

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ РАЗДЕЛА КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m Z e^2}, \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_n = -\frac{m Z^2 e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2}, \quad (2)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); Z — заряд ядра.

$$N(\mathcal{E}) = \frac{2\pi}{h^3} (2m_n^*)^{3/2} \mathcal{E}^{1/2}, \quad (3)$$

где m_n^* — эффективная масса электрона.

ДЛЯ РАЗДЕЛА ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВ

$$\frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1)$$

где \bar{u} — средняя скорость теплового движения;
 k — постоянная Больцмана.

$$J = en\bar{v}, \quad (2)$$

где \bar{v} — средняя скорость направленного движения
носителей заряда (скорость дрейфа).

$$J = \frac{e^2 n \bar{l}}{2 m_0 \bar{u}} E = \gamma E, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{e^2 n \bar{l}}{m_0 \bar{u}}, \quad (4)$$

$$\lambda_T = \frac{1}{2} kn \bar{l} \quad (5)$$

$$F(\mathcal{E}) = A \exp\left[-\frac{\mathcal{E}}{kT}\right] \quad (6)$$

$$F(\mathcal{E}) = \left[1 + \exp\left(\frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_f}{kT}\right)\right]^{-1}, \quad (7)$$

где \mathcal{E} — энергия уровня, вероятность заполнения которого определяется; \mathcal{E}_f — энергия характеристического уровня, относительно которого кривая вероятности симметрична. При $T=0$ К функция Ферми обладает следующими свойствами: $F(\mathcal{E})=1$, если $\mathcal{E} \leq \mathcal{E}_f$ и $F(\mathcal{E})=0$, если $\mathcal{E} > \mathcal{E}_f$.

$$n = 2 \int_0^{\mathcal{E}_f} N(\mathcal{E}) F(\mathcal{E}) d\mathcal{E} = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{2m_n^*}{h^2}\right)^{3/2} \mathcal{E}_f^{3/2} \quad (8)$$

$$v_f = \frac{eE}{m_n^* \tau_f} = \frac{eE}{m_n^*} \cdot \frac{\bar{l}}{u_f} \quad (9)$$

где τ_f — время свободного пробега; u_f — тепловая скорость быстрых электронов, обладающих энергией, близкой к энергии \mathcal{E}_f .

$$J = env_f, \quad \gamma = \frac{e^2 n \bar{l}}{m_n^* u_f} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{e^2 n^{2/3} \bar{l}}{h} \left(\frac{8\pi}{3}\right)^{1/3} \quad (11)$$

$$\lambda_D = \frac{h}{m_0 u} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 \mathcal{E}}} \quad (12)$$

$$\bar{l}_T = \frac{1}{\pi N (\Delta a)^2}, \quad (13)$$

где N — число атомов в единице объема материала.

$$\frac{1}{2} k_{\text{yup}} (\Delta a)^2 = kT \quad (14)$$

$$\bar{l}_T = \frac{k_{\text{yup}}}{2\pi N kT} \quad (15)$$

$$\rho_T = \frac{1}{\gamma} = \frac{2\pi e_m^* k u_f}{e^2 k_{\text{yup}}} T = bT \quad (16)$$

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (17)$$

$$\frac{1}{\bar{l}} = \frac{1}{\bar{l}_T} + \frac{1}{\bar{l}_n} \quad (18)$$

где \bar{l}_T и \bar{l}_n характеризуют рассеяние на тепловых колебаниях и на примесях, соответственно.

$$\rho = \frac{m_n^* u_f}{e^2 n \bar{l}} = \rho_T + \frac{m_n^* u_f S_n}{e^2 n} N_n \quad (19)$$

$$\Delta\rho_{\text{ocm}} = a + b(\Delta Z)^2 \quad (20)$$

где a и b — константы, зависящие от природы металла и периода, который занимает в периодической системе элементов примесный атом; ΔZ — разность валентностей металла-растворителя и примесного атома.

$$\rho = \rho_0(1 \pm \varphi\sigma), \quad (21)$$

где $\varphi = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\sigma}$ — коэффициент удельного сопро-

тивления по давлению; σ — механическое напря-
жение в сечении образца.

$$\rho_{снл} = \rho_T + \rho_{осм} \quad (22)$$

где ρ_T — сопротивление, обусловленное рассеянием
электронов на тепловых колебаниях решетки;

$\rho_{осм}$ — добавочное (остаточное) сопротивление,
связанное с рассеянием электронов на неоднород-
ностях структуры сплава.

$$\rho_{осм} = Cx_Ax_B = Cx_B(1-x_B) \quad (23)$$

где C — константа, зависящая от природы сплава;
 x_A и x_B — атомные доли компонентов в сплаве.

$$\alpha_{\rho}^{снл} = \frac{1}{\rho_{снл}} \frac{d\rho_{снл}}{dT} = \frac{1}{\rho_{осм} + \rho_T} \frac{d\rho_T}{dT} \quad (24)$$

$$\alpha_{\rho}^{снл} = \frac{1}{1 + \rho_{осм}/\rho_T} \frac{1}{\rho_T} \frac{d\rho_T}{dT} \approx \frac{\alpha_{\rho}^{mem}}{\rho_{осм} + \rho_T} \quad (25)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu \gamma}}, \quad (26)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

$$I = \Pi \int_0^{\infty} J_0 e^{-z/\Delta} dz = J_0 \Pi \Delta, \quad (27)$$

где Π — периметр сечения проводника; для прово-
да круглого сечения $\Pi = \pi d$.

$$k_R = \frac{R_{\sim}}{R_0} = \frac{S_0}{S_s} = \frac{\pi d^2/4}{\pi d \Delta} = \frac{d}{4\Delta} \quad (28)$$

Формула (28) справедлива при $\Delta \ll d$.

$$R_s = \rho/\Delta \quad (29)$$

$$\rho_{\delta} = \frac{m_n^* u_f}{ne^2 \bar{l}_{\delta}} = \rho_v \left(1 + \frac{\bar{l}}{\delta}\right), \quad (30)$$

где ρ_v — удельное объемное сопротивление мате-
риала.

$$R = \rho_{\delta} \delta \quad (31)$$

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B \quad (32)$$

где α_T^A и α_T^B — абсолютные удельные термо-э.д.с.
контактирующих металлов A и B .

ДЛЯ РАЗДЕЛА ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

$$2\Delta_{0K} = 3.52kT_{св} \quad (1)$$

$$H_{св}(T) = H_{св}(0) [1 - (T/T_{св})^2], \quad (2)$$

где $H_{св}(0)$ — напряженность критического поля при температуре абсолютного нуля.

$$I_{св} = 2\pi r H_{св}(T) \quad (3)$$

ДЛЯ РАЗДЕЛА ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

$$P = \epsilon_0(\epsilon - 1)E = \epsilon_0 \chi E, \quad (1)$$

где χ — диэлектрическая восприимчивость.

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} \quad (2)$$

$$P_u = q\Delta x = \frac{q^2 E}{k_{ymp}} \quad (3)$$

$$P_{\partial p}(t) = P_{\partial p}(0) \exp(-t/\tau_0) \quad (4)$$

где t — время, прошедшее после снятия поля; τ_0 —
постоянная времени (“время релаксации” — от лат.
relaxatio — ослабление).

$$\epsilon^x = \theta_1 \epsilon_1^x + \theta_2 \epsilon_2^x, \quad (5)$$

где ϵ , ϵ_1 , ϵ_2 — соответственно относительные ди-
электрические проницаемости смеси и отдельных
компонентов; θ_1 и θ_2 — объемные концентрации
компонентов, $\theta_1 + \theta_2 = 1$; x — величина, характери-
зующая распределение компонентов и принимаю-
щая значения от +1 до -1.

$$\ln \epsilon = \theta_1 \ln \epsilon_1 + \theta_2 \ln \epsilon_2 \quad (6)$$

$$\tau_0 = R_{u3} C = 0,884 \cdot 10^{-11} \rho \epsilon \quad (7)$$

$$\gamma = qN_T \mu_T \quad (8)$$

где q — заряд носителя, Кл; N_T — число носителей
в единице объема (концентрация), м⁻³; μ_T —
подвижность, м²/(В·с).

$$\gamma = A \exp(-b/T), \quad (9)$$

где $b = (\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_{неп})/k$.

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \gamma_0 \exp[\alpha_{\gamma}(T - T_0)] \\ \rho &= \rho_0 \exp[\alpha_{\rho}(T - T_0)] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где γ_0 — удельная объемная проводимость при
 $T = T_0$; ρ_0 — удельное объемное сопротивление при
 $T = T_0$; $|\alpha_{\gamma}| = |\alpha_{\rho}|$ — соответствующие температурные
коэффициенты.

$$tg \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega C_p R} \quad (11)$$

$$P_a = UI_a = U^2 \omega C_p tg \delta \quad (12)$$

$$tg \delta = \frac{U_a}{U_c} = \omega C_s r \quad (13)$$

$$P_a = IU_a = I^2 r = \frac{U^2 r}{x^2 + r^2} = \frac{U^2 r}{x^2 \left(1 + \frac{r^2}{x^2}\right)} = \frac{U^2 \omega C_s t g \delta}{1 + t g^2 \delta} \quad (14)$$

$$C_p = \frac{C_s}{1 + t g^2 \delta} \quad (15)$$

$$R = r \left(1 + \frac{1}{t g^2 \delta}\right) \quad (16)$$

$$P_a = U^2 \omega C t g \delta, \quad (17)$$

где $[P_a]=[Вт]$; $[U]=[В]$; $[\omega]=[с^{-1}]$; $[C]=[Ф]$.

$$P_a = \frac{U^2}{R} \quad (18)$$

$$P_a = U^2 \omega C t g \delta = U^2 \omega^2 C^2 r \quad (19)$$

$$p = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2 \omega C t g \delta}{Sh} = \frac{U^2 \omega \epsilon \epsilon_0 S t g \delta}{Shh} = E^2 \omega \epsilon \epsilon_0 t g \delta \quad (20)$$

где V —объем диэлектрика между плоскими электродами, $м^3$; E — напряженность электрического поля, В/м.

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (21)$$

$$Eq\bar{l} \geq \mathfrak{A}_u \quad (30)$$

$$rot H = J + J_{cm} = \gamma E + \epsilon \epsilon_0 \frac{dE}{dt} \quad (22)$$

$$P_a = \frac{U^2 f \epsilon S t g \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1.8 \cdot 10^{10} h}, \quad (31)$$

$$rot \dot{H} = j\omega \epsilon \epsilon_0 \dot{E} \quad (23)$$

$$rot \dot{H} = (\gamma_f + j\omega \epsilon \epsilon_0) \dot{E}, \quad (24)$$

где U — приложенное напряжение; f — частота; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость (считаем ее не зависящей от температуры); $t g \delta$ — тангенс угла потерь диэлектрика при температуре окружающей среды; α — температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь; T — температура нагретого за счет диэлектрических потерь материала; T_0 — температура окружающей среды; S — площадь электрода; h — толщина диэлектрика.

$$rot \dot{H} = j\omega \tilde{\epsilon} \epsilon_0 \dot{E}, \quad (25)$$

$$P_T = 2\sigma S(T - T_0), \quad (32)$$

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon - j \frac{\gamma_f}{\omega \epsilon_0} \quad (26)$$

где σ — суммарный коэффициент теплопередачи от диэлектрика во внешнюю среду.

$$t g \delta = \frac{1.8 \cdot 10^{10}}{\epsilon f \rho} \quad (27)$$

$$\mathfrak{A} = Eq\bar{l} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} P_a &= P_T \\ \frac{dP_a}{dT} &\geq \frac{dP_T}{dT} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

$$\mathfrak{A} \geq \mathfrak{A}_u \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{U^2 f \epsilon S t g \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1.8 \cdot 10^{10} h} &= 2\sigma S(T - T_0) \\ \frac{\alpha U^2 f \epsilon S t g \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]}{1.8 \cdot 10^{10} h} &\geq 2\sigma S \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\frac{1}{\alpha} = T - T_0 \quad (35)$$

$$U_{np} = K \sqrt{\frac{\sigma h}{f \epsilon \alpha t g \delta_0}}, \quad (36)$$

где K —числовой коэффициент, равный $1.15 \cdot 10^5$, если все величины, имеющие размерности, выражены в единицах СИ.

ДЛЯ РАЗДЕЛА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНЕТИКОВ

$$M=IV \quad (1)$$

$$I = \chi H \quad (2)$$

$$B = H + 4\pi I \quad (3)$$

$$B=\mu H \quad (4)$$

$$\mu=4\pi\chi+1 \quad (5)$$

размерности перечисленных магнитных характеристик:

Величина	B	H	I	μ	χ
Размерность	гс	э	гс	гс/э	гс/э
Расшифровка	гауссы	эрстеды			

$$M_{m_{orb}} = \frac{|e|h^2}{4\pi m} \sqrt{l(l+1)}, \quad (6)$$

где e, m — заряд и масса электрона; l — орбитальное квантовое число.

$$M_{m_{cn}} = \frac{|e|}{2m} \cdot \frac{h}{2\pi} = 9.273 \cdot 10^{-24} \frac{\partial \mathcal{E}}{m l} \quad (7)$$

$$\chi_{m_n} = \frac{N\mu_n \mu_m^2}{3kT} = \frac{C}{T}, \quad (8)$$

где N — полное число магнитных диполей; μ_n — магнитная проницаемость в вакууме; μ_m — магнитный момент атома; C — константа.

$$\chi_{m_n} = \frac{C}{T - \theta} \quad (9)$$

$$\Delta E = -\mu_n \mu_m H \quad (10)$$

$$\chi_m(T) = AT^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (11)$$

где A — константа; ΔE — ширина запрещенной зоны.

$$E_{ob} = -2Is_1s_2 \cos\varphi \quad (12)$$

где φ — угол между s_1 и s_2 . Когда $I > 0$ (обменная энергия положительна), энергетически выгодна параллельная ориентация спинов, а для случая $I < 0$ — антипараллельная.

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (13)$$

$$\chi = \chi_L + \chi_S + \chi_T, \quad (14)$$

где χ_L — магнитная восприимчивость свободных носителей заряда, которая состоит из парамагнитной части, обусловленной ориентацией спинов, и диамагнитной части, обусловленной электронами и дырками; χ_S — магнитная восприимчивость примесных центров, зависящая от их природы и концентрации, а при неполной ионизации — и от температуры; χ_T — магнитная восприимчивость термических электрически активных дефектов.

$$\mathcal{E}_T = \eta B_{max}^n, \quad (15)$$

где η — коэффициент, зависящий от свойств материала; B_{max} — максимальная индукция, достигаемая в данном цикле; n — показатель степени, принимающий значения от 1.6 до 2 в зависимости от B .

$$P_T = \mathcal{E}_T f V = \xi f^2 B_{max}^2 V, \quad (16)$$

где V — объем образца; ξ — коэффициент, пропорциональный удельной проводимости вещества и зависящий от геометрической формы и размеров поперечного сечения намагничиваемого образца.

$$P_T = \eta B_{max}^n f V \quad (17)$$

$$P_a = I^2 \omega L \operatorname{tg} \delta_M \quad (18)$$

$$\mu_{эф} = \frac{\Phi}{\mu_0 S H} \quad (19)$$

МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

$$H_d l_d - H_0 l_0 = 0 \quad (1)$$

где l_d и l_0 — длины магнита и воздушного зазора соответственно; H_0 — напряженность магнитного поля в зазоре.

$$\mathcal{E}_0 = \frac{B_0 H_0}{2} V_0 \quad (2)$$

где V_0 — объем зазора; $V_0 \sim l_0 S_0$
 $B_d S_d = B_0 S_0 \quad (3)$

$$\mathcal{E}_0 = \frac{B_d H_d}{2} V_d \quad (4)$$

где $V_d \sim l_d S_d$ — объем магнита.

$$\mathcal{E}_d = \frac{\mathcal{E}_0}{V_d} = \frac{B_d H_d}{2} \quad (5)$$

$$\mathcal{E}_D = \frac{B_D H_D}{2} = \mathcal{E}_D^{\max} \quad (6)$$

$$\eta_s = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c} \quad (7)$$

ДЛЯ РАЗДЕЛА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

$$np = n_i^2 = p_i^2, \quad (1)$$

где n_i и p_i — концентрации собственных электронов и дырок.

$$\Delta E_{дон} \sim \frac{e^2}{4\pi\epsilon r} \quad (2)$$

где ϵ — эффективная диэлектрическая проницаемость полупроводника; r — расстояние между электроном и ионом.

$$J_{прям} = J_o \left[\exp\left(\frac{eU}{kT} - 1\right) \right], \quad (3)$$

где J_o — плотность тока, идущего через p — n -переход в запирающем направлении (ток насыщения или обратный тепловой ток); U — внешнее напряжение, приложенное к p — n -переходу;

$$J_o = e \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) \quad (4)$$

где D_p и D_n — коэффициенты диффузии дырок и электронов, см²/сек; L_n и L_p — диффузионные длины неосновных носителей заряда, см; n_p и p_n — концентрации неосновных носителей заряда, см⁻³.

$$U_{обр} = \frac{\epsilon}{2eN} E_{max}^o \quad (5)$$

где E_{max}^o — величина электрического поля, вызывающего пробой; N — концентрация электрически активной примеси в менее легированной области в (p - или n -области).

$$\alpha = \gamma \beta^* \alpha^*, \quad (6)$$

где γ — эффективность эмиттера; β^* — коэффициент переноса носителей в базе; α^* — коэффициент умножения коллектора.

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\rho_s W}{\rho_b L_{n_s}}}, \quad (7)$$

где W — эффективная ширина базы, см; ρ_s — удельное сопротивление материала эмиттера, ом·см; ρ_b — удельное сопротивление материала базы; L_{n_s} — диффузионная длина электронов в эмиттере (в случае n — p структуры).

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W^2}{L_{n_b}} \right), \quad (8)$$

где L_{n_b} — диффузионная длина электронов в базе (в случае n — p — n структуры).

$$\alpha^* = 1 + \frac{p_k \mu_{p_k}}{n_k \mu_{n_k}}, \quad (9)$$

где p_k — концентрация дырок в коллекторе (концентрация неосновных носителей); n_k — концентрация электронов в коллекторе (концентрация основных носителей); μ_{p_k} — подвижность дырок в коллекторе; μ_{n_k} — подвижность электронов в коллекторе. Обычно коэффициент $\alpha^* \approx 1$.