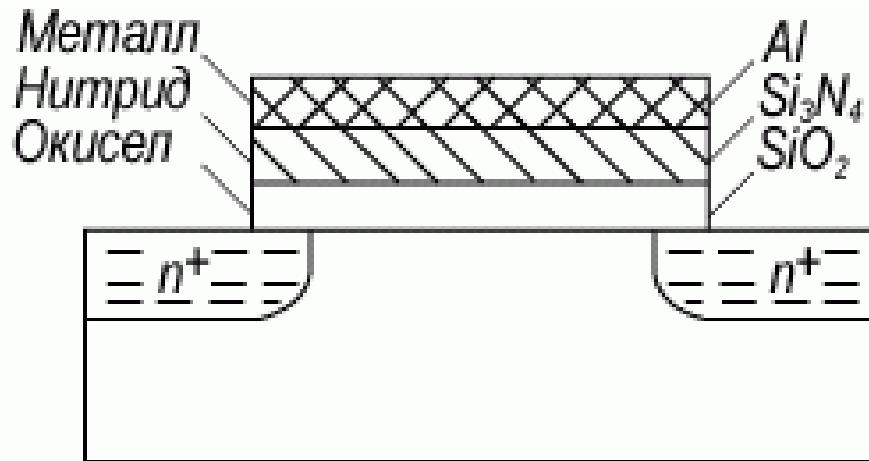
Устройство полевого транзистора с управляющим р-п переходом



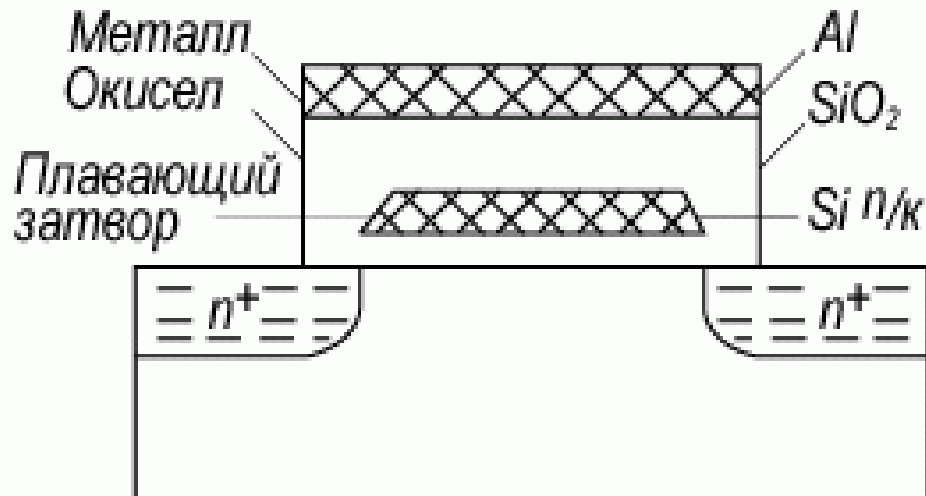
Устройство полевого транзистора с изолированным затвором.

Топология полупроводниковых запоминающих устройств:

а) МНОП-транзистор; б) МОП ПТ с плавающим затвором



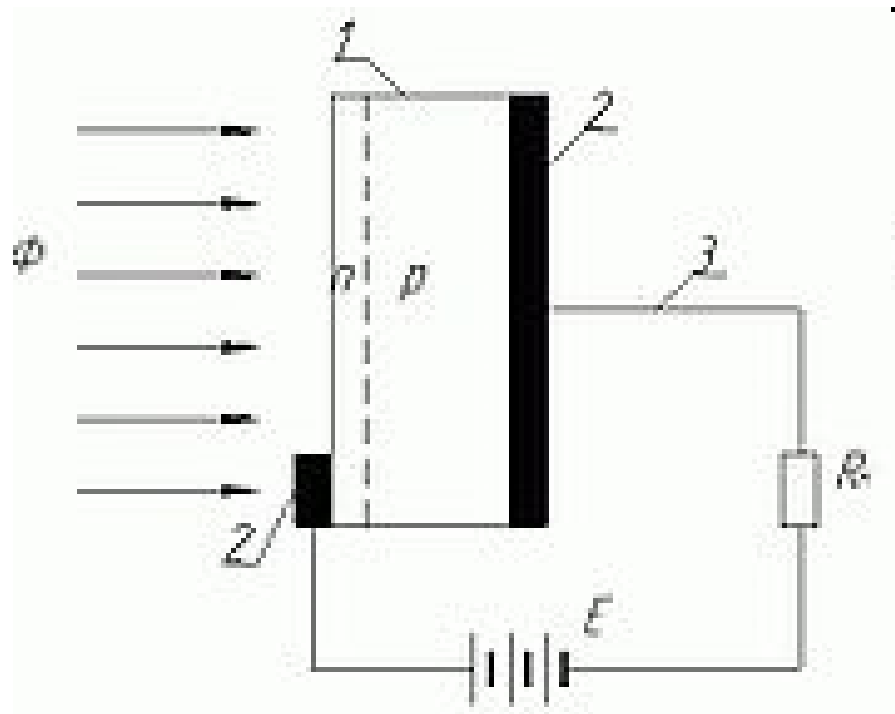
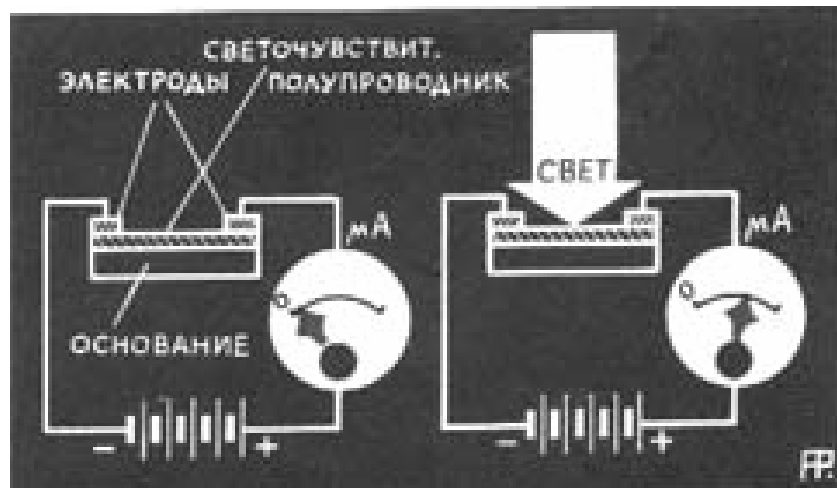
а



б

Зарядка плавающего затвора осуществляется за 0.1мкс, разрядка – более 100 лет при комнатной температуре

фотодиоды, фоторезисторы.



Структурная схема фотодиода. 1 — кристалл полупроводника; 2 — контакты; 3 — выводы; Φ — поток электромагнитного излучения; E — источник постоянного тока; R_n — нагрузка.

Контактные явления. Контактная разность потенциалов. [2,§198]

$$U_{12} = U_1 - U_2, \quad eU_{12} = \Phi_1 - \Phi_2,$$

где Φ_1 и Φ_2 - работы выхода.

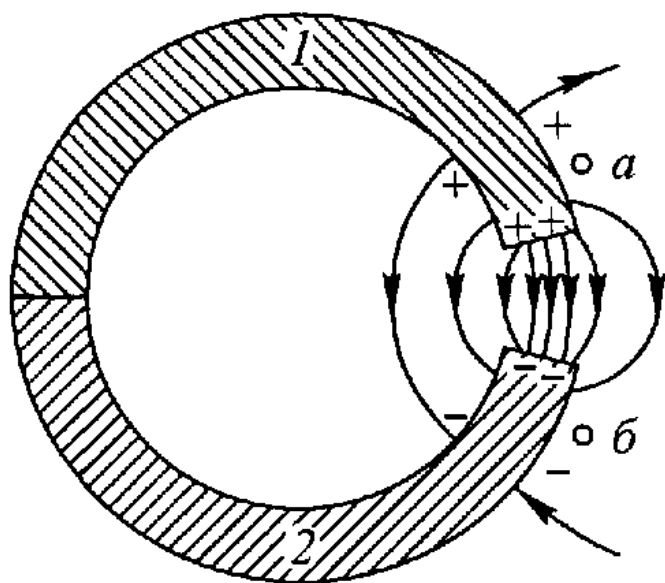


Рис 336 При соприкосновении двух различных металлов во внешнем пространстве появляется электрическое поле, а на поверхности металлов возникают заряды

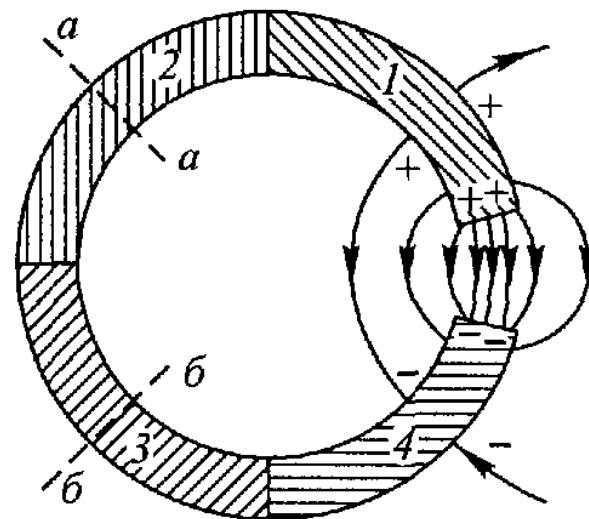


Рис 337. При соединении нескольких проводников (1, 2, 3, 4) электрическое поле между свободными концами цепи определяется только крайними проводниками (1 и 4)

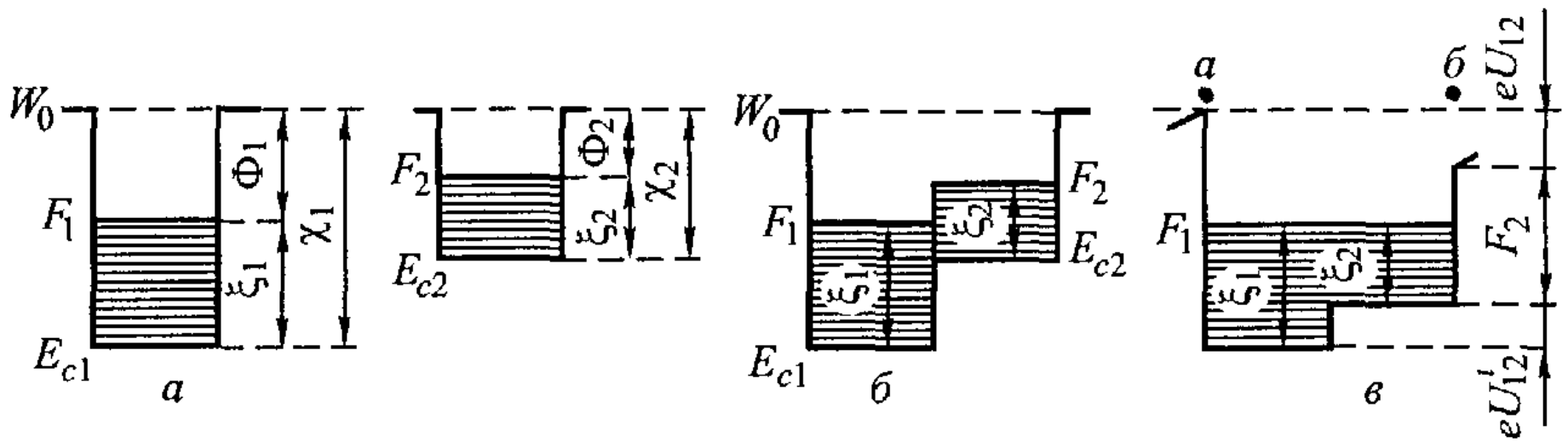
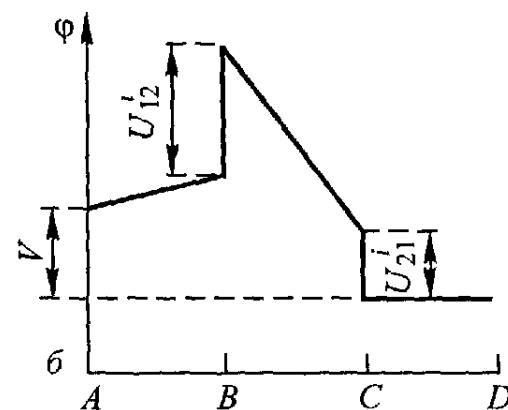
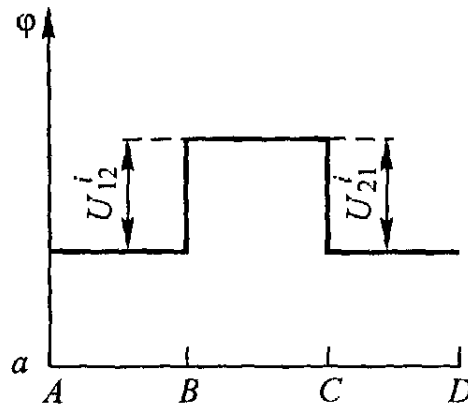
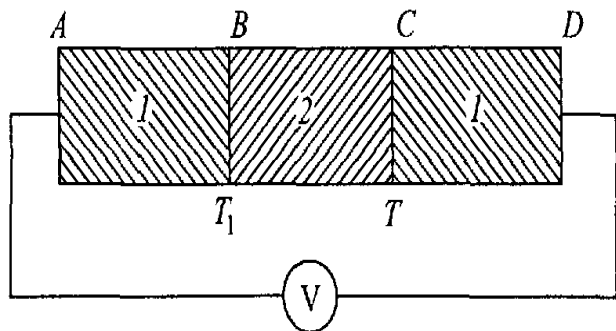


Рис. 339. Энергетическая диаграмма двух металлов: а — контакта нет; б — контакт есть, но нет равновесия; в — равновесие

Здесь W_0 — энергия покоящегося электрона в вакууме, $\chi_1 = W_0 - E_{c1}$ и $\chi_2 = W_0 - E_{c2}$ — глубина потенциальных ям (электронное сродство данного вещества), $F - E_c = \xi$ — химический потенциал электронов.

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= W_0 - F_1 = \chi_1 - \xi_1, & \Phi_2 &= W_0 - F_2 = \chi_2 - \xi_2, \\ -eU_1 - (-eU_2) &= (\chi_1 - \xi_1) - (\chi_2 - \xi_2) = \Phi_1 - \Phi_2. \\ eU_{12}^i &= e(\varphi_1 - \varphi_2) = \xi_1 - \xi_2.\end{aligned}$$

Термоэлектричество (явление Зеебека 1821г.). Термодвижущая сила. [2, §199].



$$\Delta \mathcal{E} = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T.$$

Рис. 341. Распределение потенциала в цепи, изображенной на рис. 340, при $T_1 = T$ (a) и при $T_1 > T$ (б)

$\Delta \mathcal{E}_i = \alpha_i \Delta T$ – термо-ЭДС каждого проводника.

$\alpha = d\mathcal{E} / dT$ – дифференциальная термо-ЭДС, (коэффициент термо-ЭДС).

$$\mathcal{E} = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_1 - \alpha_2) dT; \Rightarrow \mathcal{E} = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_2 - T_1).$$

Металл	$\alpha - \alpha_{Pt}, \text{ мкВ/К}$	Металл	$\alpha - \alpha_{Pt}, \text{ мкВ/К}$
Висмут	-65,0	Серебро	+7,10
Константан	-34,4	Медь	+7,40
Никель	-16,4	Железо	+16,0
Палладий	-5,60	Сурьма	+47,0

Термопары. [2, §202].

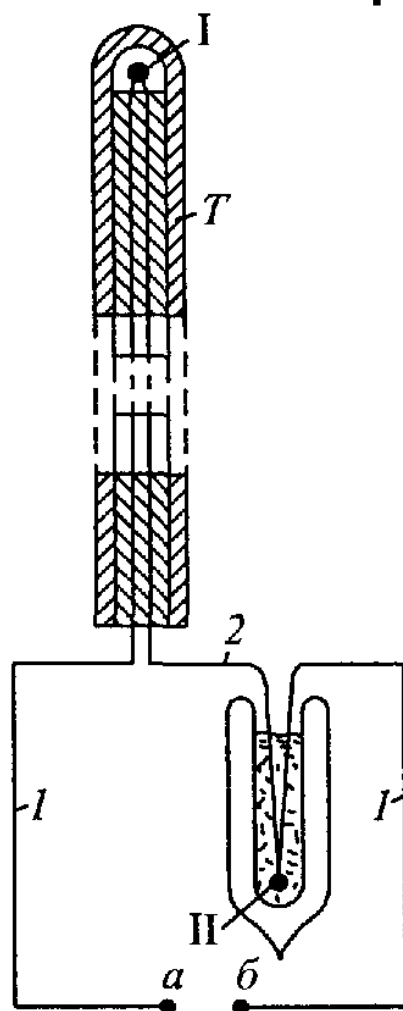


Рис. 346. Схема устройства и включения термопары

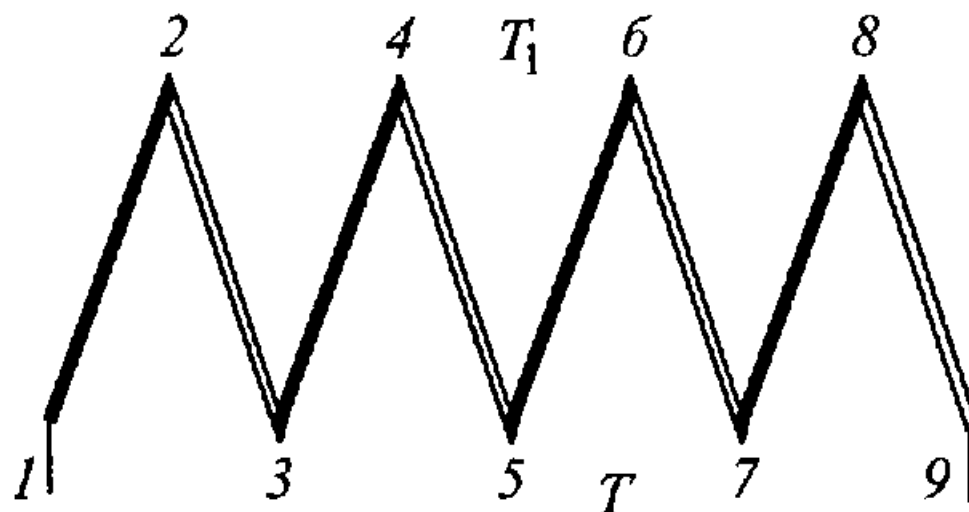
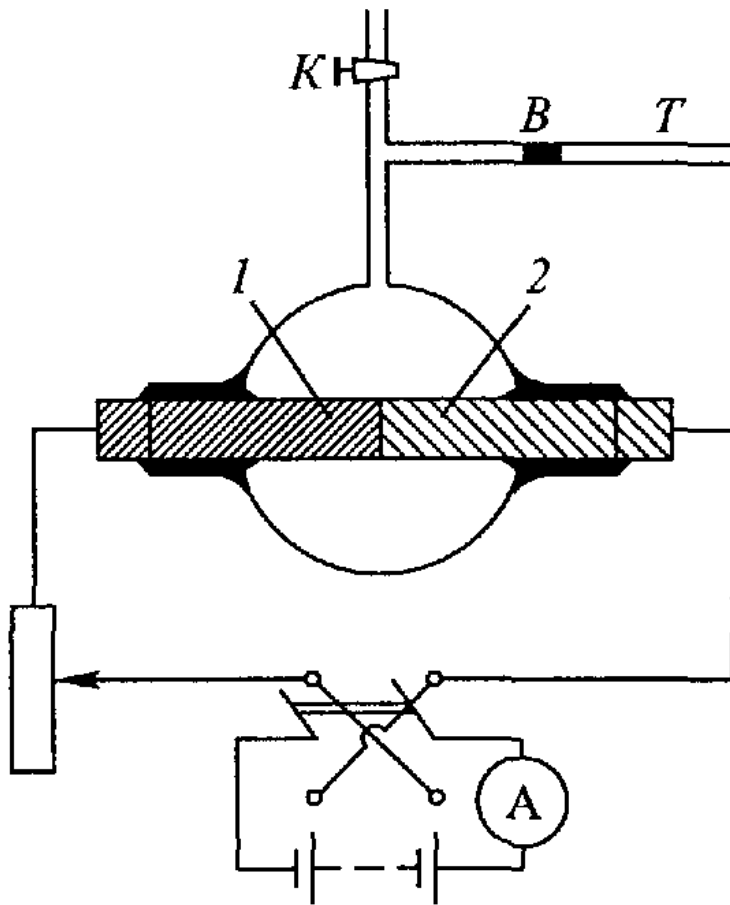


Рис. 347. Схема термобатареи

Эффект Пельтье. [2, §200]



$$Q_{\Pi} = \Pi q = \Pi it.$$

$$P = -\frac{j}{e} (\bar{W}_{\kappa} - e\varphi) \quad , \quad \text{где } N = j/e$$

$$Q_{\Pi} = (P_1 - P_2)St = \frac{1}{e} [(\bar{W}_{\kappa 2} - \bar{W}_{\kappa 1}) + e(\varphi_1 - \varphi_2)]it,$$

$$\Pi_{12} = \frac{1}{e} [(\bar{W}_{\kappa 2} - \bar{W}_{\kappa 1}) + e(\varphi_1 - \varphi_2)]$$

Для невырожденного электронного газа $\bar{W}_{\kappa 1} = \bar{W}_{\kappa 2}; \Rightarrow \Pi_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) = U_{12}^i$.

Рис 342 Наблюдение эффекта Пельтье

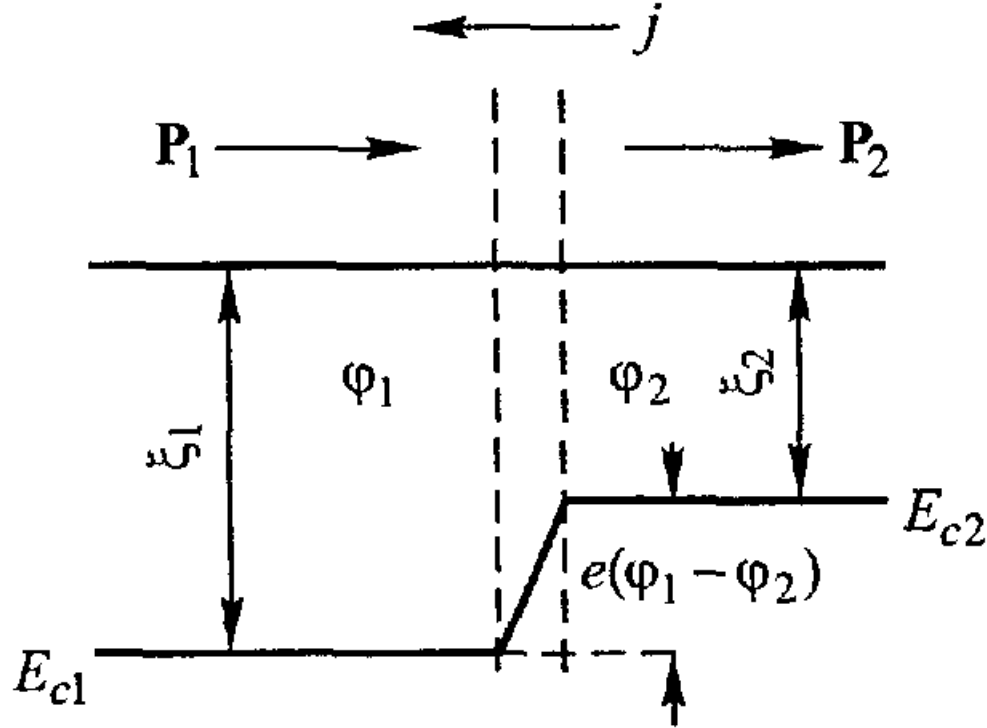


Рис. 343. К определению тепла Пельтье для двух металлов при $T = 0$

Для вырожденного электронного

газа при $T = 0$ $\bar{W}_{K1} = F - E_{c1} = \xi_1$,

$\bar{W}_{K2} = F - E_{c2} = \xi_2$. Но $e(\varphi_1 - \varphi_2) = \xi_1 - \xi_2$,

поэтому $\Pi_{12} = e^{-1}[(\xi_2 - \xi_1) + (\xi_1 - \xi_2)] = 0$.

Если $T \neq 0$, то $\Pi_{12} \neq 0$.

Явление Томсона.

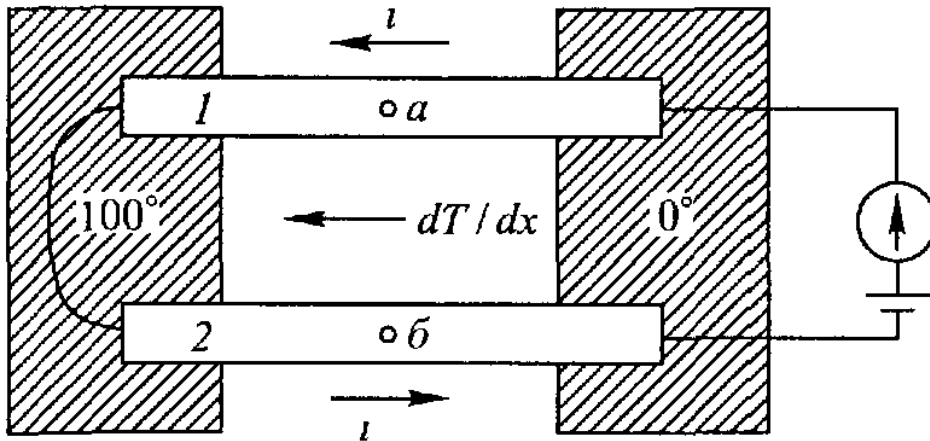


Рис. 344. Наблюдение эффекта Томсона

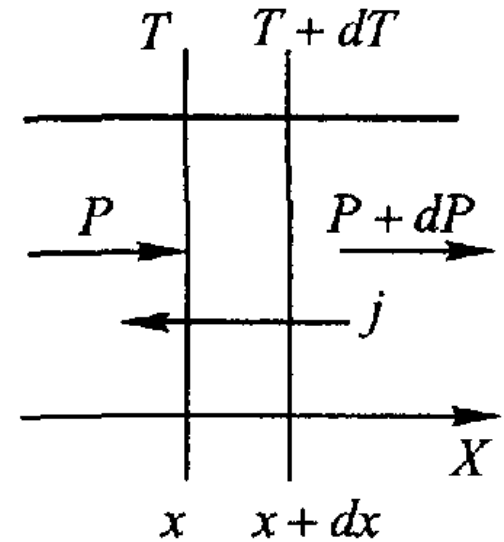


Рис. 345. К объяснению тепла Томсона

$$\frac{Q_T}{\Delta V t} = \sigma \frac{dT}{dx} J - \text{дифф. форма закона, } Q_T = \sigma \Delta T i t - \text{интегр. форма закона,}$$

$$\frac{Q_T}{\Delta V t} = \frac{P(x) - P(x + dx)}{dx} = -\frac{dP(x)}{dx} = \frac{J}{e} \frac{d\bar{W}_K}{dx} - J \frac{d\varphi}{dx}.$$

$$\frac{d\bar{W}_K}{dx} = \frac{d\bar{W}_K}{dT} \frac{dT}{dx}; \Rightarrow \frac{Q_T}{\Delta V t} = \frac{J}{e} \frac{d\bar{W}_K}{dT} \frac{dT}{dx} + J E.$$

Сверхпроводимость. Основные свойства сверхпроводников.

Высокотемпературная сверхпроводимость.

Явление сверхпроводимости было открыто Камерлинг-Оннесом в 1911 году. Переход вещества в сверхпроводящее состояние в отсутствии внешнего магнитного поля является фазовым переходом 2-го рода, в присутствии поля – 1-го рода. Наибольшие значения критической температуры (до 1986 года) было у соединений ниобия и германия 23,2 К.

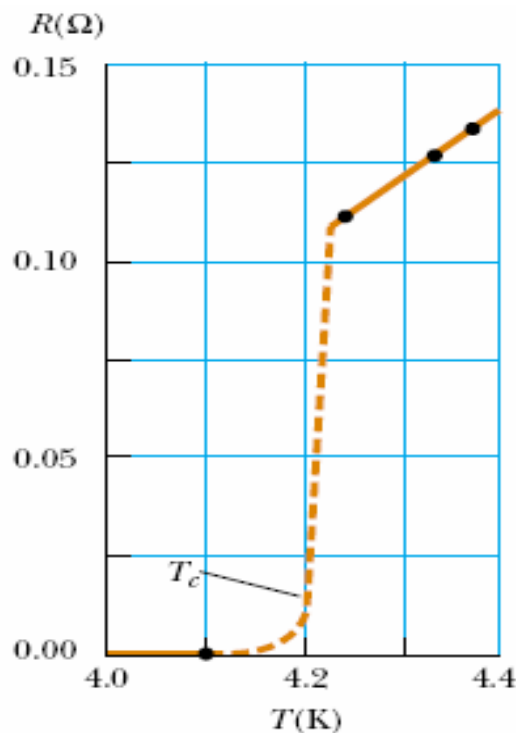
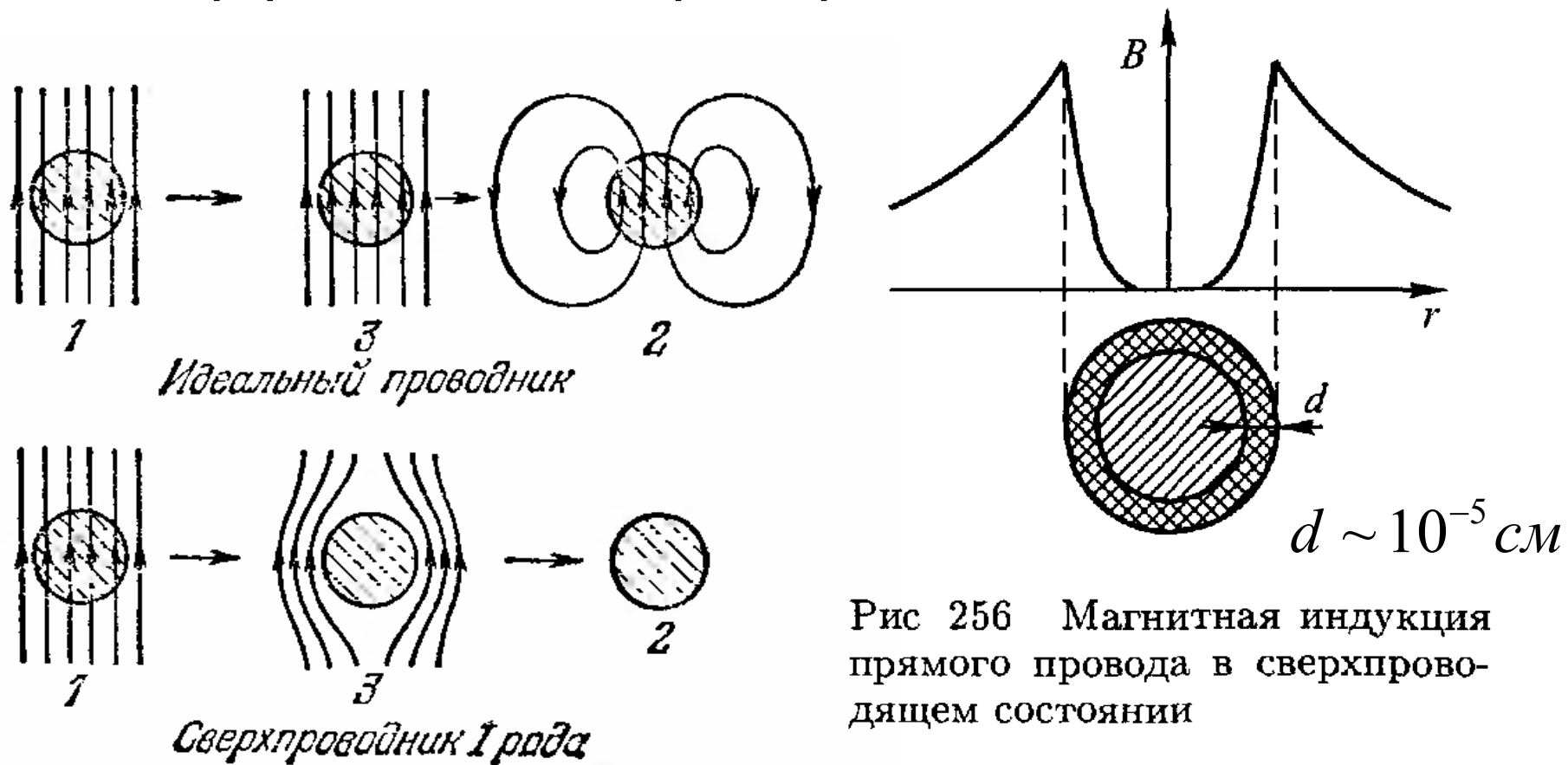


Figure 27.12 Resistance versus temperature for a sample of mercury (Hg). The graph follows that of a normal metal above the critical temperature T_c . The resistance drops to zero at T_c , which is 4.2 K for mercury.

Table 27.3

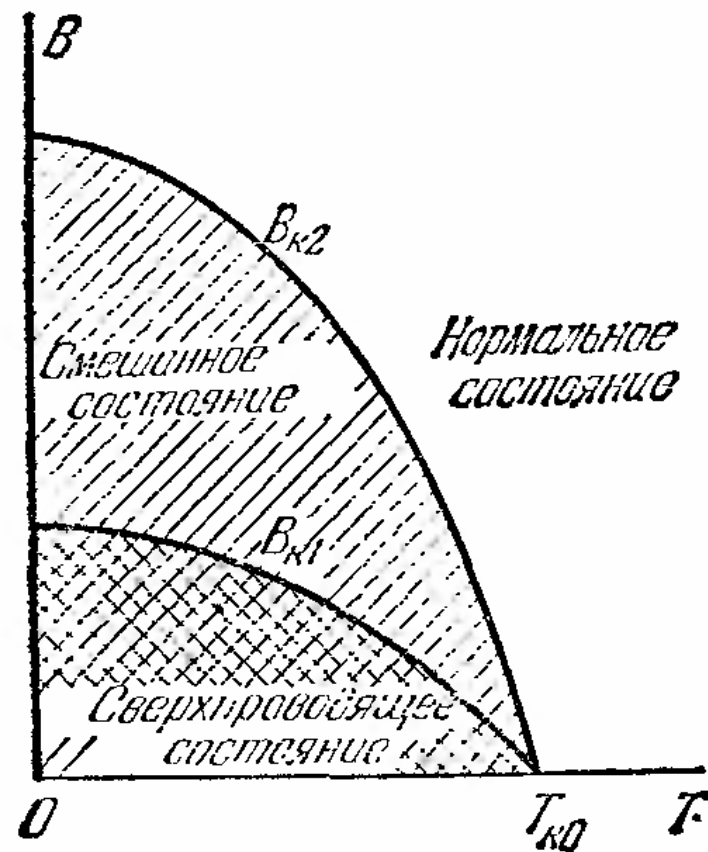
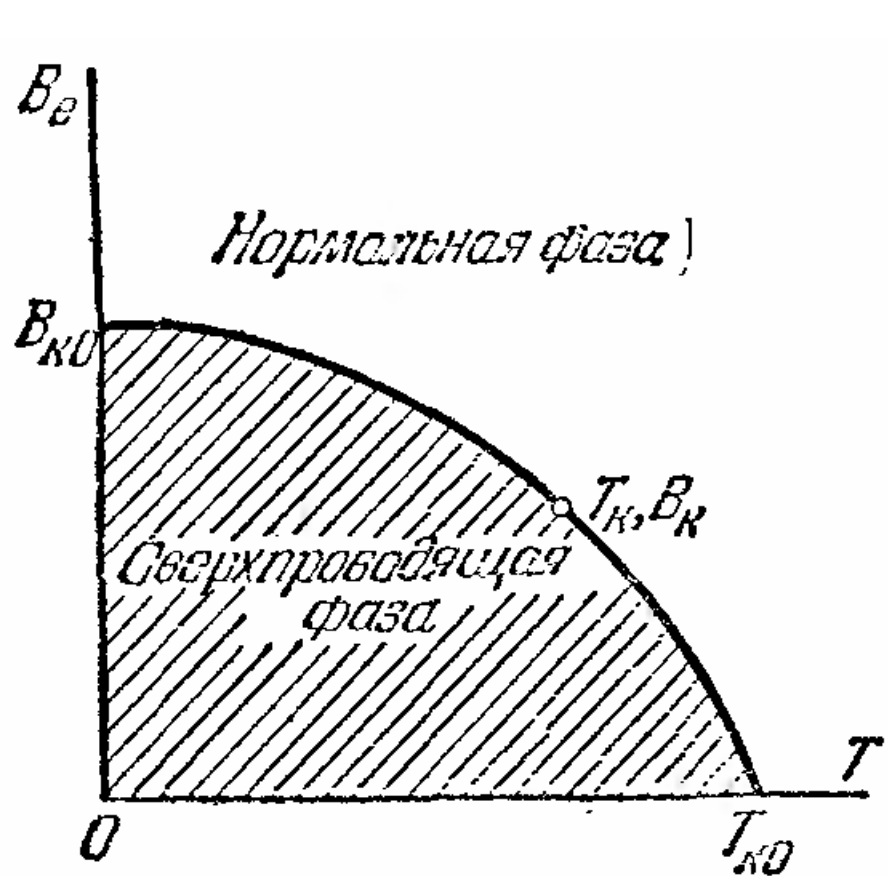
Critical Temperatures for Various Superconductors	
Material	$T_c(K)$
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	134
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125
Bi-Sr-Ca-Cu-O	105
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92
Nb ₃ Ge	23.2
Nb ₃ Sn	18.05
Nb	9.46
Pb	7.18
Hg	4.15
Sn	3.72
Al	1.19
Zn	0.88

Магнитная индукция внутри сверхпроводника. Эффект Мейсснера. Критическое поле.



Укажем для примера, что у олова при 1 К $H_{\text{кр}}$ составляет около $2 \cdot 10^4$ А/м. Поэтому для оловянной проволоки диаметром $2a = 3$ мм критическая сила тока при этой температуре равна

$$i_{\text{кр}} = 2\pi a H_{\text{кр}} = 2\pi \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^4 \approx 180 \text{ А.}$$



Если фактор формы $\beta \neq 0$, то образец сверхпроводника первого рода переходит в нормальное состояние частями (доменами). Сверхпроводники 1-го рода с положительной поверхностной энергией, 2-го рода - с отрицательной.