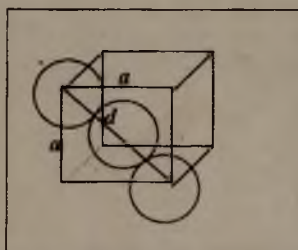


22
311-30

А. Тешабоев, Э.А. Мусаев, Н.М. Суфиходжаев

ҚАТТИҚ ЖИСМЛАР ФИЗИКАСИДАН МАСАЛАЛАР ТЎПЛАМИ



Андижон — 2001

8. 71
30.05.14

Тақризчилар: физика – математика фанлари доктори,
профессор Р. Расулов,
доцент У.И. Қосимов
Маъсул муҳаррир: физика – математика фанлари доктори,
профессор С. Зайнобидинов

Ушбу қўлланмада қаттиқ жисмлар физикасининг энг муҳим бўлимларига доир масалалар берилган. Тўпلام етти бобдан иборат. I бобда кристаллар тузилишига оид қисқача маълумот ва масалалар тақдим қилинган. II боб ўз ичига қаттиқ жисмларнинг иссиқлик сиғими, иссиқлик ўтказувчанлиги, иссиқликдан кенгайиши (қисқариши) хоссаларини акс эттирган масалаларни олган. III боб механик кучланишлар таъсирида қаттиқ жисмларнинг шаклан ўзгаришлари (деформациялар) ҳақидаги масалаларга бағишланган. IV, V, VI бобларда қаттиқ жисмларнинг асосий турлари – металллар, ярим ўтказгичлар ва диэлектрикларнинг асосий хоссаларига тегишли масалалар ўрин олган. Охириги VII бобда қаттиқ жисмлар магнетик хоссалари ҳақидаги назарий билимларни мустаҳкамлашга ёрдам қиладиган масалалар туркуми баён қилинган.

Қўлланма университетлар ва инженер–техник олий ўқув юртларининг қаттиқ жисм физикаси махсус фанида таълим олаётган бакалавр талабаларига мўлжалланган. Аммо университетларнинг аспирантлари ва магистр талабалари савиясига мос келадиган бир мушарраф ҳам бор. Қўлланмадан мазкур фан соҳасида ишлаётган аспирантлар, ўқитувчилар фойдаланиши ҳам мумкин.

А. Тешабоев, Э.А. Мусаев, Н.М. Сўфихўджаев

ҚАТТИҚ ЖИСМЛАР ФИЗИКАСИДАН МАСАЛАЛАР ТЎПЛАМИ

Ушбу масалаар тўплами Андижон Давлат универ-
ситетининг ўқув услубий ҳайъати томонидан
бакалавр талабалар учун қўлланма сифатида
тавсия этилган

СЎЗ БОШИ

Маълумки, қаттиқ жисмлар фан ва техникада, амалий ҳаётда энг катта ўрин тутади, уларнинг хоссалари назарий ва тажрибавий жиҳатдан физиканинг тадқиқот усуллари ёрдамида ўрганилади, амалий қўлланиш учун тавсиялар ишлаб чиқилади ва бошқа соҳаларнинг мутахассислари билан биргаликда жамият хўжалигининг турли соҳаларида жорий қилинади.

Қаттиқ жисмлар физикаси соҳасида ўзбек тилида ўқув қўлланмалари яратиш ишига энди киришилди. Бу долзарб муаммонинг зарурий бир қисми қаттиқ жисмлар физикасидан масалалар тўплами яратишдир. Олий ўқув юрғларида икки босқичли таълим — 4 йиллик бакалавр ва 2 йиллик магистр таълимлари — жорий қилинган бир даврда биз мазкур масалалар тўпламини асосан бакалавр талабаларига мўлжалладик.

Қаттиқ жисмлар физикаси соҳаси жуда кенг соҳа бўлганлиги сабабидан, унинг айрим бўлимларига оид масалаларни танладик. Қаттиқ жисмлар механикасидан фақат деформацияларга оид масалаларни жойлаштирдик. Кристаллар тузилишига тегишли қисқа маълумот билан чеграландик. Асосий ўринни қаттиқ жисмларнинг иссиқлик хоссалари, металллар, ярим ўтказгичлар ва диэлектриклар хоссаларини ўрганишга қаратилган масалаларга бердик. Қаттиқ жисмларнинг магнитик хоссаларини акс эттирадиган унча кўп бўлмаган масалалар туркуми кифоя қилар деб ҳисобладик.

Талабаларга қулайлик ҳосил қилиш мақсадида ҳар бир боб бошида қисқача назарий маълумот берилди, айрим мураккаб масалалар ечими «жавоблар»да кераклигича баъгафсил келтирилди, айрим жойларда кўрсатмалар ҳам бор. Масалаларни ечиш намуналари беришни маъқул топдик. Албатта, ўрга мактабларда бериладиган билимларни эътиборга олиб, уларни олий ўқув юртида бериладиган билимлар билан узвий боғланиши зарурлиги масалалар танлашда ҳисобга олинди.

Қўлланмада I, II, III, V ва VII бобларни А.Тешабоев, IV боб ва жадвалларни Э.А. Мусаев, VI бобни ва элементлар даврий тизими жадвалини Н.М. Сўфихўжаев тузган. Қўлланмани нашрга тайёрлашда катта ердам қилган Шухратбек ва Шукурбек Мусаевларга миннатдорчилик билдирамиз.

Ушбу ўқув қўлланма ўзбек тилида қаттиқ жисмлар соҳасида нашр қилинган дастлабки қўлланмалардан бири бўлганлиги тўғрисида айрим камчиликларга эга бўлиши табиийдир.

Агар ҳурматли ўқувчилар ҳақида ўз танқидий мулоҳазаларини, истаklarини бизга етказсалар албатта уларни миннатдорчилик билан қабул қиламиз.

Бизнинг манзилгоҳ : Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129

Муаллифлар:



1890

КРИСТАЛЛАР ТУЗИЛИШИ

Бир a қиррали элементар катакка Z та r радиусли атом (шар) тўғри келганда атомлар эгаллаган фазо ҳиссаси ифодаси

$$F = Z \frac{4}{3} \pi \frac{r^3}{a^3}. \quad (1.1)$$

$2N$ иондан ташкиллаган кристалнинг тўла ўзаро таъсир (боғланиш) энергияси

$$U(r) = -N \left(\frac{Ae^2}{r} - \frac{B}{r^n} \right) \quad (1.2)$$

кўринишда бўлади. бунда биринчи ҳад қарама – қарши ишорали ионларнинг тортишини энергияси, иккинчи ҳад уларнинг итари – шини энергияси.

Кристалнинг қисилувчанлиги

$$\chi = - \left(\frac{1}{V} \right) \left(\frac{dV}{dP} \right), \quad (1.3)$$

бунда V – ҳажм, P – босим. Ички энергия ўзгариши

$$dU = -pdV \text{ бўлганлиги сабабли } \frac{1}{\chi} = V \left(\frac{d^2U}{dV^2} \right). \quad (1.3')$$

Ионлар кристалда ионлар орасидаги ўзаро таъсирни А. Маделунг доимийси аниқлайди :

$$A = \sum_j \pm (1/d_{ij}), \quad (1.4)$$

бундаги $\hat{a}_{ij} = \frac{r_{ij}}{r}$ бўлиб, r_{ij} – мос санали ионлар, r эса икки қўшни ионлар оралиги.

$$1 \text{ киломол кристал ҳажми } V_A = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1.5)$$

бунда μ – модданинг киломоли массаси, ρ – зичлиги.

1 киломол кристалдаги элементар катаклар сони :

$$N_0 = \frac{V_A}{V_0} \quad \text{ёки} \quad N_0 = \frac{N_A}{n_0}, \quad (1.6)$$

бу ифодада V_0 — элементар катак ҳажми, N_A — Авогадро сони, n_0 — бир элементар катакка тўғри келган бир хил атомлар сони.

Содда кубик панжара доимийсининг бошқа параметрлар орқали ифодаси:

$$a = 3 \sqrt{\frac{\mu n_0}{\rho N_A}}. \quad (1.7)$$

Кубик панжарада $[m, n, p]$ Миллер индекслари орқали белгиланган йўналиш даври

$$\ell = a \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}. \quad (1.8)$$

$[m_1, n_1, p_1]$ ва $[m_2, n_2, p_2]$ йўналишлар орасидаги бурчак α аниқланадиган ифода :

$$\cos \alpha = \frac{m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2} \sqrt{m_2^2 + n_2^2 + p_2^2}}. \quad (1.9)$$

Миллер индекси билан аниқланган (h_1, k_1, l_1) ва (h_2, k_2, l_2) текисликлар орасидаги бурчак топиладиган ифода :

$$\cos \beta = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}}. \quad (1.10)$$

$[m, n, p]$ йўналиш ва (h, k, l) текислик орасидаги бурчак γ аниқланидиган ифода :

$$\cos \gamma = \frac{mh + nk + pl}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \quad (1.11)$$

Икки параллел (h, k, l) текислик орасидаги масофа :

$$d_{hkl} = 2\pi / b_{hkl}. \quad (1.12)$$

бунда b_{hkl} — тескари панжара векторининг қиймати .

Кубик панжара ҳолида

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \quad (1.13)$$

Кристал панжарасидаги Шотки ва Френкел нуқсонлари зичликлари :

$$N_{\text{ш}} = N \exp(-U_{\text{ш}}/kT), \quad (1.14)$$

$$N_{\text{ф}} = N \exp(-U_{\text{ф}}/2kT), \quad (1.15)$$

бу ерда N — ҳажм бирлигидаги тугунлар сони, $U_{\text{ш}}$ ва $U_{\text{ф}}$ мос ра — вишда, Шотки ва Френкел нуқсонлари ҳосил бўлиши энергияси.

Кристал тўғри панжараси векторлари $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ лар тескари панжара векторлари $\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3$ билан қуйидагича боғланган :

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{V_0} [\vec{a}_2 \vec{a}_3], \quad \vec{b}_2 = \frac{2\pi}{V_0} [\vec{a}_3 \vec{a}_1], \quad \vec{b}_3 = \frac{2\pi}{V_0} [\vec{a}_1 \vec{a}_2], \quad (1.16)$$

бунда $V_0 = \vec{a}_1 [\vec{a}_2 \vec{a}_3]$ элементар катак ҳажми.

λ тўлқин узунликли рентген нурларининг кристалдан қайтанда ҳосил қиладиган интерференцион максимумлари ифо — даси (Вулф — Брэгг ифодаси) :

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (1.17)$$

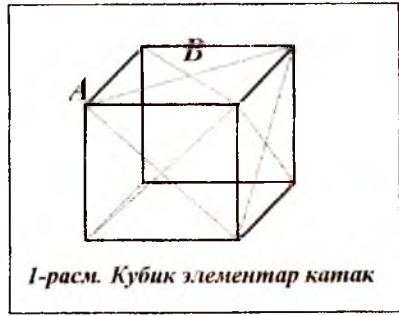
бунда d — атомларнинг икки қўлни текисликлари оралиги, n — интерференцион максимум тартиби, θ — рентген нурлари қайтиш бурчаги.

Масалалар ечишга мисоллар

1-мисол. Ёқий марказлашган кубик панжаранинг бир элементар катагига тўғри келадиган тугунлар сони топилсин.

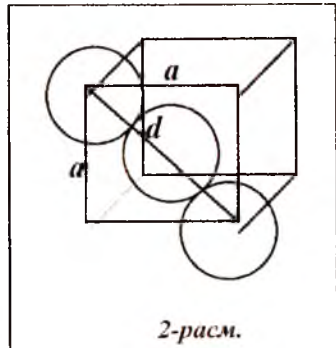
Ечиш. Кубнинг учидаги (расмга қаранг) А тугун 8 та элементар катакка мансуб бинобарин, бир элементар катакка унинг $\frac{1}{8}$ қисми тегишли.

Бундай тугунлар сони 8 та. Демак, бир элементар катакка $8 * \frac{1}{8} = 1$ та бундай (А) тугун тўғри келади. В тугун куб ёқининг диагоналлари кесишган нуқтада жойлашган ва у икки қўшни элементар катакка мансуб, биттасига унинг $\frac{1}{2}$ қисми тўғри келади. Аммо, ёқлар сони ва В тугунлар сони 6 та. Демак, бир элементар катакка $6 * \frac{1}{2} = 3$ та В тугунлар тўғри келади. Бир элементар катакка тўғри келадиган тугунларнинг умумий сони $1 + 3 = 4$ та бўлади.



2-мисол. Ёқий марказлашган кубик панжарали калций кристалининг панжара доимийси a ва энг яқин атомлари орасидаги масофа d аниқлансин. Мазкур кристал зичлиги $\rho = 1550 \text{ кг/м}^3$.

Ечиш. Агар панжара атомларини зич жойлашган шарлар деб фараз қилсак, элементар катак ёқи геометриясида $d = \frac{a}{\sqrt{2}}$ эканлигини топамиз.



Аммо, элементар катак ҳажми $V_0 = a^3$. 1 киломол кристаллнинг

V_a ҳажмидаги элементар катаклар сони $N_0 = \frac{N_a}{n_0} = \frac{N_a}{4}$.

Чунки бизнинг ҳолда $n_0 = 4$.

$V_0 = \frac{V_a}{N_0} = a^3$, бошқа томондан, $V_a = \frac{\mu}{\rho}$. Демак,

$$a^3 = \frac{V_a}{N_0} = \frac{\mu n_0}{\rho N_a} = \frac{4\mu}{\rho N_a} \text{ ёки } a = \sqrt[3]{\frac{4\mu}{\rho N_a}}.$$

Калций учун $\mu = 40$ к/мол. N_a ва ρ нинг қийматлари маълум.

Бинобарин, $a = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 40}{1550 \cdot 6.03 \cdot 10^{26}}} = 5.56 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 5.56 \text{ \AA}$.

Демак, ечим: $d = \frac{a}{\sqrt{2}} = 3.93 \text{ \AA}$.

Масалалар

- 1.1. Содда, ёқий ва ҳажмий марказлашган кубик панжараларда бир элементар катакчада неча атом бўлади?
- 1.2. Атомларни бир бирига тегиб турган r радиусли шарчалар деб ҳисоб—лаб, содда, ёқий ва ҳажмий марказлашган кубик панжараларда атомлар эгаллаган нисбий ҳажм ҳисоблансин. Элементар катакча қирраси a га тенг деб олинсин.
- 1.3. NaCl кристали учун (1.2) ифодадаги n кўрсаткич ҳисоблаб топилсин. NaCl нинг қисилувчанлиги $\chi = 3,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^2/\text{Н}$, $A = 1,75$, ионларнинг мувозанатий оралиги $r_0 = 2,81 \cdot 10^{-11} \text{ м}$. Ион заряди e га тенг.
- 1.4. Қарама—қарши ишорали $2N$ иондан ташкиллланган кристаллнинг мувозанат ҳолатидаги тўла ўзаро таъсир энергияси топилсин.

- 1.5. Маделунг доимиси A ни тенг узоклашган мусбат ва манфий ионлар учун ҳисоблансин. Бу масалани ечишда (1.4) ифодадан фойдаланинг, бунда «+» ионлар орасидаги тортишишни, «-» эса итаришишни билдиради.
- 1.6. Ёқий марказлашган куб панжарали миснинг 1 м^3 ҳажмида неча элементар катак бор ?
- 1.7. Ҳажмий марказлашган куб панжарали волфрам кристаллида панжара доимийси a ва энг яқин қўшни атомлари орасидаги масофа d топилсин.
- 1.8. Ёқий марказлашган куб панжарали неон кристаллининг ρ зичлиги аниқлансин. Унинг панжара доимийси $a = 0,45 \text{ нм}$.
- 1.9. Гексагонал панжарада икки a ва c панжара даврининг нисбати $c/a = \sqrt{8/3}$ ҳисоблаб топилган. Зичлиги $\rho = 1,74 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ бўлган магний кристали учун a ва b лар аниқлансин .
- 1.10. $T = 2 \text{ К}$ да гексагонал кристал шаклида бўладиган гелийнинг зичлиги топилсин. Шу шароитда $a = 0,397 \text{ нм}$.
- 1.11. Шотки нуқсони ҳосил бўлиши энергияси $U_{\text{ш}} = 1 \text{ эВ}$, кристал панжарасидаги тутунлар сони $N = 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, $T = 300 \text{ К}$ температурада Шотки нуқсонлари зичлиги қандай?
- 1.12. $T = 400 \text{ К}$ да Френкел нуқсонлари зичлиги 10^{12} м^{-3} бўлса, у ҳолда бу нуқсонлар ҳосил бўлиши энергияси қанча бўлади? Умумий тутунлари сони $N = 8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ деб ҳисоблансин.
- 1.13. Содда куб панжаранинг текисликлар системаси (111) кўрсаткичлар билан берилган. Агар панжара доимийси $a = 0,3 \text{ нм}$ бўлса, қўшни текисликлар орасидаги бурчак ҳисоблансин.
- 1.14. Куб панжарада икки текислик (010) ва (011) Миллер кўрсаткичлари билан берилган. Текисликлар орасидаги бурчак аниқлансин .
- 1.15. Куб панжарада (011) текислик ва [111] тўғри чизик ора

сидаги бурчак ҳисоб қилинсин.

- 1.16. Кубик кристалнинг тўғри панжараси векторлари $\vec{a}_1 \perp \vec{a}_2 \perp \vec{a}_3$ ва $\vec{a}_1 = \vec{a}_2 = \vec{a}_3$ шаклда ифодаланади. Шу ҳол учун тескари панжара векторлари $\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3$ ларни ёзинг.
- 1.17. Кристалдаги атомлар икки қўшни текисликлари орасидаги масофа $d = 5 \cdot 10^{-10}$ м бўлса, $\nu = 10^{18}$ Гц такрорийликли рентген нурлари қандай бурчак остида қайтганида биринчи интерференцион максимум ҳосил бўлади?
- 1.18. Кристал панжарасидаги атомлар қўшни текисликлари оралиги $4 \cdot 10^{-10}$ м бўлса, $\theta = 45^\circ$ бурчак остида қайтишда интерференция биринчи максими юз бериши учун рентген нурлари тўлқин узунлиги қандай бўлиши керак?
- 1.19. Муайян кристалда Шоттки вакансияси ҳосил бўлиши энергияси 2 эВ. Агар бу модданинг суюлиш температураси 1000 К дан ортиқ бўлмаса, вакансиялар барча атомларга нисбатан ҳамма вақт $10^{-8}\%$ дан кам бўлишлигини исботлашг.

ҚАТТИҚ ЖИСМАЛАРНИНГ ИССИҚЛИК ХОССАЛАРИ

2.1. Қаттиқ жисмларнинг иссиқлик сиғими. Фононлар.

Жисмнинг иссиқлик сиғими C унинг ички энергияси E дан температура T бўйича олинган ҳосила билан ифодаланадиган катталикдир:

$$C = \frac{\partial E}{\partial T}. \quad (2.1)$$

Бошқача қилиб айтганда, жисмнинг температурасини 1° қадар ўзгартирганда унинг ички энергияси қанча ўзгариши иссиқлик сиғимини аниқлайди.

Модданинг солиштирма иссиқлик сиғими деб унинг бир масса бирлигига тенг миқдорини 1° қадар иситиш (совутиш) учун сарфланадиган (ажраладиган) иссиқлик миқдорига айтилади:

$$C = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad (2.2)$$

бунда m – жисмнинг массаси, ΔQ – олинган (берилган) иссиқлик миқдори, ΔT – жисм температураси ўзгариши.

Модданинг моляр иссиқлик сиғими деб унинг бир грамм молекуляр миқдорини 1° қадар иситишга (совутишга) мос келадиган иссиқлик миқдорига айтилади

$$C_\mu = \frac{\mu}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \mu C, \quad (2.3)$$

бунда μ – граммолекула массаси.

Иссиқлик сиғими турли шароитда ўлчаниши мумкин. Масалан, иссиқлик сиғими босим ўзгармас бўлганда, ҳажм ўзгармас бўлганда ўлчанади. Температураси ўзгарганда қаттиқ жисмларнинг ҳажми жуда оз ўзгаргани учун қаттиқ жисмларнинг одатда ўзгармас ҳажмдаги иссиқлик сиғими ҳисоб қилинади :

$$C = C_V = \frac{dE}{dT}.$$

Тебранаётган атомнинг (уч ўлчовли тебрашгичнинг) ўртача тула энергияси $3kT$ га тенг дейиладиган классик қонуниятга асосан,

элементар катагида 1 атом бўлган ва граммоллекуласи (граматоми) N_A та заррадан ташкил тошган қаттиқ жисмнинг моляр ички энергияси

$$E_{\text{и}} = 3N_A kT = 3RT, \quad (2.4)$$

бинобарин унинг иссиқлик сизими

$$C_{\text{и}} = 3R \approx 6 \text{ кал/моль}\cdot\text{К} \quad (2.5)$$

бўлади (Дюлонг ва Пти қонуни).

Кимёвий мураккаб жисмларнинг моляр иссиқлик сизими ифодаси :

$$C_V = n \cdot 3R \quad (2.6)$$

кўринишида бўлиб, бунда n – бирикманинг кимёвий ифодаси – даги зарраларнинг умумий сони . Масалан, NaCl кристалида $n = 2$ бўлади .

Ихтиёрий миқдордаги граммол модда иссиқлик сизими аниқлашда юқоридаги ифодаларни граммоллар сонига кўпайтириш керак.

Етарлича паст температураларда Дюлонг ва Пти қонуни бажарилмайди. Бу соҳада қаттиқ жисмлар иссиқлик сизими квант механика асосида Дебай келтириб чиқарган қонунга бўйсунди, бу қонун кристаллар атомлари (ионлари) тебранишларининг барча тармоқларини ҳисобга олади.

Кристалнинг тўла ички энергияси акустик ва оптик тармоқлар тебранишлари энергиялари йиғиндисидан иборат бўлади, акустик тармоқлар бўйича тебранаётган атомлар энергиялари йиғиндисини интеграл билан алмаштирилса ва ҳар бир оптик тармоқ фақат ўзининг битта такрорийлигига эга деб ҳисобланса, кристал тебранишларининг тўла энергияси :

$$E = E_0 + \frac{9N_A \hbar^3 \omega_m^3}{\omega_m^3} \int_0^{\omega_m} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} + N \sum_{j=1}^{3s} \frac{\hbar\omega_j}{\exp(\hbar\omega_j/kT) - 1}.$$

кўринишда ёзилади, бунда E_0 – кристалнинг $T = 0 \text{ К}$ даги энергияси (нол энергия), s – элементар катакдаги атомлар сони, ω_m – акустик тармоқларнинг максимал тебраниш такрорийлиги (Дебай такрорийлиги).

Дебай температураси :

$$\theta_D = \frac{\hbar \omega_m}{k} \quad (2.8)$$

юқори ва паст температуралар соҳаларини чегаралайди.

$$\text{Дарвоқеъ} \quad E_0 = \frac{9}{8} R \theta_D \quad (2.9)$$

Юқори температуралар соҳасида $T \ll \theta_D$, (2.1) ва (2.7) ассосида Дюлонг ва Пти қонуни ифодаси олинади.

Паст температуралар соҳасида $T \ll \theta_D$ оптик тебранишлар уйғонмаган, бинобарин, кристал энергиясига уларнинг ҳиссасини назарга олмаслик мумкин. Демак, бу ҳолда

$$E = E_0 + \frac{9N\hbar}{\omega_m^3} \int_0^{\omega_m} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1} = \frac{9NkT}{\theta_D} \int_0^{\frac{\theta_D}{T}} \frac{x dx}{e^x - 1} \quad (2.7')$$

$\frac{\hbar\omega}{kT} = x$ деб белгиланган, $x_m = \frac{\hbar\omega_m}{kT} \ll 1$, бўлганлигидан $x_m = \infty$

деб олиш мумкин. Аммо, $\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$ ва $E = E_0 + \frac{3\pi^4 kT^4}{5\theta_D^3} N$ (2.10)

1 граммолекула содда модда учун $N=N_A$, $kN_A=R$ эканлигини эътиборга олсак, моляр иссиқлик сизими учун

$$C_v = \frac{12\pi^4 R}{5} \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \quad (2.11)$$

ифода олинади.

Фононлар. Бу квазизарралар тушунчаси кристал атомлари (ионлари) тебранишларини тавсифлаш учун киритилган. Фонон энергияси (таржимаси: товуш зарраси) кристал тебранишлари энергиясининг энг кичик улуши (кванти) га тенг бўлган ($E = \hbar\omega$) ва унга мос $p = \hbar/\lambda = \hbar q$ импульсга эга бўлган квазизаррадир. У Бозе–Эйнштейн статистикасига бўйсунди. ω – такрорийликли

тебранишларга тўғри келган фононлар сони Планк ифодасидан аниқланади:

$$N_{\phi} = \left[e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1 \right]^{-1} \quad (2.12)$$

Фононнинг тезлиги $v_{\phi} = dE/dp$ товуш тўлқинларнинг турувчи тезлигидир. Кичик E лар (катга λ лар) соҳасида :

$$v_{\phi} + E/p = \omega\lambda/2\pi = v\lambda. \quad (2.13)$$

Эластиклик назариясига асосан, бўйланма v_{\parallel} ва кўндаланг v_{\perp}

$$\text{тўлқинларнинг тезлиги : } v_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad v_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2.14)$$

бунда ρ — зичлик, E ва G Юнг ва силжиш модуллари.

Ўртача тезлик v_0 ушбу муносабатдан аниқланади :

$$3/v_0^3 = 2/v_{\perp}^3 + 1/v_{\parallel}^3 \quad (2-15)$$

Масалалар ечишга мисол

Агар иситиш: 1) $T_1 = 0_d$ 2) $T_2 = 2$ К температуралардан бошланган бўлса, шу икки ҳол учун $m = 20$ г массали NaCl кристаллини $\Delta T = 2$ К қадар иситиш учун зарур бўлган иссиқлик миқдори ҳисоблансин. NaCl учун $\theta_d = 320$ К.

Ечиш: Берилган иссиқлик миқдори $\Delta Q = (m/\mu)c_{\mu}\Delta T$ кўринишда ифодаланади, m — жисмнинг массаси, μ — граммол массаси, c_{μ} — моляр иссиқлик сифими. Дебай назариясига асосан бир атомли кристаллнинг моляр иссиқлик сифими, умуман айтганда, (2.7) ифодани дифференциаллашдан ҳосил қилинади :

$$c_{\mu} = \frac{dE}{dT} = 3R \left\{ 12 \left(\frac{T}{\theta_d} \right)^3 \int_0^{\theta_d/T} \frac{x dx}{e^x - 1} - \frac{3(\theta_d/T)}{e^{\theta_d/T} - 1} \right\}$$

1) Бунга $\theta_d/T_1 = 1$ шартни қўйсақ ва $\int_0^1 \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = 0,225$ эканлигини

эътиборга олсак, $c_{\mu} = 2,88R$ бўлишлигини топамиз.

Демак, $\Delta Q = 20 \cdot 2,88 \cdot 2R / 58,5 = 1,97 \cdot 8,31 \text{ Ж} = 16,37 \text{ Ж}$.

2) $T_2 = 2 \text{ К}$ ҳол учун (2.11) ифодадан фойдаланиш мумкин.

$$c_{\mu} = \frac{12\pi^4 R}{5} \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3$$

Сизимни иссиқлик миқдори ифодасига қўямиз :

$$\Delta Q = \frac{12\pi^4 R m}{5\theta_D^3 \mu} \int_{T_2}^{T_2 + \Delta T} T^3 dT$$

Бундан

$$\Delta Q = \frac{12\pi^4 R m}{5\theta_D^3 \mu} \left[\frac{(T_2 + \Delta T)^4}{4} - \frac{T_2^4}{4} \right]$$

Масалада берилган қийматларни қўйсак, $\Delta Q = 1,22 \text{ мЖ}$.

Масалалар

- 2.1. Дюлонг ва Пти қонунига асосан $V = 1 \text{ м}^3$ ҳажмли алюминий бромид AlBr_3 кристалининг иссиқлик сизими ҳисоблансин. Бу модданинг зичлиги $\rho = 3,01 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
- 2.2. Мазкур қонундан фойдаланиб 1) миснинг, 2) темирнинг, 3) алюминийнинг солиштирма иссиқлик сизими топилин.
- 2.3. Агар $0,025 \text{ кг}$ оғирликдаги метал шарчани 10° С дан 30° С гача иситиш учун 117 Ж иссиқлик сарфланган бўлса, Дюлонг ва Пти қонунидан фойдаланиб, шарча қандай моддадан ясалганлиги аниқлансин.
- 2.4. Дюлонг ва Пти қонунини тадбиқлаб, алюминийнинг солиштирма иссиқлик сизими платинаникидан неча марта кўплигини аниқланг.
- 2.5. 400 мс тезлик билан қўрғошин ўқ деворга урилади ва унда тикилиб қолади. Ўз кинетик энергиясининг 10% ни ўқни иситишга сарф бўлади деб ҳисоблаб, ўқнинг неча даражага исиганлиги топилин. Қўрғошиннинг солиштирма иссиқлик сизими классик қонун асосида ҳисоблансин.

- 2.6. $t_1 = 10^\circ \text{C}$ дан $t_2 = 250^\circ \text{C}$ гача иситишда никел кристалининг ички энергиясининг ўзгариши қанча ? Никелнинг массаси 20 г. Унинг иссиқлик сизими ҳам ҳисоблансин.
- 2.7. $N = 10^{25}$ та классик уч ўлчовли гармоник тебрангичлар системи энергияси E ва иссиқлик сизими s аниқлансин. Температура 300 K .
- 2.8. Алюминийнинг солиштирма иссиқлик сизими 20°C да $840 \text{ Ж/кг}\cdot\text{K}$ га тенг. Шу температурада алюминий учун Дюлонг ва Пти қонуни бажариладими ?
- 2.9. Классик назариядан фойдаланиб, NaCl ва CaCl_2 кристалларининг солиштирма иссиқлик сизимлари ҳисоблансин.
- 2.10. Қўрғошин питра тўсиққа урилганда суюлиб кетиши учун у энг камида қандай тезлик билан урилиши керак ? Кинетик энергиянинг 75% и питранинг энергиясига айланади, унинг урилгунча температураси 127°C деб ҳисоблансин.
- 2.11. Дебай температураси қандай аниқланади ва у нимани ифода қилади ?
- 2.12. Уч ўлчовли кристал панжараси учун такрорийликлар тақсимооти функцияси $g(\omega) = 9N(\omega^2/\omega_{\text{макс}}^3)$ ни билган ҳолда граммоллекула таркибида N_A та (N_A – Авогадро сони) атомга эга бўлган кристалнинг акустик тебранишлар тармоғи энергияси учун ифода чиқарилсин.
- 2.13. Дебай назарияси бўйича мис кристалининг энгергиясини ҳисобланг. Мис учун $\theta_D = 320 \text{ K}$.
- 2.14. Олтин кристалининг хусусий тебранишларининг энг катта такрорийлиги $\omega_{\text{макс}}$ аниқлансин. Олтин учун $\theta_D = 180 \text{ K}$.
- 2.15. Агар $T = 20 \text{ K}$ да кумушнинг моляр иссиқлик сизими $C_V = 1,7 \text{ Ж/мол}\cdot\text{K}$ эканлиги маълум бўлса, энг катта такрорийлик $\omega_{\text{макс}}$ қандай бўлади ?
- 2.16. Кристални $T = 0 \text{ K}$ дан $T = 0,1\theta_D$ гача қиздирганда унинг ички энергияси 0 энергияга нисбатан қандай ўзгаради ?
- 2.17. Массаси $m = 10 \text{ г}$ бўлган кумушни $T_1 = 10 \text{ K}$ дан $T_2 = 20 \text{ K}$ гача иситишда $\Delta Q = 0,71 \text{ Ж}$ иссиқлик энергияси берилди. Кумуш учун Дебай температураси аниқлансин.

2.18. Агар Дебай назарияси берадиган қиймат ўрнига $T = \theta_D$ да Дюлонг ва Пти қонуни берадиган қийматдан фойдаланилса, кристалнинг иссиқлик сифимини ҳисоблашда нисбий хатолик қанақа бўлади ?

$$\int_0^1 \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = 0,225 \text{ бўлишлигини эътиборга олинг.}$$

2.19. Икки ўлчовли панжарали кристалда моляр иссиқлик сифими ифодаси мана бундай:

$$c_{\mu} = 3R \left\{ 6 \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^{2\theta_D/T} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} - \frac{2(\theta_D / T)}{e^{\theta_D/T} - 1} \right\},$$

$T \ll \theta_D$ паст температураларда моляр иссиқлик сифим ифодаси қандай бўлади ?

$$\int_0^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} \approx 2,4$$

2.20. Бир ўлчовли панжарали кристалнинг моляр иссиқлик сифими:

$$c_{\mu} = 3R \left\{ 2 \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^{\theta_D/T} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x dx}{e^x - 1} - \frac{(\theta_D / T)}{e^{\theta_D/T} - 1} \right\}.$$

Паст температураларда ($T \ll \theta_D$) мазкур кристалнинг моляр ис-

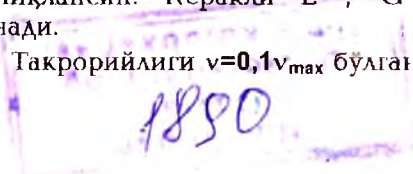
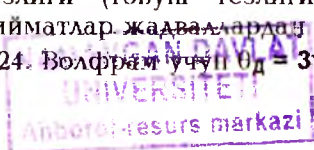
сиқлик сифими аниқлансин. $\int_0^{\infty} \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6}$

2.21. Агар Дебай температураси $\theta_D = 250$ К бўлса, фононнинг энг катта такрорийликка мос келувчи энергиясини ҳисобланг.

2.22. Фононнинг $0,1 \omega_{\max}$ такрорийликка мос келувчи импульси аниқлансин. Товушнинг кристалдаги ўртача тезлиги $v = 1380$ м/с, $\theta_D = 100$ К. Узун тўлқинлар соҳаси кўрилайтир деб ҳисобланг ($\omega = v \cdot q$).

2.23. Бўйлама E ва кўндаланг G эластиклик модуллари, кумушнинг зичлиги ρ маълум деб ҳисоблаб, фононларнинг кумушдаги ўртача тезлиги (товуш тезлиги) аниқлансин. Керакли E , G ва ρ қийматлар жадваллардан олинади.

2.24. Волфрам учун $\theta_D = 310$ К. Такрорийлиги $v = 0,1 v_{\max}$ бўлган



фононларнинг тўлқин узунлиги ҳисоблансин.

- 2.25. Олдинги масала шартлари асосида товушнинг волфрамда ўртача тезлиги топилинсин.
- 2.26. Кристалда атомлараро масофа $d=0,25$ нм, Дебай температу – раси $\theta_D = 300$ К. Шу кристалда товушнинг ўртача тезлиги аниқлансин.
- 2.27. $T=42$ К температурада қўрғошиндаги фононлар босими ҳи – соблансин. Қўрғошин учун $\theta_D = 85$ К.
- 2.28. Олмоснинг $T=30$ К даги солиштирма иссиқлик сифимини ҳисобланг. Олмос учун $\theta_D = 2000$ К, $\mu = 12$ г
- 2.29. Рухнинг 100° С даги солиштирма иссиқлик сифимини аниқланг. Рух учун $\theta_D = 308$ К эканлигини эътиборга олинг.
- 2.30. Титанда Дебай тўлқинининг энг кичик узунлигини аниқлаш керак. Титан учун $\theta_D = 5^\circ$ С, товуш тарқалиш тезлиги $v_T = 6 \cdot 10^3$ м/с.

2.2. Қаттиқ жисмларнинг иссиқлик ўтказувчанлиги

Қаттиқ жисмларда иссиқлик ўтказувчанлик (узатиш) ҳо – дисаларини тавсифлайдиган бир неча асосий тенгламалар, ифода – лар, катталиклар ҳақида маълумот келтирамыз.

Жисмда dT/dx температура градиенти мавжуд бўлса, унинг S кўндаланг кесимидан t вақтда Q иссиқлик миқдори оқиб ўтади:

$$Q = -\chi \frac{dT}{dx} S \cdot t, \quad (2.16)$$

бундаги χ коэффициентни иссиқлик ўтказувчанлик коэффици – енти ёки қисқароқ қилиб кристал ланжаранинг иссиқлик ўтка – зувчанлиги дейилади.

Бир муҳитдан иккинчи муҳитга, масалан қозоннинг метал деворидан ундаги суюқликка (сувга), иссиқлик берилишини

$$Q = \alpha(T_1 - T_2)S \cdot t \quad (2.17)$$

ифода тавсифлайди, бунда α – иссиқлик бериш (узатиш) коэф – фициенти.

Кристал панжарасининг иссиқлик ўтказувчанлиги

$$\chi_{пан} = \frac{1}{3} C_{\phi} V_{\phi} L_{\phi} \quad (2.18)$$

шаклда ифодаланиб, бунда C_{ϕ} – фононлар газининг бирлик ҳажми иссиқлик сизими, V_{ϕ} – фононларнинг (товушнинг) мазкур жисмда тезлиги, L_{ϕ} – фононнинг ўртача югириш йўли.

Масалалар ечишга мисол

Узулиги **1 м**, кўндаланг кесими **10^{-2} м^2** бўлган алюминий симдан унинг учларидаги температуралар фарқи **$\Delta T = 10^{\circ}$** бўлганда **1** соатда қанча иссиқлик миқдори ўтади?

Ечиш. Сим бўйлаб температура градиенти

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{\ell} = \frac{10}{1} = 10 \text{ К/м};$$

1 соат = **3600** с, алюминий учун $\chi = 210 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Бу маълумот (2.16)

ифодага қўйилади. Демак, $Q = -\chi \frac{dT}{dx} S \cdot t = 75 \text{ кЖ}$.

Масалалар

2.31. Мис (қалинлиги $d_1=9$ мм) ва темир (қалинлиги $d_2=3$ мм) тахтачалар устма – уст тахланган. Мис тахтачанинг ташқи сирти $t_1=50^{\circ}$ С ўзгармас температурада сақланади, темирнинг ташқи сирти эса $t_2=0^{\circ}$ С. Тахтачалар бир бирига тегиб турган сиртнинг t_x температураси аниқлансин. Тахтачалар юзи қалинлигига нисбатан жуда катта.

Кўрсатма: мис ва темир тахтачалардан ўтаётган иссиқлик миқдорлари тенглигидан фойдаланинг.

2.32. Девор ташқи сиртининг температураси $t_1 = -20^{\circ}$ С, ички

сиртиники эса $t_2 = +20^{\circ}$ С, қалинлиги **0,4** м. Агар деворнинг ҳар 1 м^2 юзидан 1 соатда **110** ккал иссиқлик ўтиб турса

девор материалнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини топинг.

2.33. Эданининг юзи $4 \times 5 \text{ м}^2$ ва баландлиги 3 м бўлган хона тўртта ғишт девори орқали бир минутда қанча иссиқлик йўқотади?

Хонанинг температураси $t_1 = 15^\circ \text{С}$, ташқи температураси

$t_2 = -20^\circ \text{С}$. Ғиштнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти $0,002 \text{ кал}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, деворнинг қалинлиги 50 см. Эдан (пол) ва шип орқали йўқотилган иссиқлик ҳисобга олинмасин.

2.34. Темир стерженнинг бир учи 100°С температурада сақланади, иккинчи учи эса музга тегиб туради. Стерженнинг узунлиги 14 см, кўндаланг кесим юзи 2 см^2 . Стерженнинг сирти яхши изоляцияланган. 1) Стержен бўйлаб иссиқликнинг оқиш тезлиги, 2) 40 минутда эриган музнинг миқдори аниқлансин.

2.35. Узунлиги 50 см, кўндаланг кесими 10 см^2 бўлган мис стержен учларидаги температуралар фарқи 15°С бўлса, 1 с да ундан ўтган иссиқлик миқдори топилин. Иссиқликнинг исрофи назарга олинмасин.

2.36. Сув тўлдирилган 15 см диаметрли алюминий идиш пламага қўйилган. Сув қайнаб ҳар минутда 300 г буг ҳосил бўлади. Агар идиш тубининг қалинлиги 2 мм бўлса, идиш туби ташқи сиртининг температураси аниқлансин.

3.37. 9 см радиусли метал цилиндр идишга 0°С температурали муз тўлдирилган. Бу идиш 1 см қалинликдаги пўкак қатлами билан иссиқликдан изоляцияланган. Агар ташқи ҳавонинг температураси

25°С бўлса идишдаги муз қанча вақтда эриб бўлади? Иссиқлик фақат ўргача радиуси 9,5 см бўлган ён сирти орқали кириб туради деб ҳисоблансин.

3.38. 37 см қалинликдаги девор (бир ярим ғиштли) ташқи сиртининг температураси -15°С , ички сиртиники эса $+20^\circ \text{С}$. Бир кеча – кундузда 1 м^2 девор орқали ўтадиган иссиқлик миқдори аниқлансин.

2.39. Алюминий идишда сув (100°C да) қайнайди. Идиш туби –нинг қалинлига 2 мм, юзи 200 см^2 , 5 мин ичида идишдаги сувнинг 100 грами буғланиб кетади. Ён деворлар орқали ва нурланиш йўли билан ташқарига иссиқлик чиқиб кетиши назарга олинмаган ҳолда, идиш тубининг устки ва остки сиртлари температуралари фарқи топилсин.

2.40. 6 мм қалинликдаги мис тахтача билан 4 мм қалинликдаги темир тахтача жипслаштирилган. Шу икки тахтача жипслашмаси каби иссиқлик ўтказувчи бир жинс тахтачанинг (10 мм) иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини ҳисоблансин.

2.41. Цилиндрик буғ қувури иссиқлик ўтказмайдиган асбест изолятор қобиқ билан қопланган. Қобиқнинг ташқи сиртининг температураси $t_1 = 50^{\circ}\text{C}$, буғ қувурга ёпишиб турган қобиқнинг

ички сирти температураси $t_2 = 120^{\circ}\text{C}$. Буғ қувур узунлиги $l = 65\text{ м}$, асбест қобиқнинг ташқи диаметри $d_1 = 13\text{ см.}$, ички диаметри $d_2 = 7\text{ см.}$ Бу қувурнинг бир кеча –кундузга ташқари фазога берадиган иссиқлик миқдори қанча?

2.42. Агар темир печнинг температураси 200°C , атрофидаги температураси 10°C бўлса, унда печнинг $0,5\text{ м}^2$ сиртидан ҳавога бир соат ичида бериладиган иссиқлик миқдори аниқлансин.

2.43. Буғ қозоннинг ўтхонасидаги ёниб турган газнинг температураси 1000°C , қозондаги сувнинг температураси 180°C . Темир қозон деворининг қалинлиги 2 см, девор ички томондан 2 мм қалинлигидаги қайнов қуйқаси билан, ташқаридан эса 1 мм қора куя қатлами билан қопланган. Нурланиш жуда оз. 1 м^2 сирт орқали 1 соат ичида қанча иссиқлик миқдори узатилади?

2.44. Олдинги масала шароити асосида қора куя, темир девор ва қайнов қуйқаси қатламларининг ички ва ташқи сиртларидаги температуралар аниқлансин.

2.45. Агар кумушнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини $418\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, товуш тарқалиши тезлиги 3700 м/с бўлса, бу кристалда фононнинг 300 К температурада ўртача эркин югуриш узунлигини ҳисоблаб тошинг.

2.46. Хона температурасида **NaCl** кристаллида фононнинг ўртача эркин югуриш узунлиги унинг панжараси **d** дойимисидан 4 марта катта. Агар **d = 5,64 Å**, товуш тезлиги $5 \cdot 10^3$ м/с бўлса, **NaCl** кристали иссиқлик ўтказувчанлиги қанча бўлади?

2.47. Агар маълум шароитда кварц **SiO₂** нинг иссиқлик ўтказувчанлиги $\chi = 13$ Вт·м⁻¹·К⁻¹, моляр иссиқлик сифими **C_v = 44** Ж·мол⁻¹ К⁻¹ ва товушнинг тезлиги **v = 5** км/с бўлса, бу ҳолда фононларнинг ўртача эркин югуриш узунлиги \bar{l}_ϕ аниқлансин. Кварцнинг зичлиги $\rho = 2,65 \cdot 10^3$ кг/м³.

2.48. **NaCl** кристали учун **T = 300** да $\chi = 71$ Вт·м⁻¹·К⁻¹, элементлар даврий жадвалида **Na** ва **Cl** атом массалари берилган. Кристаллнинг зичлиги $\rho = 2,17 \cdot 10^3$ кг/м³, ўртача товуш тезлиги **v = 5** км/с. Фононнинг ўртача эркин югуриш узунлиги \bar{l}_ϕ нинг панжара доимийси **d** га нисбати топилсин.

2.3. Қаттиқ жисмларнинг иссиқликдан кенгайиши (қисқариши)

Биринчи тақрибда қаттиқ жисмнинг температураси ўзгариши билан унинг l_t узунлиги ҳам қизиқий равишда ортади, яъни

$$l_t = l_0(1 + \alpha t), \quad (2.19)$$

бунда l_t, l_0 — жисмнинг t °С ва 0 °С температурадаги узунликлари, α — қаттиқ жисмларнинг иссиқлик қизиқий узайиш(қисқариш) коэффициентини. Агар температура мутлоқ 0 К дан бошланса, у ҳолда t ўрнига T ёзиш, $l_0 \Rightarrow l(T = 0)$ деб олиш керак.

Ҳажмга кенгайиш ифодаси қуйидагича

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad (2.20)$$

бўлиб, бу изотроп қаттиқ жисмлар учун адолатли ва $\beta = 3\alpha$ бўлади.

ш массали модда T_1 дан T_2 гача иситилганда энтропия ўзгариши:

$$\Delta S = m \cdot c \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right).$$

Агрегат ҳолатнинг ўзгаришида энтропия ўзгариши:

$$\Delta S = \frac{\lambda m}{T}, \Delta S = \frac{r m}{T}, \quad \text{бунда } \lambda \text{ ва } r \text{ — суюлиш ва}$$

буғланиш иссиқлиги.

Модданинг икки фазаси (масалан, буғ ва суюқлик, суюқлик ва қаттиқ ҳолат) мувозанати шароитида босим dp қадар ўзгарганида ўтиш (суюлиш) температураси dT қадар ўзгаради. Улар ора – сидаги буғланишни қуйидаги Клаузиус – Клапейрон тенгламаси ифодалайди:

$$dT = T \frac{V_c - V_k}{q_0} dp, \quad (2.21)$$

бунда q_0 — моляр суюлиш (қотиш) иссиқлиги, V_c, V_k — мос ра – вишда суюқ ва қаттиқ фазанинг бир киломоли ҳажми. T — ўтиш температураси.

Масалалар ечишга мисол

Уzunлиги 2 м бўлган мис симнинг температураси 20°C . Ундан ток ўтказилганда унинг uzunлиги 20 мм қадар ошган. Сим неча градус исиган?

Ечиш (2.19) ифодадан: Мутлоқ нолдаги uzunликка нисбатан узайиш $\ell_{(T)} = \ell_{(T=0)}(1 + \alpha T_1)$, T_x температурадаги uzunлиги

$$\ell_{T_x} = \ell_{(T=0)}(1 + \alpha T_x). \quad \text{Масала шартига кўра: } \frac{\ell_{T_x}}{\ell_{T_1}} = 1,01.$$

Юқоридаги икки тенгликдан:

$$T_x = \frac{0,01 + 1,01 \cdot \alpha T_1}{\alpha}.$$

Мис учун $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$. Бу қийматлар қўйилса, $T_x = 921$ К ва $\Delta t = 628^\circ\text{C}$ қадар сим қизиган.

Масалалар

- 2.49. 2 киломол муз эриганда энтропиянинг ўзгариши $22,2 \text{ кЖ} \cdot \text{К}^{-1}$ га тенг. Ташқи босим $1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ га кўтарилганда, музнинг эриш температураси қанча ўзгаради ?
- 2.50. 10^5 Н/м^2 босим остида қалайнинг суюлиш температураси $231,9 \text{ }^\circ\text{С}$ га, 10^7 Н/м^2 босимда эса у $232,2 \text{ }^\circ\text{С}$ га тенг. Суяқ қалайнинг зичлиги $7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. 1 киломол қалай суюлганда энтропия қанча ўзгаради?
- 2.51. Босим 10^4 кГ/м^2 қадар ўзгарганда темирнинг суюлиш температураси $0,012 \text{ }^\circ\text{С}$ га ўзгарса, темир суюлганда бир киломол ҳажмининг ўзгариши қанча?
- 2.52. Мис чизгичнинг $0 \text{ }^\circ\text{С}$ даги узунлиги 1 м. Температура $35 \text{ }^\circ\text{С}$ гача кўтарилса унинг узунлиги қанчага узаяди? $-25 \text{ }^\circ\text{С}$ гача пасайсачи?

2.53. Узунлиги 1,5 м бўлган пўлат симнинг температураси $0 \text{ }^\circ\text{С}$. Ундан электрик ток ўтказилганда у чўғланиб 15 мм га узайган. Симнинг қандай температурагача қиздирилганини

аниқланг. $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$

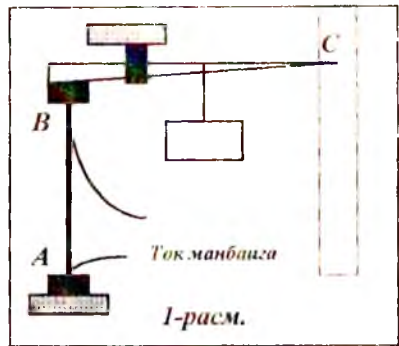
2.54. Енгил ВС ричагни (расма қаранг) горизонтал вазиятда тугиб турувчи АВ пўлат сим орқали ток ўтказилганда ричагнинг С учи $0,06 \text{ м}$ пастга тушган. Агар АВ симнинг узунлиги

20° С да $0,75 \text{ м}$ бўлса, сим қандай температурагача қизиган? Ричаг елкаларининг узунлиги: $[BO] = 0,05 \text{ м}$, $[OC] = 0,5 \text{ м}$.

2.55. 0° С да юзи 2 м^2 бўлган тўғри тўртбурчак шаклидаги пўлат варақ 400° С гача қиздирилганда унинг юзи қанчага ўзгарган?

2.56. Бетон тагликнинг 0° С даги ҳажми 2 м^3 . Температура 30° С гача кўтарилганда унинг ҳажми қанчага ўзгарди? Бетоннинг чиқий кенгайиши коэффициентини $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

2.57. Агар жез цилиндр диаметрини микрометр ёрдамида $0,01 \text{ мм}$ қадар аниқлик билан 5° С ва 35° С температураларда улчанган



бўлса, иссиқликдан диаметрининг узайганлигини пайқаш мумкинми? 5°C даги ўлчаш натижаси $20,45\text{ мм}$.

2.58. 0°C даги рух стерженнинг узунлиги 200 мм , мис стерженники эса 201 мм . Уларнинг кўндаланг кесим ўлчамлари 0°C да ўзаро тенг. а) қандай температурада уларнинг узунликлари тенг бўлади? б) қандай температурада уларнинг ҳажмлари тенг бўлади?

2.59. Жез маятникли соат 0°C да тўғри юради. Агар температура $t=+20^{\circ}\text{C}$ гача кўтарилган бўлса, унда соат бир кеча кундузда қанча орқада қолади.

2.60. Агар бир ўқ атрофида ишқаланишсиз айланиб турган жисмнинг температураси 0°C дан 1°C гача кўтарилган бўлса, унда жисмнинг бурчак тезлиги қандай ўзгаради? Шунда жисмнинг кинетик энергияси қандай ўзгаради? Энергиянинг ўзгариши нима ҳисобига бўлади?

2.61. 30 см^3 темирнинг 20°C дан 100°C гача исиганидаги энтропия ўзгариши аниқлансин.

3– БОБ

КАТТИҚ ЖИСМЛАРДА ДЕФОРМАЦИЯЛАР

Чизиқий эластик деформация ҳолида Гук қонуни :

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} = \frac{1}{E}P \quad (3.1)$$

ўринли бўлади, бунда ℓ – жисмнинг (масалан, симнинг) узунлиги, $\Delta\ell$ деформацияловчи куч таъсирида жисмнинг узайиши

(қисқариши), $P = \frac{F}{S}$ кучланиш дейилиб, у жисм S кесимининг

бирлигига тўғри келган F деформацияловчи кучнинг тик ҳиссаси, E – эластиклик (Юнг)модули. P кучланишнинг, бинобарин, E модулниң бирлиги 1 Па бўлиб, $1\text{ Па}=1\text{ Н/м}^2$.

E нинг қийматларини $1\text{ Па}=10^9\text{ Па}$ (гига паскал) ларда ифодалаш қулай бўлиши мумкин, турли моддалар учун E нинг қийматлари турли бўлади.

Эластик жисмларда чўзувчи куч таъсирида у кучга тескари йўналган $F_{эл}$ эластиклик кучи вужудга келади, у $\Delta \ell$ деформацияга пропорционал бўлади:

$$F_{эл} = -k \Delta \ell \quad (3.2)$$

k коэффициентни қаттиқлик (эластиклик) коэффициенти дейилади.

$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$ нисбатни нисбий узайиш (қисқариш) деб аталади. Агар сим (стержен) чўзилса, унинг кўндаланг кесими қисқаради ва аксинча. Кўндаланг нисбий чўзилиш ёки қисқариши:

$$\varepsilon_q = \frac{(d_1 - d)}{d} = \Delta d / d \quad (3.3)$$

тарзда ифодаланади, d , d_1 мос равишда жисм деформацияланмагандаги ва деформациялангандаги кўндаланг кесими диаметри.

ε ва ε_q ларнинг ишоралари бир бирига қарама – қарши.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

нисбатни Пуассон коэффициенти дейилади.

Чўзилиш ёки қисилиш деформациясида бирлик V_1 ҳажмнинг ўзгариши:

$$\Delta V_1 = \varepsilon + 2\varepsilon_q = \varepsilon(1 - 2\nu). \quad (3.5)$$

Материалларнинг юк кўтара олиш имкониятини мўлжаллашда m мустаҳкамлик заҳираси деб аталган қаттиқлик киритилади, у $P_{макс}$ мустаҳкамлик чегарасидан юкнинг неча марта кичик бўлиши кераклигини кўрсатади:

$$m = \frac{P_{макс}}{P_{юк}}. \quad (3.6)$$

Моддаларнинг иссиқликдан кенгайиши ва бошқа ҳолларда (3.2) ифодага яна бир ноэластик (ангармоник) ҳад қўшилади ва у қуйидагича кайта ёзилади:

$$F = -\beta x + \gamma x^2. \quad (3.7)$$

Эластиклик β билан атомлараро мувозанатий r_0 масофа Π_m орқали боғланган:

$$\beta = r_0 E_{ю} . \quad (3.8)$$

Кристалда тарқалаётган бўйлама тўлқинлар v_{\parallel} тезлиги $E_{ю}$ Юнг модули ва ρ зичлик орқали, кўндаланг тўлқинлар v_{\perp} тезлиги G силжиш модули ва ρ зичлик орқали аниқланади:

$$v_{\parallel} = \sqrt{\frac{E_{ю}}{\rho}} , \quad v_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} . \quad (3.9)$$

Стерженни (симни) қандайдир ϕ бурчакка бураш учун қуйидаги жуфт куч momenti қўйилиши керак:

$$M = \frac{\pi \cdot G r^4 \phi}{2\ell} , \quad (3.10)$$

бунда ℓ — симнинг узунлиги, r — унинг радиуси ва G — матери — алнинг силжиш модули.

(3.7) ифодадаги γ ангармониклик коэффициентининг тақрибий ифодаси:

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{\beta}{r_0} . \quad (3.11)$$

Чизиқий кенгайиш коэффициенти α ҳам γ ва β лар билан

$$\text{боғланган:} \quad \alpha = \frac{\gamma \cdot k}{\beta^2 r_0} = \frac{1}{2} \frac{k}{\beta r_0} . \quad (3.12)$$

Дебай температурасининг ҳажм ўзгаришига боғланишини баҳолаш учун Грюнейзен параметри γ_G киритилган:

$$\gamma_G = - \frac{V \cdot d\theta_D}{\theta_D \cdot dV} = - \frac{d \cdot \ln \omega_{\max}}{d \cdot \ln V} . \quad (3.13)$$

Бир ўлчовли кристал ҳолида унинг содда ифодаси:

$$\gamma_G = \frac{\gamma \cdot r_0}{\beta} . \quad (3.14)$$

$$\text{Фононлар газининг босими: } P_{\text{фон}} = \gamma_G \frac{E_T}{V} , \quad (3.15)$$

E_T — кристал тебранишлари энергияси, V — ҳажми.

Масалалар ечишга мисоллар

1 – мисол: Бир учидан осиб қўйилган юксиз пўлат сим узунлиги 1 м, кўндаланг кесими 1 мм². Унга қанча юк осилса, узунлиги 1 мм қадар ортади ?

Ечиш. Гук қонунига (3.1) асосан, $\frac{\Delta l}{l} = \frac{P}{E}$ ёки

$$P = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}, \text{ ёки } F = E \frac{\Delta l}{l} S. \text{ Пўлат учун } E = 21,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2.$$

Демак, $F = 21,6 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} = 216 \text{ Н}$.

2 – мисол. Кумуш кристаллида бўйлама ва кўндаланг товуш тўлқинлари тезликлари аниқлансин.

Ечиш. Тегишли жадваллардан Юнг ва силжиш модуллари, кумушнинг зичлиги топилади. Улар (3.9) ифодаларга қўйилиб, тегишли жавоб олинади:

$$v_{||} = \sqrt{\frac{74 \cdot 10^9}{10,5 \cdot 10^3}} = 2,65 \cdot 10^3 \text{ м/с}, \quad v_{\perp} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

МАСАЛАЛАР

- 3.1. Узунлиги 2 м ва кесими 1 мм² бўлган пўлат симнинг учларига ҳар бири 150 Н бўлган чўзувчи кучлар қўйилган. Мутлақ ва нисбий узайишларни топинг.
- 3.2. Узунлиги 3 м ва кесими 1,5 мм² бўлган мис симни 0,1 мм қадар чўзиш учун қанча куч қўйиш керак.?
- 3.3. 3 тонна юкни кўтаришга мўлжалланган мустаҳкамлик заҳи – раси 3 га тенг бўлган пўлат арқон 2 мм диаметрига неча пўлат симдан ташқил топган.?
- 3.4. 1 м узунликли симни учларидан тортиб 0,1 мм қадар узайтирилган. Агар атомлараро масофа деформацияланмаган ҳолда 10^{-10} м бўлса, сим чўзилганда бу масофа қанча ўзгарган ?
- 3.5. Кесими юзи 1 см² ва узунлиги 0,75 м бўлган пўлат стерженда бир биридан 0,25 м узоқда ҳар бири 2 тонна массали учга юк
- 3.6

қуйилган . Пастки юк стерженинг учига осилган. Пўлат учун Юнг модули $2 \cdot 10^{11}$ Па. Стержен қанча чўзилган?

3.6. Торнинг қисмлари кўндаланг йўналишда шундай ҳаракат қиладики, эгилиш соҳаси, ўз оғмалигини ўзгартмасдан, унга с тезлик билан силжийди. Торнинг эгилиш соҳасида деформация ϵ ва тор қисмлари силжиш тезлиги u бир бири билан қандай боғланган?

3.7. Пўлат учун Юнг модули $2 \cdot 10^{11}$ Па, унинг зичлиги $7.8 \cdot 10^3$ кг/м³. Пўлат стерженда бўйлама тўлқинлар тезлиги қандай?

3.8. Пўлат стерженда кўндаланг тўлқинлар тезлиги қандай?

3.9. Пўлатнинг Пуассон коэффиценти $\nu = 0,3$. Чўзилганда пўлат стержен ҳажми ортадиме ёки камайдими?

3.10. Резина арқоннинг ҳажми чўзилишда деярли ўзгармай – ди. Резина учун Пуассон коэффиценти нимага тенг?

3.11. Бир учидан осилган қўрғошин сим узунлиги қанча бўл – гунча узилиб кетмайди? (қўрғошин учун $P_{\max} \approx 0,2$ ГПа)

3.12. Ташқи босим 1 кг/см² бўлганда: ташқи ва ички диаметри $d_1 = 8$ мм ва $d_2 = 7$ мм бўлган шиша найча қандай ички бо – симга чидайди?

3.13. 150 см узунликдаги горизонтал темир стерженинг унинг ўртасидан ўтувчи вертикал ўқ атрофида айлантирила – ди. Қандай такрорийлик билан айлантирилганда стержен узилиб кетади?

3.14. 1 мм диаметрли пўлат симнинг учига 20 кг юк осилганда унинг узунлиги 5 м бўлган. Агар унга яна 10 кг қўшимча юк осилса, сим бўйига қанча чўзилади ?

3.15. Икки мустақкам тиргак орасига 1 мм диаметрли 2 м узунликдаги пўлат сим таранг тортилган. Агар у симнинг ўртасига 300 Г юк осилса, унда ўша нуқта жойидан қанча силжийди? Тиргаклар жойидан силжмайди деб қабул қилинг.

3.16. Пўлат маховик $n = 30$ айл мин⁻¹ такрорийлик билан айла – нади. Унинг гардишининг ўртача диаметри $d = 1,5$ м. Ке – гайлар таъсирини назарга олмасдан маховик диаметрининг узайишини аниқланг.

3.17. Узунлиги $\ell = 4$ м, диаметри $d = 2$ мм пўлат симни $F = 100$ кГ куч чўзади. Шунда унинг ҳажми қанча ўзгаради?

- 3.18. Олдинги масала шароитида симнинг ён сирти қанчага ўзгаради?
- 3.19. Узунлиги 150 см, диаметри 2 см бўлган пўлат вал 20 с⁻¹ такрорийлик билан айланиб, 4,5 кВт қувватни узатади. Валининг буралиш бурчаги қанча?
- 3.20. Агар эластиклик коэффициентини $\beta=50$ Н/м, ангармониклик коэффициентини эса $\gamma = 500$ ГПа бўлса, қаттиқ жисм атомини мувозанатга қайтарувчи энг катта куч $F_{\text{макс}}$ ҳисоблансин.
- 3.21. Агар иссиқлик тебранишларининг амплитудаси панжара дойимисининг 5% ини ташқил қилса, тебранаётган атомлар потенциал энергияси ўзгариши қандай бўлади? Атомлараро масофа $r_0=0,3$ нм, Юнг модули $E_{\text{ю}} = 100$ ГПа деб олинсин.
- 3.22. Агар зарралар орасидаги мувозанатий масофа $r_0=0,3$ нм, Юнг модули $E_{\text{ю}} = 200$ ГПа бўлса, қаттиқ жисм зарралари тебранишлари тенгламасидаги эластиклик коэффициентини топилсин.
- 3.23. Юнг модули $E_{\text{ю}}=100$ ГПа, атомлараро масофа $r_0=0,3$ нм бўлса, γ ангармониклик коэффициентини орқали иссиқликдан кенгайиш α коэффициентини баҳоланг.
- 3.24. Агар темир учун чизиқий кенгайиш коэффициентини $\alpha=1.2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, панжара дойимиси $r_0=0,25$ нм, Юнг модули $E_{\text{ю}}=200$ ГПа бўлса, унинг учун ангармониклик коэффициентини γ ҳисоблансин.
- 3.25. 1 мм диаметри пўлат симга оғирлиги 981 Н бўлган юк осилган. Юкли сим мувозанат вазиятидан ўтишда узилиб кетмаслиги учун уни энг кўпи билан қандай бурчакка оғдириш керак?
- 3.26. Узунлиги 1 м ва радиуси 1 мм бўлган пўлат симга 100 кг юк осилган. Симнинг чўзилиш иши нимага тенг?
- 3.27. $P=1000$ кг/см² босим остида сиқилган цилиндрик мис стержен зичлигининг нисбий ўзгариши топилсин. Мис учун Пуассон коэффициенти $\nu = 0,34$ га тенг.
- 3.28. Узунлиги 10 см ва радиуси 0,1 мм бўлган симни 10' бурчакка буриш учун керак бўлган жуфт кучнинг momenti топилсин.

3.29.0 Узунлиги 5 м бўлган темир сим вертикал осилган. Симга 10 кГ юк осилган бўлса, унинг ҳажми қанчага ўзгаради? Темир учун Пуассон коэффициентини 0,3.

4 – БОБ

МЕТАЛЛАР

Металларнинг классик электрон назариясига асосан, металлларда улар ҳажмида тартибсиз ҳаракат қилиб турадиган эркин электронлар бўлади. Уларнинг зичлиги n атомлар зичлиги тартибида. Ўзгармас кучланиш қўйилганда эркин электронлар ташқи манба ҳосил қилган E электрик майдон таъсирида унинг йўналишида муайян тезлик билан тартибли ҳаракат қилади, яъни электрик ток (оқим) ҳосил қилади. Аммо $v_{др}$ дрейф (силжиш) тезлиги одатда электронларнинг ўртача иссиқлик ҳаракати тезлигидан анча кам бўлади. Бунинг сабаби электронларнинг ўз йўлида атомлар билан жуда кўп тўқнашишларидир. Мактаб физика

курсидан Ом қонуни тўла занжир учун $I = \frac{E}{R+r}$, занжир қисми

учун $I = \frac{U}{R}$ кўринишда бўлишлиги маълум. Ом қонуни тўғри бўлган одатдаги унча катга бўлмаган тоklar (кучланишлар) соҳасида ток зичлиги $j = \frac{I}{S}$:

$$j = env_{др} \quad (4.1)$$

кўринишда ифодаланиб, бунда e – электрон заряди, n – электронларнинг бирлик ҳажмдаги сони (зичлиги), $v_{др}$ – электронларнинг ток йўналишидаги дрейф тезлиги, S – ўтказгич кўндаланг кесими.

Одатда $v_{др}$ электрик майдон кучланганлиги E га пропорционал, яъни

$$v_{др} = \mu E, \quad (4.2)$$

бундаги μ – электронларнинг металдаги ҳаракатчанлиги дейилади ва у температура ва бошқа параметрларга боғлиқ бўлади. Электронларнинг кристал панжараси нуқсонлари билан тўқнашишлари

назарияси $\mu = \frac{e\langle\tau\rangle}{m}$ ифодани беради, бунда $\langle\tau\rangle$ — электроннинг ўртача эркин югуриш вақти, m — унинг массаси. Демак,

$$\mathbf{j} = e n \mu \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E} \quad (4.3)$$

$\sigma = e n \mu$ ни металнинг солишгирма электрик ўтказувчанлик коэффиценти (соддаси: электрик ўтказувчанлиги) деб айтилади.

μ ҳаракатчанлик металлларда температура кўтарилганда камайиб боради, бу эса (μ деярли ўзгармай қолгани учун) электрик ўтказувчанликнинг камая боришини (қаршилик ортишини) тақозо қилади:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (4.4)$$

Назарий ҳисоб металнинг иссиқлик ўтказувчанлигининг электрик ўтказувчанлигига нисбати мутлоқ T температурага пропорционал бўлишлигини беради :

$$\frac{\chi}{\sigma} = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2 T \quad (4.5)$$

Бу муносабатни Видеман — Франц қонуни дейилади.

Классик электрон назариянинг қўлланиш соҳаси чекли ва у металлларнинг кўп хоссаларини тушунтиришга ожиз. Металларнинг кўпчилиги хоссаларини квантлар назарияси тушунтиради. Энг муҳим масала эркин электронларнинг энергия зоналари тўлдирилганлиги масаласи бўлиб, металлларда энг юқориги зона (ёки икки зона чаптамаси) электронлар билан ярмисича тўлдирилган. Бу зонани ўтказувчанлик зонаси дейилади ва ундаги электронлар тоқда қатнаша олади. Эркин (ўтказувчанлик) электронларнинг энергия сатҳлари бўйича тақсимотини Ферми функцияси ифодалайди:

$$f(E, T) = \left[e^{\frac{E - E_F}{kT}} + 1 \right]^{-1} \quad (4.6)$$

Бу функция T температурада E энергияли ҳолатда электроннинг бўлиш эҳтимолини тасвирлайди. E_F — Ферми энергияси .

E , $E + dE$ ораликдаги ҳолатлар сони :

$$g(E)dE = \frac{2\pi V(2m^*)^2 E^2}{h^3} dE. \quad (4.7)$$

T=0 K температурада электронлар зонада E=0 дан E_F гача сатҳларини тула эгаллаган бўлади. Эркин электронлар зичлиги :

$$n = \frac{8\pi(2m^*)^2 E_F^2}{3h^3}. \quad (4.8)$$

Мазкур температурада металдаги ўтказувчанлик электрони — нинг ўртача энергияси :

$$\bar{E} = \frac{3}{5} E_F. \quad (4.9)$$

МИСОЛ: Мис учун Ферми энергияси E_F ни топайлик. Эркин электронлар зичлиги (бир атомга бир эркин электрон тўғри келади):

$$n = \frac{N_A \rho}{\mu_r} \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

(N_A — Авогадро сони, ρ — миснинг зичлиги, μ_r — граматом мас — саси). Буни (4.8) га қўйсак, E_F ≈ 7 эВ.

Металдаги ҳар бир атомга Z та эркин электрон тўғри келган умумий ҳолда металдаги электронлар моляр иссиқлик сизими :

$$c_{\mu\epsilon} = \frac{\pi^2}{2} ZR \left(\frac{T}{T_F} \right). \quad (4.10)$$

бундаги T_F = E_F / k. Θ_D Дебай температурасидан юқори соҳада

c_{μϵ} сизим кристал панжараси c_μ сизимидан анча кичик c_{μϵ} << c_μ, аммо паст температурада панжара иссиқлик сизимидан катта бўлиб олиши мумкин.

Электронлар гази иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентиги :

$$\chi_{э} = \frac{1}{3} c_{vэ} \cdot u \cdot \bar{\ell}_{э}, \quad (4.11)$$

бунда $c_{vэ}$ – электронлар гази бирлик ҳажмининг иссиқлик сифими, u –

электронлар тезлиги, $\bar{\ell}_{э}$ – электронларнинг ўртача югуриш узунлиги. Тоza металлларда $\chi_{э}$ – панжаравий иссиқлик ўтказувчанликдан 1–2 тартиб катта бўлади.

Квантлар назарияси электрик ўтказувчанлик учун классик назария берадиган ифодани беради, аммо $\bar{\ell}$ катталиқ учун квантик назария муҳим фарқ қиладиган қийматлар беради.

Квантлар назарияси Видеман – Франц қонуни учун бошқачароқ ифодани келтириб чиқаради:

$$\frac{\chi_{э}}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 T, \quad (4.9')$$

Ўтказгичдан ток ўтиб турганида t вақтда унинг ҳажмида иссиқлик ажралади:

$$Q = Iut = I^2Rt = \frac{U^2}{R} t, \quad (4.12)$$

Бунда I – ток кучи, U – кучланиш, R – ўтказгичнинг қаршилиги.



1-расм. Металлнинг ўтказувчанлик зонаси. E_c - зонанинг туби (пастки chegarаси). $E_F(0)$ - 0K да зонанинг тўлдирилган Ферми сатхи (юқори чег).

Масалалар ечишга мисоллар

1 — мисол. Металда электронларнинг зичлиги 10^{22} см^{-3} , ток ўтаётгандаги дрейф тезлиги $0,04 \text{ м/с}$ бўлсин. Бу ҳолда СИ бирликда ток зичлиги нимага тенг?

Ечиш : Электронларнинг зичлигини $1/\text{м}^3$ ларда ифодалаш керак : $n=10^{22} \text{ см}^{-3}=10^{28} \text{ м}^{-3}$, сунгра ток зичлиги (4.1) ифода бўйича ҳисобланади:

$$j = env_{\text{др}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{28} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ Ам}^2 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ Ам}^2.$$

2 — мисол. Агар $t_1=0^\circ \text{ С}$ да метал симнинг электрик қаршилиги $R_0=10 \text{ Ом}$, бошқа $t_2=100^\circ \text{ С}$ температурада эса $R=12 \text{ Ом}$. Бу сим қандай металдан ясалган?

Ечиш: Бу масalani ечиш учун қаршилиқнинг температурага боғланиши ифодасидан фойдаланамиз. Ундан $\alpha = \frac{R_t - R_0}{t \cdot R_0}$,

бунда t температура ўзгариши. Берилган маълумотдан фойдалансак, $\alpha = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Жадвалга қарасак, бу коэффициент катталиги алюминийга мансуб экан.

3 — мисол. Металда эркин электроннинг ўтказувчанлик зонасидаги (унинг тубидан) $E=4,0 \text{ эВ}$ ва $E=4,13 \text{ эВ}$ энергияли ҳолатида бўлиш эҳтимолликлари нисбати қандай ?

Ечиш: $T=300 \text{ К}$, $E_F=4 \text{ эВ}$ деб ҳисобланг. $f_1(E - E_F) = \frac{1}{2}$,

$$f_2 = \exp(-5).$$

Демак, $\frac{f_1}{f_2} \approx 74$.

Масалалар

4.1. Ом қонуни ва унинг қўлланилиши

- 4.1. Узунлиги $\ell = 10$ км бўлган тўғри ўтказгич симдаги $I = 400$ А ток кучига мос келадиган электронларнинг P ҳаракат миқдори (импулси) аниқлансин.
- 4.2. Миснинг бир атомига бир эркин электрон тўғри келади деб фараз қилиб, 7 В кучланишда ток ўтиб турган 15 км узунлик — даги 1 мм^2 кўндаланг кесимли мис симнинг бир учидан иккинчи учигача эркин электронларнинг кўчишига қанча вақт керак ?
- 4.3. Агар метал ўтказгичдаги ток кучи 10 с вақт давомида нолдан то 3 А гача текис ўсса, бу ҳолда қанча электр миқдори кўчади ?
- 4.4. Агар чўғланма лампа толасининг диаметри 0,019 мм ва ундаги ток кучи 0,125 А бўлса, толадаги ток зичлиги қандай бўлади ?
- 4.5. Агар металда эркин электронлар зичлиги $2 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ бўлса, ундан ўтаётган ток 10 А, ўтказгичнинг кўндаланг кесими 10^{-4} м^2 бўлса, бу ҳолда электронларнинг ўртача дрейф тезлиги қанча ?
- 4.6. Узунлиги 2 м метал ўтказгичга 20 В кучланиш тушган. Агар дрейф тезлик 1 м/с бўлса, электронларнинг ҳаракатчанлиги аниқлансин.
- 4.7. Металдаги эркин электронлар зичлиги $3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, уларнинг ҳаракатчанлиги $1 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, бу металнинг солиштирма электр ўтказувчанлиги қанча ?
- 4.8. Мис симнинг 20°С даги қаршилиги 10 Ом, унинг температу — раси 50°С га кўтарилганда қаршилиги қандай қийматга эришади ?
- 4.9. Метал ўтказгичдан 10 А ток ўтиб турса ва унинг қаршилиги 0,1 Ом бўлса, унда 1 минутда ажраладиган иссиқлик миқдорини калория бирликларида ҳисобланг.
- 4.10. 0,2 Ом қаршиликли реостат яшаш талаб қилинади. Материал қалинлиги 0,5 мм ва кенглиги 10 мм бўлган никел тасма.

Тасманиниг узунлигини қанча қилиб олиш керак ? Никелнинг солишгирма қаршилигини 40 нОм·м ли деб олинг.

- 4.11. Динамомашинадаги электромагнитларнинг чўлғами мис симдан ясалган бўлиб, 10°C температурада 14,2 Ом қаршиликка эга. Ишдан кейин чўлғамнинг қаршилиги 16,5 Ом бўлиб қолган. Бунда чўлғам температураси қанча ўзгарган ?
- 4.12. Кетма – кет уланган 3 Ом қаршиликли алюминий сим билан 2 Ом қаршиликли темир симдан тузилган ўтказгичнинг температура коэффициентини аниқлансин.

4.2. Металларда электронлар квантик статистикаси

- 4.13. $T=0$ К да металдаги эркин электронларнинг зичлиги n аниқлансин. Ферми энергиясини $E_F=1$ эВ деб олинсин.
- 4.14. Агар литий ва цезийнинг Ферми сатҳлари мос равишда $E_{F1}=4,72$ ва $E_{F2}=1,53$ эВ га тенглиги маълум бўлса, $T=0$ К да улардаги эркин электронлар зичликлари n_1/n_2 нисбати ҳисоблансин.
- 4.15. $T=0$ К да натрийнинг битта атомига тўғри келувчи эркин электронларнинг сони аниқлансин. Натрий учун Ферми сатҳи $E_F=3,12$ эВ, зичлиги $\rho=970$ кг/м³.
- 4.16. Агар Ферми сатҳлари мос равишда $E_{F1}=11,7$ эВ ва $E_{F2}=7,0$ эВ бўлса, $T=0$ К да алюминийнинг битта атомига тўғри келувчи эркин электронларнинг сони мисдагига нисбатан неча марта кўп ?
- 4.17. Ушбу 1) $T_1=290$ К ва 2) $T_2=58$ К учун электроннинг металдаги Ферми сатҳидан пастда ва юқорида $\Delta E=0,05$ эВ оралиқда турган энергетик ҳолатни эгаллаш эҳтимоллиги аниқлансин.
- 4.18. Агар Ферми сатҳи $E_F=7,0$ эВ бўлса, $T=0$ К да металдаги эркин электронларнинг ўртача кинетик энергияси $\langle E \rangle$ қанча ?
- 4.19. Метал $T=0$ К да турибди. Кинетик энергияси $E_F/2$ дан E_F гача бўлган электронлар сони энергияси 0 дан $E_F/2$ гача бўлган электронлар сонидан неча марта кўп ?

5. $T=0$ К даги металда кинетик энергияси Ферми энергиясидан 2% кўп фарқ қилмайдиган эркин электронларнинг нисбий $\Delta n/n$ сони топилсин.
6. Агар бир атомга биттадан атом тўғри келади деб ҳисобласак калий учун айнаш температураси T_a баҳолансин. Калийнинг зичлиги $\rho=860$ кг/м³
7. Металда $T=0$ К да электронларнинг энергия бўйича тақсимооти

$$dn(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}} dE$$

ни билган ҳолда электронларнинг

импулси бўйича $dn(p)$ тақсимоотини топинг ?

8. Исталган T температурада $dn(p)$ тақсимоот ёрдамида металдаги эркин электронларнинг тезликлар бўйича тақсимооти аниқлансин.
9. Кристалдаги эркин электронларнинг зичлиги қандай бўлганда электрон газнинг айнаш температураси 0° С га тенг бўлади ?
10. Алюминий учун $T=0$ К да Ферми энергияси қанча ? Алюминийнинг бир атомга 3 та эркин электрон тўғри келади.
11. kT бирликларида Ферми сатҳида турган электрон энергияси билан тўлдирилиши эҳтимоллиги 0,20 ва 0,80 бўлган электронлар энергиялари орасидаги фарқ топилсин.
12. Металда $+18^\circ$ С температурада Ферми сатҳидан 0,01 эВ пастдаги сатҳнинг тўлдирилиш эҳтимоллиги қандай ?
13. Агар металдаги сатҳ Ферми сатҳидан 0,01 эВ пастда жойлашган бўлса, температура 200 дан 300 К гача ўзгарганда, шу сатҳда электроннинг бўлиш эҳтимоллиги неча марта ўзгаради ?
14. Агар металдаги сатҳ Ферми сатҳидан 0,1 эВ юқорида жойлашган бўлса, у ҳолда температура 1000 К дан 300 К гача пасайса, шу сатҳни электрон эгаллаганлиги эҳтимоллиги неча марта ўзгаради ?
15. $T=0$ К да цезийнинг 1 см³ даги ўтказувчанлик электронларининг тўла кинетик энергияси ҳисоблансин.

7. Бир атомга бир эркин электрон тўғри келадиган содда кубик панжарали метал мисолида $T=0$ К да эркин электронлар де Бройл тўлқини узунлиги $\lambda=h/p$ панжарадаги қўшни атомлар оралигининг тахминан икки баробарига тенг бўлишлиги исботлансин.
8. Металдаги эркин электронларнинг энергия бўйича тақсимот функциясига асосланиб (4.22. – масалага қаранг), $T=0$ К да ва ихтиёрий T температура учун тезликлар бўйича тақсимот функцияси ҳосил қилинсин. Иккала температура учун шу функциянинг графикларини тасвирланг.
9. Металда $T=0$ К да эркин электронларнинг ўртача арифметик тезлигини $v_{\text{макс}}$ тезлик орқали ифодаланг.
10. Металда $T=0$ К да ўтказувчанлик электронларининг ўртача квадратик тезлигини $v_{\text{макс}}$ орқали ифодаланг.
11. Мисдаги эркин электронлар газининг босими топилинсин. Мисда уларнинг зичлиги $n=8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.
12. Бир валентли металнинг содда моделида бир электронга тўғри келган ўртача энергия $E_{\text{эл}} = -\frac{9e^2}{10r^2} + \frac{3\hbar^2}{10mr^2} \left(\frac{9}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}}$, бунда r – бир электронни ўз ичига олган сфера радиуси. Мувозана – тий масофа r_0 топилинсин.
13. Олдинги масалалар шартларидан фойдаланиб, 0 К да ҳар та – рафлама қисилиш модули $B = -V(dp/dV)$ топилинсин.
14. Юқоридаги масалалар маълумотлари асосида мазкур металда товуш тезлиги аниқлансин.

4.3. Металдаги электронларнинг иссиқлик сифими, иссиқлик ўтказувчанлиги.

- 4.39. Хона температурасида кумушнинг умумий иссиқлик сифимига электронлар газининг қўшадиган нисбий хиссасини ҳисобланг. Ҳар бир атомга бир эркин электрон тўғри келади ва шу температурада кумуш кристали панжарасининг ис – сиқлик сифими Дюлонг ва Пти қонунига бўйсунди деб олин – син.

4.40. $T=5$ К температурада кумушнинг умумий иссиқлик сифмига электронлар газининг қўшадиган нисбий хиссаси топилади. Кумуш учун $\theta_D=225$ К, $T_F=64000$ К.

4.41. Металлдаги эркин электронларнинг иссиқлик сифми унинг кристал панжараси иссиқлик сифмига қайси температурада тенг бўлади? Литий учун $\theta_D=404$ К, ундаги эркин электронлар зичлиги $n=4,66 \cdot 10^{28}$ м⁻³.

4.42. (4.11) ифодадаги электронлар газининг бирлик ҳажми иссиқлик сифмини кристал панжараси моляр иссиқлик сифми орқали ифодалаш мумкин: $c_{vэ} = C_{vэ} \cdot n/N_A$.

Одинги масаладаги n нинг қийматидан ва (4.10) ифодадан фойдаланиб, литий учун электронлар бирлик ҳажми иссиқлик сифмини аниқланг. $T=300$ К, $T_F=55000$ К.

4.43. (2.18) ва (4.11) ифодалардан фойдаланиб, $\frac{\chi_{э}}{\chi_{пан}}$ нисбатни

аниқланг. Бунда $\frac{c_{vэ}}{c_{vпан}} \approx 10^{-2}$, $\frac{u_{э}}{u_{ф}} \approx 10^3$, $\frac{l_{э}}{l_{ф}} \approx 10$ деб ҳисоблансин.

4.44. Металда эркин электронларнинг ўртача тезлиги $u_{э} = 2 \cdot 10^5$ м/с, эркин югуриш узунлигини 10^{-7} м, иссиқлик сифмини $c_{vэ} = 3$ Ж/м³К деб ҳисоблаб, эркин электронлар иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини топинг.

4.4. Термоэлектрон эмиссия ҳодисаси

Металларда электронларнинг энергия бўйича тақсимооти нотекис, унда юқори энергияли электронлар ҳам бўлади, улар муайян шароитда метал сиртидан ташқарига чиқиб кетиши мумкин. Бунинг учун электроннинг энергияси E унинг металдан чиқиши χ дан кам бўлмаслиги керак.

T температурада чиқиши χ бўлган металдан вақт бирлигида бирлик сиртдан чиқадиган электронлар оқими i электрон

лар токи зичлиги) I ни Ричардсон – Дешман ифодаси аниқлайди (Бу токни I_S тўйиниш токи ҳам дейилади) :

$$I = A_0 T^2 \exp(-\chi/kT), \quad (4.13)$$

бундаги $A_0 = 120 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2 \text{ K}^2$.

Масалалар

4.45. 3 см узунликдаги ва 1 см радиусли волфрам симдан уни 2000 °С гача қиздирганда чиқадиган J термоэлектрон эмиссия токи ҳисоблансин. Электроннинг чиқиш иши $\chi = 4.5$ эВ.

4.46 Метал сиргидан чиқаёган термоэлектрон ток зичлиги $I = 1,2 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$, температура 2000 К бўлса, ундан электроннинг чиқиш иши неча эВ бўлади ?

4.47 Чиқиш иши $\chi = 3$ эВ бўлган металдан термоэмиссион ток $I = 80 \text{ A/m}^2$ чиқиб туриши учун унинг температураси қанча бўлиши керак?

4.48 Волфрамдан $T_1 = 2000 \text{ K}$ ва $T_2 = 1000 \text{ K}$ чиқаётган термоэлектрон тоқлар нисбати қанча бўлади ?

4.49 Қиздирилган катодларда A_0 ни $100 \text{ A/m}^2 \text{ K}^2$ гача туширилади, чиқиш иши 1 эВ гача пасайтирилади деб ҳисоблаб, бундай катод қандай термоэлектрон ток зичлиги бера олади? $T = 1100 \text{ K}$

4.50 Ташқи электрик майдон чиқиш ишини $\Delta\chi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}}$ эВ

қадар ўзгартиради, бунда E – электрик майдон кучланганлиги, ϵ_0 – вакуумнинг диэлектрик сингдирувчанлиги. Агар бу ҳолда ток (4.13) ифода берадиган тўйиниш токидан 1,1 марта катта бўлса, чиқиш иши ўзгарипи (камайиши) $\Delta\phi$ қанча бўлади?

4.51 Электрон лампада анод ва катод оралиги 1 см бўлса, (4.50) масалада топилган $\Delta\phi$ қийматидан фойдаланиб, анод ва катод орасидаги потенциаллар фарқини аниқланг.

4.52 Саноатда ишлатиладиган оксид катодларнинг одатдаги иш температураси 750 °С ва 5 A/cm^2 тўйинган эмиссия токи

(4.13) беради. Агар амалда катод эмиссияси $0,1 \text{ mA/cm}^2$ бўлса, фазовий заряд ҳосил бўлишидан қўшимча потенциал тўсиқ $\Delta\chi = \Delta\phi$ аниқлансин. $I = AT^2 \exp\left(-\frac{\chi + \Delta\phi}{kT}\right) = I_s \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{kT}\right)$ ифодадан фойдаланинг.

4.53 Агар қандайдир металлдан қилинган чўғланувчи толанинг температурасини 2000 К дан 2001 К гача кўтарилганда электрон лампанинг тўйиниш токи 1 % кўпайган бўлса у ҳолда металлдан электроннинг чиқиш иши қанча ?

4.54 Электрон лампадаги чўғланувчи волфрам симнинг узунлиги 3 см, диаметри 0,1 мм чўғланиш температураси 2700 К. Волфрам учун $A = 60,2 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$. Тўйиниш токи аниқлансин.

4.5. Металларда фотоэффект

Ёруғлик оқимиши турли $h\omega$ энергияли фотонлар оқими деб қаралади, метал ичига кирган фотон энергиясини ундати электронга бериши, агар бу энергия электроннинг чиқиш ишидан катта бўлса, электрон металлдан чиқиб кетиши мумкин, боз устига, фотон энергиясининг чиқиш ишидан ортиқчаси мазкур электроннинг кинетик энергиясига айланади.

Бу ҳодисани Эйнштейн тенгламаси тавсифлайди:

$$h\omega = A_{\phi} + \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.14)$$

бундаги ω – фотоннинг такрорийлиги, m – электрон массаси, v – тезлиги, A_{ϕ} – фотоэлектрик чиқиш иши.

Электронлар ҳаракатини тормозловчи кучланиш бериб, уларни тўхтатиш мумкин. $\omega = A_{\phi} / h$ ни фотоэффект қизил чега – раси дейлади.

Масалалар

4.55. Спектрнинг а) ултрабинафша соҳасида ($\lambda = 330$ ва 250 нм);

б) сариқ соҳасида ($\lambda = 589$ нм) ;

в) қизил соҳасида ($\lambda = 644$ нм) фотонлар энергиясини ҳисобланг, уни жоул ва электроноволт бирликларда ифодаланг.

4.56. Тажрибада уч хил модда учун фотоэффект 6615, 5648, 4434 \AA тўлқин узунликларга мос равишда 0,26; 0,58; 1,18 В бўсағавий кучланишларда содир бўлган. Бўсағавий кучланиш

$V_s = \frac{mv^2}{2e}$ бўлади ва Эйнштейн тенгламасига киритилади. Планк дойимиси h аниқлансин.

4.57. $\lambda = 330$ нм тўлқин узунликли ёруғлик $A_{\phi} = 2,11$ эВ бўлган натрий сиртига тушади. Натрийдан чиққан электронларнинг (фотоэлектронларнинг) максимал тезлиги топилин.

4.58. Юқоридаги (4.56) масала шартлари асосида чиқиш ишини ҳисоблаб топинг.

4.59. $\lambda = 4339 \text{\AA}$ ёруғлик ёритаётган натрийдан чиқаётган фотоэлектрон токни 0,810 В кучланиш билан тўхтатилади.

$\lambda = 3125 \text{\AA}$ бўлса, токни $V = 1,930$ В кучланиш тўхтатилади. h ни СИ бирликларда аниқланг.

4.60. Чиқиш иши $A_{\phi} = 2$ эВ бўлган метал сиртига тўлқин

узунлиги $\lambda = 5000 \text{\AA}$ бўлган монохроматик ёруғлик тушиб турибди. Металдан чиққан электроннинг кинетик энергияси қанча бўлади ?

4.61. Юқоридаги масалада кўрилган энергияли электронларни тормозлаш (тўхтатиш) учун сиртга қандай кучланиш қўйиш керак ?

4.62. Калий металининг фотоэлектрик чиқиш иши 2 эВ. Калий сиртига $\lambda = 350$ нм тўлқин узунликли ёруғлик тушади. Тўхтатувчи (беркитувчи) потенциал V_s ни топинг.

4.63. Юқоридаги масала шартлари асосида энг тез электронлар кинетик энергияси топилин.

4.64. Метал сиртига тушган фотонларнинг ҳаммаси ҳам биттадан электронни металдан чиқаравермайди. Квантик чиқиш деб аталадиган катталиқ фотоэффектга қандай таъсир қилади ?

5 – БОБ

ЯРИМУТКАЗГИЧЛАР

5.1. Электронлар ва ковакларнинг энергетик спектри

Сферик зонали (изотроп) яримўтказгичнинг ўтказувчанлик зонаси туби (пастки чегараси) яқинида электронлар энергияси :

$$E(\vec{k}) = E_C + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n^*}, \quad (5.1)$$

бунда E_C – мазкур зона тубининг энергияси, \vec{k} – электроннинг тўлқин вектори, m_n^* – унинг эффектив массаси.

Носферик зонали (анизотроп) яримўтказгичларда

$$E(\vec{k}) = E_C + \sum_{\alpha} \frac{\hbar^2 k_{\alpha}^2}{2m_{\alpha}}, \quad (\alpha=1,2,3) \quad (5.2)$$

бунда m_{α} , k_{α} – яримўтказгич кристаллининг учта бош ўқи бўйича электроннинг эффектив массалари ва тўлқин вектори та – шкиловчиси. Баъзан масалани соддалаштириш мақсадида $E_C = 0$ деб олинади.

(5.1) ва (5.2) га ўхшаш ифодаларни валент зонадаги коваклар учун ҳам ёзиш мумкин.

Германий ва кремний кристалларда бир энергияли сиртлар

$(E(\vec{k}) = \text{const})$ ўтказувчанлик зонасида эллипсоид кўринишда бўлади, валент зонада эса, параболалар шаклида, аммо икки тар – моқли бўлади. Тегишли ифодалар

$$E(\vec{k}) = E_C + \frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{2k_{\perp}^2}{m_{\perp}} + \frac{k_{\parallel}^2}{m_{\parallel}} \right), \quad (5.3)$$

бундаги k_{\perp} , k_{\parallel} – электрон тўлқин векторининг кўндаланг ва бўй – лама ташкил этувчилари m_{\perp} , m_{\parallel} мос равишда, ушунг кўндаланг ва бўйлама эффектив массалари дейилади. Юқоридаги ифодалар (1) электроннинг импульси $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ (изотроп ҳолда) ва униш ташкил этувчилари $\vec{p}_{\alpha} = \hbar\vec{k}_{\alpha}$ орқали тасвирланиши ҳам мумкин.

Валент зонадаги коваклар энергиясининг икки тармоғи бўлади:

$$E_{p1} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{p1}}, \quad E_{p2} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{p2}}, \quad (5.4)$$

бунда $m_{p1} \neq m_{p2}$. Агар $m_{p1} > m_{p2}$ бўлса, биринчи тармоқни оғир коваклар тармоғи, иккинчисини енгил коваклар тармоғи дей – илади, тегишли m_{p1} ва m_{p2} массалар номи ҳам шуларга мос ай – тилади. Юқоридаги ифодаларда ўтказувчанлик ва валент зона экстремумлари $k=0$ тўлқин векторга тўғри келади деб фараз қилинган. Аммо, кўш кристалларда $E(\vec{k})$ нинг экстремумлари бир қийматига тўғри келмаслиги мумкин. Бундай ҳоллар масалаларда учраганда алоҳида изоҳ берамиз.

Яримўтказгичларнинг тақиқланган зонаси кенлиги тем – пературага боғлиқ ўзгариши мумкин:

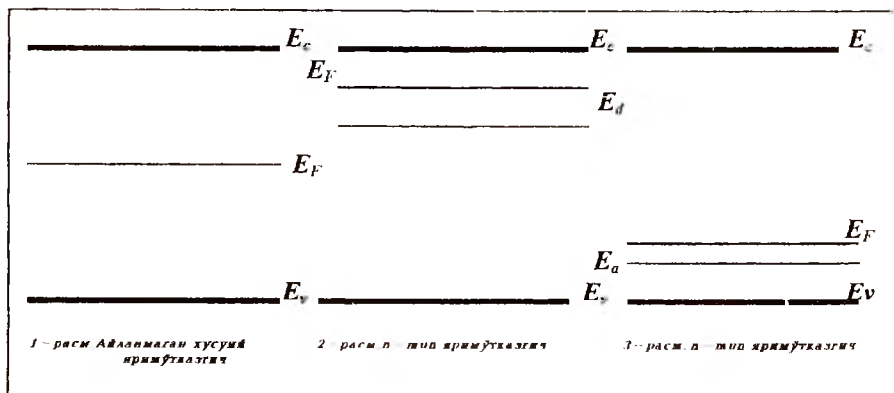
$$E_g = E_{g0} - \zeta T, \quad (5.5)$$

бунда E_{g0} тақиқланган зонанинг $T=0$ К даги қиймати, ζ айрим моддалар учун айрим қийматларга эга бўлган коэффициент.

Галлий арсениди кристаллида ўтказувчанлик зонасида ора – лиги $\Delta E = 0,35$ эВ бўлган иккита минимум бор.

Донор хоссали киришмаларнинг ионлашиш энергияси E_A , бу энергетик сатҳ айнамаган яримўтказгичларда тақиқланган зо – нада – ўтказувчанлик зонаси яқинида жойлашган бўлади.

Акцептор хоссали киришмаларнинг ионланиш энергияси E_a , бу энергетик сатҳ айрилган ҳолда валент зонага яқин бўлади. Айнамаган яримўтказгичларда Ферми сатҳи ҳам тақиқланган зо – нада, айниган яримўтказгичларда ёки ўтказувчанлик ёки валент зонада жойлашган бўлади.



Ярим ўтказгичларда электронлар ва коваклар статистикаси

Сферик зонали (изотроп) ярим ўтказгичларда ўтказувчанлик зонасидаги эркин электронлар (ўтказувчанлик электронлари) зичлиги:

$$n_0 = N_C \Phi_{\frac{1}{2}}(E_F^*), \quad (5.6)$$

бунда
$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad \Phi_{\frac{1}{2}}(E_F^*) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{1}{2}} dx}{e^{x - E_F^*/kT}}, \quad E_F^* = \frac{E_F}{kT}$$

$$x = \frac{E}{kT}$$

E_F — Ферми энергияси (сатҳи).

Ушундай яримўтказгичларда валент зонадаги эркин коваклар (ўтказувчанлик коваклари, ҳаракатчан коваклар) зичлиги :

$$p_0 = N_V \Phi_{\frac{1}{2}}(-E_g^* - E_F^*), \quad (5.7)$$

$$\text{бунда } N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{\hbar^2} \right)^{3/2} \Phi_{1/2}(-E_g^* - E_F^*) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{x' dx'}{e^{x' + E_g^* + E_F^*}},$$

$$E_g^* = \frac{E_g}{kT}.$$

Айнимаган яримўтказгичда $[\exp(-E_F / kT) \gg 1]$ юқоридаги ифодалар соддалашади :

$$n_o = N_c \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right), \quad (5.8)$$

$$p_o = N_v \exp\left(\frac{-E_g - E_F}{kT}\right). \quad (5.9)$$

хусусий яримўтказгичда $n_o = p_o = n_i$, яъни,

$$n_i = N_c \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) = N_v \exp\left(\frac{-E_g - E_F}{kT}\right). \quad (5.10)$$

Яна бир муҳим муносабатни тақидлаб ўтамиз :

$$n_o p_o = n_i^2$$

Айниган яримўтказгичлар ҳолида металлдаги эркин электронларнинг зичлиги ифодасидан фойдаланиш керак, аммо яримўтказгич ё электронлар, ё ковалар зичлиги бўйича айниган бўлишлигини эсда тутиш керак.

Юқорида [хусусан, (5.3) ифода] айтилгандек эллипсоидал ўтказучанлик энергия зоналарига эга бўлган яримўтказгичларда:

$$E(p) = \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} + \frac{p_3^2}{2m_2} = \frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{k_1^2}{m_1} + \frac{k_2^2}{m_2} + \frac{k_3^2}{m_2} \right) \quad (5.11)$$

ифода ўрилади, аммо бу ҳолда (5.8) ифодада m_n^* ни

$$m_{nd}^* = v^2 (m_1 m_2 m_3)^{1/3} \quad (5.12)$$

ҳолатлар зичлиги эффектив массаси билан алмашгирсак, бу ифода кейинги ҳолга ҳам қўлланилади.

Ферми энергияси (сатҳи) яримўтказгичнинг электроней-траллик шартидан аниқланади.

Хусусий изотрон яримўтказгич айнамаган бўлганда унинг кўриниши :

$$E_F = -\frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \cdot \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right), \quad (5.13)$$

$$\text{демак, } n_o = p_o = n_i = 2 \left(\frac{2\pi\sqrt{m_n^* m_p^*} kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (5.14)$$

Донор киришмали яримўтказгичда етарлича паст температураларда :

$$n_o = \sqrt{\frac{N_d \cdot N_c}{2}} \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right). \quad (5.15)$$

ифода ўринли бўлади. Киришма ионлашиб бўлганда $n_o = N_d$, бироқ етарлича юқори температураларда киришмали яримўтказгич хусусий яримўтказгич хоссаларига эга бўлиб қолади ($n_o = n_i$).

Донорлар зичлиги N_d , акцепторлар зичлиги N_a бўлган яримўтказгичда ($N_d > N_a$) паст температуралар соҳасида ўтказувчанлик зонасидаги электронлар зичлиги :

$$n_o = \sqrt{\frac{(N_d - N_a)N_c}{2}} \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right). \quad (5.16)$$

Акцептор киришмали p-типли яримўтказгич учун :

$$p_o = \sqrt{\frac{N_a \cdot N_v}{2}} \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right), \quad (5.17)$$

$$p_o = \sqrt{\frac{N_a - N_d}{2}} N_v \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right). \quad (5.18)$$

Донор сатҳдаги электронлар зичлиги :

$$n_d = N_d \left[1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_d + E_F}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (5.19)$$

Акцептор сатҳдаги коваклар зичлиги :

$$p_a = N_a \left[1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_g + E_F - E_a}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (5.20)$$

Яримўтказгичларнинг электрик хоссалари улардаги заряд ташувчилар ҳаракатчанликларига боғлиқ бўлади. Ҳаракатчанлик ўз навбатида температурага ва заряд ташувчиларнинг яримўтказгичларда тўқнашиш механизмларига боғлиқ равишда турлича ифода-

ланади:
$$\mu = \frac{e\langle\tau\rangle}{m^*}$$

Заряд ташувчилар асосан кристал панжараси атомлари билан тўқнашган ҳолда ҳаракатчанлик T га боғланган :

$$\mu = aT^{-3/2} \quad (5.21)$$

5.3 Яримўтказгичларнинг электрик ўтказувчанлиги

Яримўтказгичлар солиштирма электрик ўтказувчанлиги ифодаси:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (5.22)$$

бунда n , p — эркин электронлар ва эркин коваклар зичликлари, μ_n ва μ_p — уларнинг ҳаракатчанликлари.

Солиштирма электрик қаршилик :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{en\mu_n + ep\mu_p} \quad (5.23)$$

n — тип яримўтказгичда :

$$\sigma_n = en\mu_n \text{ ва } \rho_n = (en\mu_n)^{-1}$$

p — тип яримўтказгичда :

$$\sigma_p = ep\mu_p \text{ ва } \rho_p = (ep\mu_p)^{-1} \quad (5.25)$$

Масалалар ечишга мисоллар

1 — мисол. Кремнийда ўтказувчанлик зонасида 6 та эквивалент минимум бор. Электронларнинг бўйлама массаси $m_{||} = 0,98m_0$, қўндаланг массаси $m_{\perp} = 0,19m_0$. Ҳолатлар зичлиги эффектив массасини аниқланг.

Ечиш. (5.12) ифодага асосан, $m_{nd}^* = v^2 (m_{\perp} m_{\perp} m_{\perp})^{\frac{1}{3}}$. Кремний учун $v=6$, $m_{\perp} = m_{\perp} = m_{\perp}$, $m_{||} = m_{||}$. Берилган қийматларни қўйсак,

$$m_{nd}^* \approx 0,98 \cdot 10^{-30} \text{ кг.}$$

2 — мисол. Бир текис ёритиш шароитида яримўтказгичда ортиқча заряд ташувчилар зичлиги Δn_{cm} бўлган. τ туқнашишлар ўртacha вақти бўлса, ёритиш тўхтатилгандан кейин $t=4\tau$ вақт ўтгач, ортиқча заряд ташувчилар зичлиги неча марта камайган?

Ечиш. Ёритиш тўхтатилгач, рекомбинация йўли билан ортиқча заряд ташувчилар зичлиги камайиб боради. Бу ҳодиса

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau} \text{ тенглама билан тавсифланади. } t=0 \text{ да}$$

$\Delta n = \Delta n_{cm}$ бошланғич шарт билан бу тенгламани ечсак,

$$\Delta n(t) = \Delta n_{cm} \exp(-t/\tau)$$

ечим олинади.

$$\text{Талаб қилинган жавоб: } \frac{\Delta n(t=4\tau)}{\Delta n_{cm}} = \exp(-4) \approx 0,018 = \frac{1}{54,7}$$

3 — мисол. Кремнийда электронлар ва коваклар ҳаракат-чанликлари нисбати $\frac{\mu_n}{\mu_p} = b = 2,9$. Агар $m_{nd}^* = 0,98m_0$, $m_{pd}^* = 0,59m_0$

бўлса, электронлар ва коваклар ўртacha туқнашиш вақтлари нисбати қандай бўлади?

Ечиш. (5.49) ифодада $m_n^* = m_{nd}^*$, $m_p^* = m_{pd}^*$ деб оламиз ва

$$\frac{\langle \tau_n \rangle}{\langle \tau_p \rangle} = \frac{1 m_{pd}^*}{b m_{nd}^*} = 0,21.$$

Масалалар

Электронлар ва коваклар статистикаси

- 5.1. Агар $E_g = (0,785 - \xi T)$ эВ бўлса, айнамаган хусусий яримўт — казгичда $T_1 = 200$ К дан $T_2 = 300$ К гача температура ўзгарганда электронлар зичлиги қанча марта ўзгаради?
- 5.2. Айнамага хусусий яримўтказгичда 400 К температурада электронлар зичлиги $1,38 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ бўлган. Агар тақиқланган зона кенлиги $E_g = (0,785 - 4 \cdot 10^{-4} T)$ эВ қонун бўйича ўзгарса, бу ҳолда электрон ва ковак эффектив массалари кўпайтмаси аниқлансин.
- 5.3. Хона температураси (300 К) да кремнийда хусусий зичликни аниқланг. $E_g = 1,12$ эВ, $m_{nd}^* = 9,8 \cdot 10^{-31}$ кг, $m_{pd}^* = 5 \cdot 10^{-31}$ кг.
- 5.4. Хона температурасида германийда электронларнинг хусусий зичлиги ҳисоблансин. $E_g = 0,66$ эВ, $T = 300$ К, $m_{pd}^* = 0,362 m_0$, m_0 — эркин электрон массаси.
- 5.5. Тақиқланган яримўтказгичда электронлар зичлиги 400 К да $1,3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ва 350 К да $6,2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ бўлган. Тақиқланган зона кенлиги температура сари чизикий қонун бўйича ўзгаради деб ҳисоблаб, E_{g0} ни ҳисобланг.
- (2) 5.6. Кремнийда ҳолатлар зичлиги эффектив массаси $m_{nd}^* = 9,8 \cdot 10^{-31}$ кг. Ушбу $T_1 = 300$ К, $T_2 = 100$ К ва $T_3 = 30$ К температураларда N_C ни аниқланг.
- 5.7. Айнаган n -типли кремнийда Ферми сатҳи вазиятини аниқланг. $n = 10 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $m^* = m_{nd}^* = 9,8 \cdot 10^{-31}$ кг деб ҳисоблансин.

Сўнгра, ушбу $\Phi_{\frac{1}{2}}\left(\frac{E_F}{kT}\right) = \frac{2}{3}\left(\frac{E_F}{kT}\right)^2$ тақрибий ифодадан фойдала-

ниб $T = 300\text{K}$ учун E_F ни топинг. N_C қийматини б — масала жа —
вобидан олинг.

5.8. Кремнийда сурма киришмаси атомлари $T=300\text{K}$ да тула ион —
лашган ҳолатда бўлади. Уларнинг зичлиги $N_d=10 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, ион —
ланиш энергияси $E_d = 0,0096 \text{ эВ}$ деб ҳисоблаб, Ферми сатҳини
аниқланг. $m_{nd}^* = 9,8 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

5.9. Бор атомлари киритилган ($N_a=10^{23} \text{ м}^{-3}$) кремнийда ҳона тем —
пературасида коваклар зичлиги қанча бўлади? қўйидаги маълумот —
моддан фойдаланинг: $E_a = - 0,045 \text{ эВ}$, $N_v=1,16 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

5.10. Германийга сурма ва бор атомлари киритилган. Борнинг
зичлиги 10^{21} м^{-3} , компенсирлаш даражаси $N_a / N_d = 0,5$. Агар
 $m_{nd}^* = 0,55m_0$, $E_d=0,01 \text{ эВ}$ бўлса, у ҳолда $T = 25 \text{ K}$ да электрон —
лар зичлиги қанча бўлади?

5.11. Зичлиги $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ микдорда марғумуш (As) ва зичлиги
 $1,2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ микдорда алюминий (Al) билан легирилган
кремнийда электронлар зичлиги $n_0=N_d - N_a$ доимий бўладиган
температуралар оралиги аниқлансин. Керакли маълумот:
 $m_{nd}^* = 1,1m_0$, $E_g = (1,21 - 2,8 \cdot 10^{-4}T) \text{ эВ}$. Марғумушнинг ионланиш
энергияси $E_d=0,05 \text{ эВ}$.

5.12. Кремнийга 10^{22} м^{-3} зичликда фосфор киритилган. $E_d=0,045$
эВ. қайси температурада Ферми сатҳи донорлар сатҳи устига
тушади?

5.13. Галлий арсенидининг ўтказувчанлик зонасидаги икки ми —
нимумдаги электронлар зичликлари нисбати $T=300 \text{ K}$ ва 1000 K
температуралар учун топилсин. Минимумларда массалар нис —
бати $m_2=15m_1$, $\Delta E=0,35 \text{ эВ}$.

5.14. Индий антимиониди InSb да электронлар зичлиги донорлар
зичлигига тенг ва ўзгармас қоладиган температура оралиги
аниқлансин. $m_n^* = 0,015m_0$, $E_{g0}=0,26 \text{ эВ}$, $\xi_5=2,7 \cdot 10^{-4} \text{ эВ K}^{-1}$,
 $E_d=0,001 \text{ эВ}$, $N_d=2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Ўтказувчанлик зонасини параболик
зона деб ҳисоблансин.

Ярим ўтказгичларнинг электрик ўтказувчанлиги

- 5.15. Тоza кремнийда электронлар ва коваклар зичлиги 300 К да $n_i=10^{16} \text{ м}^{-3}$, ҳаракатчанликлари $\mu_n = \mathbf{0,145} \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, $\mu_p = \mu_n / \mathbf{2,9}$. Мазкур температурада кремнийнинг солиштирма электрик ўтказувчанлиги ва қаршилиги ҳисоблансин.
- 5.16. Тоza германийда 300К да $n_i=2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $\mu_n = \mathbf{0,38} \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ $\mu_p = \mu_n / \mathbf{2,1}$ Шу температурада германийнинг солиштирма электрик ўтказувчанлиги ва қаршилиги ҳисоблансин.
- 5.17. Галлий арсенидида минимумларда электронлар ҳаракатчанликлари ва уларнинг тўла зичлиги температурага боғлиқ эмас деб ҳисоблаб, температура 300 К дан 1000 К гача ўзгарганда электрик ўтказувчанлик неча марта ўзгаришини аниқлансин. $\mu_1 = \mathbf{50}\mu_2$. Кўрсатма: 5.13–масала шарт ва ечилишига қаранг.
- 5.18. Тоza германийда 300 К да электронлар ҳаракатчанлиги $\mu_n = \mathbf{0,38} \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$. Ҳаракатчанлик $\mu = \mathbf{aT}^{\frac{3}{2}}$ қонуни бўйича ўзгаради деб ҳисоблаб, 30 К да шу материалнинг солиштирма қаршилиги топилсин. $m_{nd}^* = 0,55m_0$, $m_{pd}^* = 0,36m_0$, $E_g = (0,785 - 4 \cdot 10^{-4}T) \text{ эВ}$, $\mu_n = \mathbf{2,1}\mu_p$.
- 5.19. Кремнийга $N_a=10^{23} \text{ м}^{-3}$ зичликда бор В атомлари киритилган. Агар $m_{pd}^* = 0,59m_0$, $\mu_p = \mathbf{10}^2 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, $E_a = 0,045 \text{ эВ}$ бўлса, у ҳолда кремнийнинг ҳона температурасида солиштирма қаршилиги қанча бўлади? 194 К $<T < 879$ К ораликда коваклар зичлиги ўзгармас бўлади.
- 5.20. Тоza кремнийнинг температураси 300 К дан 400 К гача ўзгарганда унинг хусусий зичлиги ва солиштирма электрик ўтказувчанлиги неча марта ўзгаради? (5.11 ва 5.15 – масала шартларидан фойдаланинг).
- 5.21. хусусий яримўтказгичда $E_g=1\text{эВ}$, $m_p^* / m_n^* = \mathbf{0,8}$ бўлса, $T=300$ К температурада ундаги Ферми сатҳи қандай қийматга эга?

- 5.22. n – тип яримўтказгичда $N_d=1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ва $E_d=0,04 \text{ эВ}$ бўлса, қайси температурада электронлар зичлиги $n_0=N_d$ бўлади?
- 5.23. $T=300 \text{ К}$ да тоза кремний билан донорлар ($N_d=1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ зичликда) киритилган кремний солиштирма электрик ўтказувчанликларини такқосланг. Донорлар тўла ионлашган деб ҳисоблансин.
- 5.24. Германийга чуқур энергетик сатҳ ҳосил қиладиган киришма ва компенсирловчи саёз сатҳ ҳосил қиладиган сурма киришмаси киритилган. (Сурманинг зичлиги чуқур сатҳли киришма зичлигидан кичик) 300 К температурада сурманинг нейтрал атомлари зичлигининг ўтказувчанлик зонасидаги электронлар зичлигига нисбати топилин. $N_{Sb}=2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $E_{Sb}=E_d=0,01 \text{ эВ}$.
- 5.25. Берилган (5.20) ифода асосида $N_a=3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ зичликдаги, ионланиш энергияси $E_a=0,02 \text{ эВ}$ бўлган акцептор киришманинг ионланган ва ионланмаган қисмлари нисбати $T=300 \text{ К}$ да қанақа бўлади? $E_g=1 \text{ эВ}$, $E_F(300 \text{ К})=0,9 \text{ эВ}$ деб олинсин.

Ярим ўтказгичларда заряд ташувчилар рекомбинацияси

Бирор таъсир (масалан, ёруғлик таъсири) оқибатида заряд ташувчилар зичликлари ўзларининг мувозанатий n_0 , p_0 қийматларидан четланади, аммо зоналарда пайдо бўлган ортиқча заряд ташувчилар муайян вақтдан сўнг олдинги ҳолатларига қайтади. Масалан, валент зонасидан таъсир оқибатида ўтказувчанлик зонасига ўтказилган электронлар бу зонада муайян вақт (яшаш вақти) бўлгач, яна валент зонага қайтиб, ўзи қолдирган ҳолатни эгаллайди (ковак билан электрон бирлашиб, бир эркин электрон ва бир эркин ковак йўқолади – боғланиб қолади). Мана шу жараёни рекомбинация дейилади.

Агар ҳосил қилинадиган ортиқча электронлар зичлиги Δn , ковакларники Δp бўлса, уларнинг тегишли зоналарда ўртача яшаш вақти τ_n , τ_p бўлса, бу ҳолда ҳажм бирлигида бирлик вақтда рекомбинация – ланаётган электронлар ва коваклар сони (рекомбинация суръати) мос равишда,

$$R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n}, \quad R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}, \quad (5.26)$$

Ўтказувчанлик зонасидаги электронлар тўғридан – тўғри валент зонага ўтиб рекомбинацияланаган бўлса, буни зоналар аро рекомбинация дейилади. Унинг суръати (тезлиги) :

$$R = \gamma_H (np - n_o p_o) = \frac{np - n_i^2}{n_i^2} R_o. \quad (5.27)$$

кўринишда ифодаланади, ҳисоблашлар йўли билан γ_H топилади:

$$\gamma_H = \frac{1}{\pi^2 c^2 n_i^2} \int_0^\infty \frac{n^2 \alpha \omega d\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}, \quad (5.28)$$

бунда n – нисбий синдириш курсаткичи, ω – рекомбинация жараёнида чиқариладиган фотонлар такрорийлиги, α – ёруғлик ютилиш коэффициентини.

Зоналар аро рекомбинация нурланишли ёки нурланисиз бўлиши мумкин.

Зоналар аро зарбий рекомбинация (Оже – рекомбинация) жараёни ҳам содир бўлиши мумкин.

Кўп холларда тақиқланган зонадаги сатҳлар орқали (маҳаллий марказлар орқали) юз берадиган рекомбинация ўринли бўлади. Бунда тақиқланган зонадаги E_t энергияли N_t зичликдаги киришма ёки бошқа нуқсонлар ҳосил қилган сатҳга электрон ўтказувчанлик зонасидан ўтади, сўнгра у валент зонага ўтиб рекомбинацияланади. Бу жараёни E_t сатҳда электрон ва ковакнинг учрашуви тарзида тавсифлаш ҳам мумкин.

Бир зарядли маҳаллий марказ орқали кетаётган рекомбинация ҳоли учун назария номувозанатий заряд ташувчилар яшаш вақти ифодасини келтириб чиқарган:

$$\tau = \tau_{p0} \frac{n_o + n_1 + \Delta n}{n_o + p_o + \Delta n} + \tau_{n0} \frac{p_o + p_1 + \Delta n}{n_o + p_o + \Delta n}, \quad (5.29)$$

бундаги $\tau_{p0} = 1/\gamma_p N_t$, $\tau_{n0} = 1/\gamma_n N_t$, $n_1 = N_c \exp(E_t/kT)$, $p_1 = N_v \exp(-(E_g + E_t)/kT)$,

$n_1 p_1 = n_0 p_0 = n_i^2$, γ_p , γ_n – мос равишда ковак ва электроннинг E_i сатҳга ушланиш коэффициентлари. Булар ушланиш кесимлари билан боғлиқ :

$\gamma_n = v_T S_n$, $\gamma_p = v_T S_p$, v_T – иссиқлик ҳаракат тезлиги.

Умумий ҳол учун ёзилган (5.29) айрим чегаравий ҳолларда соддароқ

кўринишга келиб, ойдинроқ талқин қилиш имконини беради.

Доимий генерация шароитида номувозанатий заряд та – шувчилар сони $\Delta n_{ст}$ бўлса, генерация тўхтатилгач (рекомбинация орқали) мувозанат ҳолатига қайтиш, яъни $\Delta n(t)=0$ бўлиш жараёни кетади. Бунда

$$\Delta n(t) = \Delta n_{см} \exp(-t/\tau) = \Delta n(0) \exp(-t/\tau). \quad (5.30)$$

Аксинча, генерация манбаи ишга туширилгандан то $\Delta n_{ст}$ га эришилгунча

$$\Delta n(t) = \Delta n_{ст} [1 - \exp(-t/\tau)] = \Delta n(0) [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (5.31)$$

қонуният ўринли бўлади.

Кристал намунасига тушаётган ёруғликнинг бир қисми қайтади, бир қисми ютилади ва қолгани ўтиб кетади.

Хусусан, ютилиш оқибатида намуна ичига кирган I ёруғлик оқими (интенсивлиги) камая боради; x йўналишида ёруғлик кир – раётган ҳолда :

$$I(x) = I(0) \exp(-\alpha x), \quad (5.32)$$

бундаги α – ютилиш (ютиш) коэффициентини, $I(0)$ – кираётган ёруғлик оқими, $I(x)$ – сиртдан x масофа ичкаридаги ёруғлик оқими. Ёруғлик оқимини $I = h\nu q$ тарзда q фотонлар оқими орқали ифо – даласак ,

$$q(x) = q(0) \cdot \exp(-\alpha x). \quad (5.33)$$

Бу қонун Бутер – Ламберт қонуни деб аталган.

Ҳажм бирлигида ёруғлик ютилиши (генерация тезлиги):

$$-dl(x) / dx = \alpha \cdot I(x) = g(x). \quad (5.34)$$

Стационар ҳолатда:

$$g(x) = R(x) \text{ ёки } \Delta n_{ст} = g\tau. \quad (5.34^*)$$

Масалалар ечишга мисол

Мисол: Бир текис ёритилаётган намуна ҳажмида генерация тезлиги $g_0=10^{24} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ бўлса, ёритиш тўхтатилгач, фотоэлектронлар зичлиги қандай камайиб боради? Электронлар яшаш даври $\tau=10^{-4} \text{ с}$.

Ечиш: (5.31) ифодага $\Delta n_{\text{ст}}$ ўрнига $g_0\tau$ қўйилса, жавоб:
 $\Delta n(t)=g_0\tau \cdot [1 - \exp(-t/\tau)]=10^{20}[1 - \exp(-10^4 t)] \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$

МАСАЛАЛАР

- 5.26. Кристалнинг ҳажми бўйича бирдай суръатда электрон ковак жуфтлари ҳосил қилиб турган ёруғлик манбаи узиб қўйилгандан $t_1=10^{-4} \text{ с}$ вақт ўтгач заряд ташувчилар зичлиги $t_2=10^{-3} \text{ с}$ вақт ўтгандагидан 10 марта катта бўлган. Яшаш вақти τ ни аниқланг.
- 5.27. Агар n -тип намунанинг қалинлиги хусусий ютилиш α коэффициентининг тескари қиймати α^{-1} дан кичик, рекомбинация маҳаллий марказлар (соғда нуқсонлар) орқали юз бераётган, $n_0=10^{21} \text{ м}^{-3}$, $\tau = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, 1 м^2 га 1 с да тушаётган квантлар сони $q=5 \cdot 10^{15}$ бўлса, электрик ўтказувчанликнинг нисбий ўзгариши қанча бўлади?
- 5.28. n -Ge кристаллида зичлиги $N_t=5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ва энергия сатҳи $E_t=E_g/2$ бўлган рекомбинация марказлари бор. 300 К да электрон ва ковакларнинг ушланиш кесимлари бир хил, мувозанатдан четланиш кичик ва $\tau=10^{-4} \text{ с}$, $\rho=0,05 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Тугилиш кесими S ни аниқланг.
- 5.29. n -Ge намунасида рекомбинация марказлари зичлиги $N_t=2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ бўлган соғда марказлар орқали бораётир. $T=200 \text{ К}$ да эса $\tau=2 \text{ мкс}$. Ковакларнинг ушланиш кесими S_p ни топинг.
- 5.30. Электронлар зичлиги кўп бўлган ($n_0 \gg p_0$) ҳолда ковакларнинг яшаш вақти $\tau_{p0}=(\gamma_p N_t)^{-1}$ асосий ўрин тутади. $N_t=10^{18} \text{ м}^{-3}$, $\gamma_p=3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ бўлса, бу ҳолда умумий япаш вақти нимага тенг?

- 5.31. Агар $E_t = -E_g/3$ бўлса, кремний учун $E_g=1,2$ эВ бўлган ҳолда n_1 ва p_1 катталиклар қиймати $T=300$ К учун аниқлансин. $N_c(300)=2,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ёки $n_1 = 1,05 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$.
- 5.32. Ютилиш коэффициенти $\alpha=0,005 \text{ м}^{-1}$, намунанинг қалинлиги $d=1$ мм бўлса, ундан чиқаётган фотонлар сони унга кирган фотонлар сонидан неча марта кам бўлади ?
- 5.33. Агар намуна қалин, $\alpha=3 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$ ва $I(x) / I(0)$ нисбат 10^{-2} қийматига тушганда ёруғлик тўла ютилади деб ҳисобласак, у қанча ичкарига кира олади ?
- 5.34. n -Ge ($n_0=10^{21} \text{ м}^{-3}$) намунаси доимий ёритилиб ҳажм бўйича заряд ташувчилар жуфтлари текис пайдо қилиб турилади. Суғ ёритишда $\tau_0=2$ мкс, аммо $\Delta n/n_0=0,1$ бўлганда $\tau=4,7$ мкс. $E_t=-0,20$ эВ деб ҳисоблаб, 300 К да коваклар ва электронлар ушланиш кесимларини нисбатини аниқланг.
- 5.35. $T=300$ К да $\rho=1,65 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ солиштирма қаршиликка эга бўлган электрон ўтказувчанликли германий кучсиз ёритилганда яшаш вақти $\tau=\tau_0=2,0$ мкс. Ёритиш кучлироқ бўлганда $\rho_1=1,275 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ва $\tau=\tau_1=3,3$ мкс. Рекомбинация сатҳи $E_t=(-E_g+0,32)$ эВ. Шу маълумот асосида τ_{p0} ва τ_{n0} топилинсин.
- 5.36. Яримўтказгичга $N_a=10^{22} \text{ м}^{-3}$ зичликли акцептор киришма киритилган. Унинг сатҳи тақиқланган зона ўртаси яқинида жойлашган. Ушланиш кесимлари нисбати $S_p/S_n=100$. Яримўтказгичда $N_d=10^{21} \text{ м}^{-3}$ микдорда саёз донорлар ҳам бор. Паст температурада намунани 1 с да 10^{25} м^{-3} заряд ташувчилар жуфти ҳосил қилувчи ёруғлик ёритади. $\tau_n=10$ мкс бўлса τ_p , Δn ва Δp аниқлансин.
- 5.37. Олдинги масала шароитида γ_n ва γ_p ушланиш коэффициентилари топилсин.
- 5.38. Кучсиз стационар генерация тўхтатилгандан кейин n -тип ярим ўтказгичда оргиқча заряд ташувчилар зичлиги вақтга қандай боғланган? Рекомбинация вақти τ_r , ёпишиш сатҳлари ушланиш вақти τ_1 ва бу сатҳлардан ўтказувчанлик зонасига ўтиш вақти τ_2 маълум.

5.39. Юқоридаги 5.38 – масала шароитида n – Ge да ($n_0=5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ стационар $g=10^{25} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ генерация оқибатида электрик ўт – казувчанлик нисбатан қандай ўзгарган ?

5.40. n – Ge намунасида $E_i=(-E_g+0,16)$ эВ сатҳли, $N_i=10^{20} \text{ м}^{-3}$ зичликли рекомбинация марказлари бор. Коваклар ушланиши коэффициенти $\gamma_p=10^{-14} \text{ м}^3\text{с}^{-1}$, эркин электронлар зичлиги 150 К да, $n_0=4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. $\Delta r_i/\Delta p=24$. Ҳа температурада, куч – сиз ёритишда ва $N_i=10^{18} \text{ м}^{-3}$ бўлганда электронлар ва ковак – ларнинг яшаш вақтлари аниқлансин.

5.5. Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг диффузияси ва дайдиши (дрейфи)

Яримўтказгич намунасида зарядлар тақсимоти нотекис бўлганида унда диффузион тоқлар зичлиги уларнинг зичликлари градиентига пропорционал бўлади:

$$\vec{j}_{n,\text{дифф}} = eD_n \text{grad}(n), \quad \vec{j}_{p,\text{дифф}} = eD_p \text{grad}(p). \quad (5.35)$$

бунда D_n, D_p – электронлар ва ковакларнинг диффузия коэффи – циентлари. Электронлар ва коваклар тоқлари тўла зичликлари диффузион ва дрейф ташкил этувчилардан иборат:

$$\vec{j}_n = eD_n \text{grad}(n) + en\mu_n \vec{E}, \quad \vec{j}_p = -eD_p \text{grad}(p) + ep\mu_p \vec{E}. \quad (5.36)$$

бунда \vec{E} – электрик майдон кучланганлиги.

Мувозанат ҳолатида тоқлар бўлмайди, бинобарин, $\vec{j}_n = \mathbf{0}$ ва

$$\vec{j}_p = \mathbf{0}.$$

х йўналишни танлаб олсак, $\text{grad}n=dn/dx$, $\text{grad}p=dp/dx$

Бундан ташқари электростатик майдон кучланганлиги $E=-d\phi/dx$, бу ерда ϕ – электростатик потенциал. Бундай майдонда Болцман тақсимоти ўринли: $n=C_1 \exp(e\phi/kT)$, $p=C_2 \exp(-e\phi/kT)$. Бу ифодаларни

$\vec{j}_n = \mathbf{0}$ ва $\vec{j}_p = \mathbf{0}$ тенгликларга қўйилса,

$$D_n=kT\mu_n/e \text{ ва } D_p=kT\mu_p/e. \quad (5.37)$$

Бу тенгликларга Эйнштейн муносабатлари дейилади.

Агар яримўтказгичда заряд ташувчилар вужудга келтири-
лаётган ва улар рекомбинацияланаётган бўлса, уларнинг кинети-
касини узлуксизлик тенгламалари тавсифлайди:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{e} \operatorname{div} \bar{j}_n; \quad \frac{\partial p}{\partial t} = g - \frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{e} \operatorname{div} \bar{j}_p. \quad (5.38)$$

Бу тенгламалар биз кўпроқ қўллайдиган бир ўлчовли ҳолда :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{e} \frac{\partial \bar{j}_n}{\partial x}, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = g - \frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{e} \frac{\partial \bar{j}_p}{\partial x} \quad (5.39)$$

кўринишларда ёзилади, бунда g — генерация тезлиги.

Диффузия жараёнларини қараганда электронлар ва ко-
вакларнинг диффузион узунликлари номли L_n ва L_p катталиклар
кiritилади :

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (5.40)$$

Агар яримўтказгич намунасида электрик нейтраллик бўл-
маса,

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{4\pi\rho}{\epsilon} \quad \text{ёки СИ системада} \quad \operatorname{div} \bar{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} \quad (5.41)$$

Пуассон тенламасидан фойдаланишга тўғри келади.

Ортиқча заряд ташувчиларнинг биргаликда тарқалишини

$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial t} = g - \frac{\Delta p}{\tau} + \operatorname{div}(D \cdot \operatorname{grad} \Delta p) - \mu \cdot E \cdot \operatorname{grad} \Delta p. \quad (5.42)$$

тенглама тавсифлайди, бундаги D — биқутбий диффузия коэффи-
циенти, μ — биқутбий дрейф ҳаракатчанлик:

$$D = \frac{n+p}{n/D_p + p/D_n}, \quad \mu = \frac{n-p}{n/\mu_p + p/\mu_n}. \quad (5.43)$$

Бу ҳолда биқутбий диффузия узунлиги кiritилади:

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (5.44)$$

(5.42) тенгламанинг чегаравий шартларини ифодалаш зарур.
Яримўтказгич сирти яқинидаги қатламда ортиқча заряд ташувчи-
лар рекомбинацияси юз беради. Сиртнинг бир бирлигида 1 с да

рекомбинацияланаётган электрон–ковак жуфтлар сонини R_S орқали белгилаб сиртий рекомбинация тезлигини (s) аниқлаймиз :

$$s = R_S / \Delta n = R_S / \Delta p. \quad (5.45)$$

Сиртда рекомбинацияланаётган электронлар ва ковакларнинг сиртий генерацияси g_S ва ортиқча ташувчиларнинг сиртга томон оқими келтириб туради; p – яримўтказгич ҳолида :

$$g_S = (j_k v) / e + s \Delta n \quad (5.46)$$

бунда v – сиртга тик бирлик вектор

Сиртдаги рекомбинация тезлиги намунани тавсифлайдиган катгаликлар орқали ифодаланади:

$$s = \frac{\gamma_{ns} \gamma_{ps} N_s (p_o + n_o + \Delta n)}{\gamma_{ns} n_1 + \gamma_{ns} p_1 + n \gamma_{ns} \exp(e \varphi_s / kT) + p \gamma_{ps} \exp(-e \varphi_s / kT)}, \quad (5.47)$$

бундаги γ_{ns} ва γ_{ps} – электронлар ва ковакларнинг сиртда ушла – ниш коэффициентлари, φ_s – сиртий қатлам потенциали, бошқа белгилар одатдаги.

Е кучланганликли электрик майдонда ҳаракагланаётган заряд ташувчиларнинг дрейф узунлиги :

$$L_E = E \mu \tau \quad (5.48)$$

Масалалар ечишга мисол

Мисол: Заряд ташувчиларнинг диффузия коэффициенти $D_n = 10^{-2} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, яшаш вақти $\tau = 10^{-4} \text{ с}$ бўлса, намунада $E = 10^4 \text{ В/м}$. Электрик майдон ҳосил қилинса, диффузия ва дрейф узунликлари нисбати қанақа бўлади? $T = 300 \text{ К}$.

$$\text{Ечиш: } \frac{L_n}{L_E} = \frac{\sqrt{D_n \tau}}{E \mu_n \tau} = \frac{kT}{eE \sqrt{D_n \tau}}$$

Жавоб: $L_n / L_E = 2,6 \cdot 10^{-3}$. Демак бу ҳолда дрейф устунлик қилади.

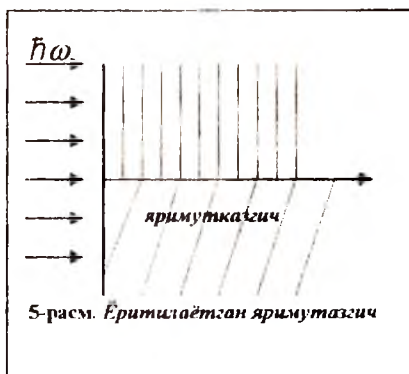
Масалалар

5.41. Агар германийда $\mu_n = 0,38 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $\mu_p = 0,18 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ кремнийда $\mu_n = 0,145 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ бўлса, $T = 300$

- 5.42. да шу яримўтказгичдаги диффузия коэффициентларини аниқланг.
- 5.43. Электронлар яшаш даври 1) $\tau_n=10^{-4}$ с, 2) $\tau_n=10^{-6}$ с бўлган холларда $T=300$ К температурада айнимаган германийда электронлар диффузион узунлиги ҳисоблансин. Электронлар ҳаракатчанлиги $\mu_n=0,38$ м²В⁻¹с⁻¹.
- 5.44. Агар электронлар энергияси $E=\hbar^2 k^2/2m_n^*$ кўринишда ифодаланса $\mu_n=0,03$ м²В⁻¹с⁻¹, $n=10^{24}$ м⁻³, $m_n^*=0,2m_0$ бўлса, кучли айтиш шароитида электронларнинг диффузия коэффициенти ҳисоблансин.
- 5.45. Хусусий германий учун ($b=2,1$; $\mu_n=0,38$ м²В⁻¹с⁻¹) ҳона температурасида бикутбий диффузия коэффициенти аниқланг.
- 5.46. Хусусий ўтказувчанликка эга бўлган галлий арсенидида 300 К да бикутбий диффузия коэффициенти топилади. $\mu_n=8,8$ м²В⁻¹с⁻¹, $\mu_p=0,04$ м²В⁻¹с⁻¹.
- 5.47. Бир жинс яримчексиз ($x \geq 0$) n-тип яримўтказгичга $x=0$ текиликда коваклар узлуксиз киритилади. бунда $\Delta p(0)=10^{20}$ м⁻³. Агар $\tau_p=10^{-3}$ с, $D_p=40 \cdot 10^{-4}$ м²с⁻¹ бўлса, сиртдан $x=4$ мм масофада ковакларнинг номувозанатий зичлиги қанча?

5.47. Бир жинс n-тип ярим ўтказгичнинг қандайдир нуқтасида ёруғ инчица нури (зонд) заряд ташувчилар жуфтларини ҳосил қилади. Агар зонддан $x_1=2$ мм масофада $\Delta p_1=10^{20}$ м⁻³, аммо $x_2=4,3$ мм масофада $\Delta p_2=10^{19}$ м⁻³ бўлса, коваклар диффузион узунлиги қандай?

5.48. Агар генерация тезлиги бугун ҳажмда бирдай $g_0=2,5 \cdot 10^{23}$ м⁻³с⁻¹, коваклар яшаш вақти $\tau_p=4 \cdot 10^{-6}$ с, сиртий рекомбинация тезлиги $s=5$ м/с, $D_p=49 \cdot 10^{-4}$ м²с⁻¹ бўлса, n-се нинг қалин намунаси сиртида номувозанатий заряд ташувчилар зичлиги қанча?



5.49. Агар қалин p -Ge сиртида номувозанатий заряд ташувчилар зичлиги, генерация бутун ҳажмда бирдай: $s_1=8$ м/с, $\Delta p_1=10^{19}$ м $^{-3}$ бўлган, аммо $s_2=3$ м/с бўлганда $\Delta p_2=2 \cdot 10^{19}$ м $^{-3}$, $\tau_p=10^{-3}$ с бўлса, бу коваклар диффузион узунлиги қанча бўлган? (Олдинги масалани ечиш йўлидан фойдаланинг.)

5.50. Агар $s=5$ м/с, квантлар оқими зичлиги $I=6 \cdot 10^{20}$ м 2 с $^{-1}$, квант чиқиш $\eta=1$, ютиш коэффициенти $\alpha=10^5$ м $^{-1}$, $\tau_p=10^{-4}$ с, $D_p=49 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$ бўлса, p -Ge қалин намунасининг ёритилаётган сиртида номувозанатий коваклар зичлиги қанча бўлади?

5.51. Агар ҳажми бўйича электрон - коваклар бир текис пайдо қилинаётган қалин p -Ge намунасининг сиртида номувозанатий коваклар зичлиги ҳажмдагидан 4 марта кичик бўлса, $L_p=2 \cdot 10^{-3}$ м, $\tau_p=10^{-3}$ с бўлса, у ҳолда сиртий рекомбинация тезлиги s топилин.

5.52. p -Si намунаси қалин бўлиб унга кучли ютиладиган ($\alpha L_p \gg 1$) ёруғлик тўшаётир. Агар квантлар оқими зичлиги $I=6 \cdot 10^{20}$ м $^{-2}$ с $^{-1}$, квант чиқиш $\eta=1$, $s=5$ м/с, $\tau_p=10^{-4}$ с, $D_p=13 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$ бўлса, ёритилаётган сиртда номувозанатий коваклар зичлиги қанча бўлади?

5.53. Олдинги масаладаги шартлардан фақат биттаси $\alpha L_p \gg 1$ ўрнига $\gamma=14 \cdot 10^2$ м $^{-1}$ деб олиб, масалани яримчексиз p -Si учун ечиб, ёритилаётган сиртда ковакларнинг зичлиги ҳисоблансин.

5.54. p -Ge нинг узун толасимон намунасида бир нуқтадан коваклар киритилади ва ундаги электрик майдон кучланганлиги $E=500$ Вм $^{-1}$, температура $T=300$ К, $L_p=9 \cdot 10^{-4}$ м. Шу намунада номувозанатий коваклар тақсимооти $\Delta p(x)$ топилин.

5.55. p -тип кремнийда ҳона температурасида $E=500$ Вм $^{-1}$ кучланганликли электрик майдонда номувозанатий электронларнинг рейф узунлиги ҳисоблансин. $L_n=6 \cdot 10^{-4}$ м деб олинсин.

5.56. Яримчексиз p -тип яримўтказгичга ($x \geq 0$) $x=0$ сиртда доимий авишда коваклар киритилади. $x > 0$ йўналишида намуна бўйлаб $j_n=10^3$ А м $^{-2}$ электрик майдон ҳосил қилинган. Агар $L_p=10^{-3}$ м бўлса, намуна сиртидан қандай масофада номувозанатий коваклар зичлиги 2 марта камаяди?

5.57. Яримчексиз яримўтказгичга ($x \geq 0$) унинг сирти $x=0$ орқали коваклар киритилади. Агар инжекция коэффициенти $\beta_n=0,5$, токнинг тўла зичлиги $j=1,6 \cdot 10^4$ Ам $^{-2}$, $L_p=10^{-3}$ м,

$D_p=50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ бўлса ва дрейфни назарга олинмаса, $x=0$ да киритилган коваклар зичлиги қанча ?

5.58. Агар намунанинг солиштирма электрик ўтказувчанлиги $\sigma_0=10 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $b=\mu_n/\mu_p=2,1$ бўлса ва $n_0 \gg p_0$, Δp деб ҳисоблаб, олдинги масаладаги шароитда заряд ташувчиларнинг киритиладиган нуқтада электрик майдон кучланганлиги аниқлансин.

5.59. Яримчексиз ($x \geq 0$) кучсиз легиранган n -тип ярим ўтказгич чегарасида ($x=0$ да) унга кучли $E > 0$ қўйилган. Инжекция коэффициенти $j_p/j_n=0,15$; $n_0=10^{19} \text{ м}^{-3}$; $p_0=5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $b=2,1$. Яна $\Delta n = \Delta p \ll n_0$ шароит доимий. Шу яримўтказгич чегарасида ковакларнинг номувозанатий зичлиги ҳисоблансин.

5.60. Яримчексиз ($x \geq 0$) n -тип яримўтказгичга унинг сирти ($x=0$) орқали коваклар киритилади. Агар $\Delta p(0)=10^{19} \text{ м}^{-3}$, $L_p=7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $D_p=0,0049 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ инжекция коэффициенти $j_p/j_n=0,4$ бўлса, $x=0$ да электронлар токи зичлиги қанча ? Заряд ташувчилар дрейфи назарга олинмасин.

5.6. Яримўтказгичларда кинетик ҳодисалар

Асосий кинетик (кўчиш) ҳодисалари қуйидагилар:

- электрик ўтказувчанлик,
- иссиқлик ўтказувчанлик,
- галваномангнетик ҳодисалар,
- термоэлектрик ҳодисалар,
- термомангнетик ҳодисалар,
- фотоэлектрик ҳодисалар,
- бошқа баъзи ҳодисалар.

Бу ҳодисаларни тадқиқлашда электрик ва магнетик майдонларнинг анча катта қийматларигача дифференциал тенгламадан иборат. Болцман кинетик тенгламаси асосий ўрин тутаяди. У электронлар ва ковакларнинг ташқи таъсирлар (температура градиенти, электрик ва магнетик майдонлар) мавжуд бўлганда ҳолатлар бўйича номувозанатий тақсимот функциясини аниқлаб беради. Бунинг учун заряд ташувчиларнинг кристал папжарасининг тебранаётган атомлари (ионлари) ва нуқсонлари билан тўқнашишлари механизмлари ўрганиб чиқилади.

Биз олдинда қаттиқ жисмлар (кристал панжараси) иссиқлик ўтказувчанлиги (2.2 банд) ва металлларда эркин электронларнинг иссиқлик ўтказувчанлиги (4боб) ҳодисаларига оид масалаларни жойлашгирдик.

“Яримўтказгичлар” бобида ярим ўтказгичларнинг электрик ўтказувчанлигини тадқиқлашга доир масалалар бердик.

Энди қолган кинетик ҳодисаларга оид масалаларни ечишга ёрдам қиладиган қисқа маълумотни ва масалаларнинг ўзини тақдим қиламиз.

Агар электронларнинг ва ковакларнинг ўртача тўқнашиши вақти (икки кетма кет тўқнашиш орасида ўтган вақт) $\langle \tau_n \rangle$ ва $\langle \tau_p \rangle$ деб белгиланса, изотроп ярим ўтказгичда уларнинг ҳаракатчанликлари :

$$\mu_n = e \langle \tau_n \rangle / m_n^* , \mu_p = e \langle \tau_p \rangle / m_p^* . \quad (5.49)$$

$$\langle \tau \rangle = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \tau(x) e^{-x} x^2 dx \quad x = E/kT$$

Ҳаракатчанлик μ температурага боғлиқ катталиқ. Акустик тебранишларда сочилиш ҳолида $\mu = \mu_0 T^{-3/2}$, нисбатан паст температурадаги оптик тебранишларда сочилишда $\mu = \mu_1 T^{-1/2}$, ионларда сочилишда $\mu = \mu_2 T^{-3/2}$ ва ҳ.к.

$\nabla T \neq 0$ бўлганда электронлар юза бирлигидан 1 с да олиб ўтадиган иссиқлик миқдори $Q_n = -\chi_n \nabla T$, бунда n — тип ярим ўтказгичда электронлар ҳаракати билан боғлиқ иссиқлик ўтказувчанлик :

$$\chi_n = k^2 T (A(\tau) [n \mu_n]) / e . \quad (5.50)$$

бунда $A(\tau)$ — тўқнашиш вақти τ га боғлиқ кўпайтувчи ($x = E/kT$) :

$$A(\tau) = \frac{\langle \tau x \rangle \langle \tau x^2 \rangle}{\langle \tau \rangle \langle \tau x \rangle} - \frac{\langle \tau x \rangle^2}{\langle \tau \rangle} . \quad (5.51)$$

τ энергиянинг даражали функцияси ($\tau = E^\tau$) бўлганда:

$$A(\tau) = r + 5/2 . \quad (5.51')$$

$$\chi_n = (r + 5/2) k^2 T / e [n \mu_n]. \quad (5.50')$$

Галваномагнитик ҳодисалар электрик майдон мавжуд бўлганда ярим ўтказгичларда юз берадиган ҳодисалардир. Бу ҳо — дисаларнинг таснифи аввало магнитик майдоннинг кучсиз ёки кучли бўлишишига боғлиқ .

Кучсиз майдон шarti: $\mu B \ll 1. \quad (5.52)$

бу ҳолда электрон икки кетма кет тўқнашиш орасида тўла айланиб улгурмай, унинг ток йўналишидан четланиши содир бўлиб, у ёй (эгри чизик) бўйича ҳаракатланади .

Кучли майдон шarti: $\mu B \gg 1, \quad (5.53)$

бу ҳолда электрон икки кетма кет тўқнашиш орасида магнитик майдон атрофида бир неча айланиб улгуради, унинг ҳаракат йўли сиртмоқсимон шаклда бўлади.

Агар токли ўтказгични кўндаланг (Z) магнитик майдонга киритилса, заряд ташувчилар ток (X) йўналишидан оғишади, на — муна ён сиртларидан бири мусбат, қарама — қаршиси манфий за — рядланади , бинобарин , кўндаланг у йўналишда E_y электрик майдон ва у билан боғлиқ, потенциаллар айирмаси V_y ҳосил бў — лади (Холл ҳодисаси):

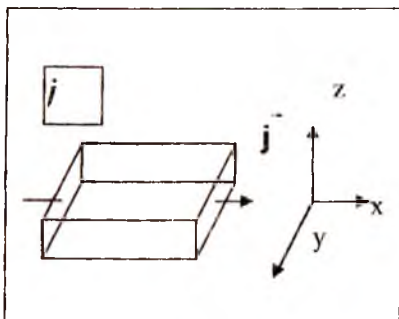
$$E_y = R j B, \quad V_y = E_y \cdot d_y \quad (5.54)$$

R коэффициентни — Холл ко — эффициенти (доимийси) дейи — лади, j — x йўналишдаги ток зичлиги, B — z йўналишдаги магнитик индукция, d_y намуна — нинг кўндаланг ўлчами.

Кинетик тенглама ечими асосида келтириб чиқариладиган Холл доиймиси ифодаси айнамаган изотроп ярим ўтказгич учун кучсиз майдонда $\mu B \ll 1$:

$$R = - \frac{1 (ne^2 / m_n^2) \langle \tau_n^2 \rangle - (pe^2 / m_p^2) \langle \tau_p^2 \rangle}{e [(ne / m_n) \langle \tau_n \rangle + (pe / m_p) \langle \tau_p \rangle]^2}. \quad (5.55)$$

хусусий ҳолларда $p=0$ деб $R=R_n$, $n=0$ деб $R=R_p$ ифодаларни олиш мумкин.



Холл бурчаги тушунчаси ток йўналишидан четланиши ифода —
лайди:

$$\operatorname{tg} \Theta_x \approx \Theta_x = \left(\frac{E_y}{E_x} \right) = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle m^*} eB. \quad (5.56)$$

Кучли $\mu B \gg 1$ магнитик майдонда ($n \neq p$):

$$R = -\frac{1}{e(n-p)}. \quad (5.57)$$

$n=p=n_i$ бўлганда юқори тақрибда иш кўрилиб,

$$R_i = -\frac{\langle 1/\tau_n^2 \rangle}{\langle 1/\tau_n \rangle^2} \frac{1}{en_i} \frac{1-b}{1+b}, \quad (5.58)$$

Иккинчи гагваномангитик ҳодиса — магнитик майдонга жойлаштирилган токли яримўтказгич намунаси электрик қаршилигининг ортишидир. Бунинг сабаби кўндаланг магнитик майдонда заряд ташувчиларнинг ток йўналишидан огишидир.

Масалан, n — тип яримўтказгич учун солиштирма қаршилиқнинг нисбий ўзгариши $\Delta\rho/\rho$ ифодаси кучсиз майдонда :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \left(\frac{e}{m_n} \right)^2 \frac{\langle \tau^3 \rangle \langle \tau \rangle - \langle \tau^2 \rangle^2}{\langle \tau \rangle^2} B^2, \quad (5.59)$$

$$\text{кучли майдонда : } \frac{\Delta\rho}{\rho} = \langle \tau \rangle \langle \frac{1}{\tau} \rangle \quad (5.60)$$

кўринишларда бўлади.

Термоэлектрик ҳодисалар асосан учта: термо ЭЮК, Пелтье ва Томсон эффектларидан иборат. ∇T температура градиенти мавжуд бўлганида температура пасайиши йўналишида дастлаб заряд ташувчилар оқими вужудга келади. Очiq занжирда стат— ционар ҳолатда ҳамма нуқталарда ток зичлиги нолга тенг, чунки ҳосил бўлган E_T электрик майдон ҳар бир нуқтада ∇T га пропор— ционал зарядлар оқимига қарама— қарши ва тенг оқим пайдо илади. E_T майдонни термоэлектрик майдон, у билан боғлиқ улган Э.Ю.К. ни термо ЭЮК дейилади.

Умумлашган E_T майдон ҳажмидаги ва контактлардаги ташқи эгувчиларни ҳисобга олади:

$$E_T = -\nabla(\phi - E_F/e) = \alpha \nabla T, \quad (5.61)$$

бундаги $\alpha(T)$ ни дифференциал ЭЮК деб аталади.

Расмда В яримўтказгичга А ва С контакт қатламлар ёпиш — тирилган. (5.61) ни А дан В гача интеграллаб, $V_1 - V_2$ потенциаллар айримаси топилади:

$$V_1 - V_2 = \int_A^B E_T dx = \int_{T_1}^{T_2} \alpha(T) dT \quad (5.62)$$

Кинетик ҳодисалар назарияси $\alpha(T)$ дифференциал ЭЮК

ни ҳисоблайди. Бунинг учун $\vec{v} = 0, \nabla T \neq 0, \nabla E_F \neq 0$ шароитда Болдман кинетик тенгلامаси ечимидан фойдаланилади. n — тип яримўтказгичнинг содда ҳолида :

$$\alpha_n(T) = \frac{k}{e} \left[g_n + \ln \frac{Nc}{n} \right] \quad (5.63)$$

бундаги $g_n = \langle \tau_{nx} \rangle / \langle \tau_n \rangle$.

Пелтэе эффекти икки турли ўтказгичлар контактида юз беради, бу контактдан ток ўтаётганда унда иссиқлик ажралади (контакт қизийди) ёки иссиқлик ютилади (контакт совийди). Бу ҳодиса контакт ҳосил қилган ўтказгичларнинг Пелтэе коэффициенти деб аталадиган $\Pi(T)$ катталикларга боғлиқ.

$$\text{Ҳисобнинг кўрсатишича} \quad \Pi = \alpha T. \quad (5.64)$$

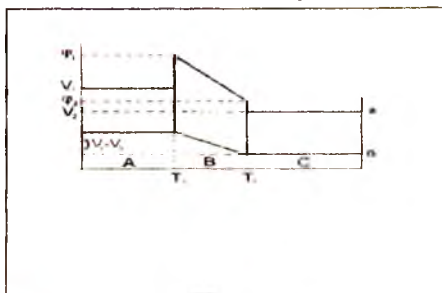
боғланиш мавжуд. Контактда ажралаётган (ютилаётган) иссиқлик миқдори :

$$Q_{II} = (\Pi_1 - \Pi_2) \cdot j. \quad (5.65)$$

ток йўналиши ўзгарганда ўз ишорасини ўзгартади. Металлнинг Пелтэе коэффициенти яримўтказгичникидан анча кичик.

Томсон эффекти ҳажмида температура градиенти бўлган яримўтказгичдан ток ўтаётганда ҳажмида иссиқлик ажрალიши ёки ютилишидан иборат:

$$Q_{TOM} = \tau_T (j \cdot \nabla T), \quad (5.66)$$



бундан яққол кўринишича j ва ∇T йўналишлари бир ҳил бўлганда Томсон иссиқлиги ажралади ва аксинча. Бу Жоул иссиқлигига ($Q_{ж} \approx j^2$) қўшимча иссиқлик миқдори. Томсон коэффициентини τ_T бошқа коэффициентларга боғлиқ:

$$\tau_T = T \frac{d}{dT} \frac{P}{T} = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (5.67)$$

Температура градиенти мавжуд бўлганида фононлар оқими пайдо бўлиб, у йўлидаги электронларни эргаштиради (фононлар эргаштириши), кинетик коэффициентларга қўшимча тузатма киритади. Бу эффект айниқса паст температураларда сезиларли бўлади.

Термозюкнинг қўшимчаси:

$$\alpha_{\phi} = \frac{km^* v_o^2 \langle \tilde{\tau}_{\phi} \rangle}{eT \langle \tau \rangle} \quad \text{ёки} \quad \alpha_{\phi} = \frac{av_o \ell_{\phi}}{\mu T} \quad (5.68)$$

кўринишда ифодаланади, v_o — товун тезлиги, ℓ_{ϕ} — фононнинг эркин югириш йўли, акустик тебранишларда сочилиш ҳолида $a \approx 1$, τ_{ϕ} — фононларнинг эркин югириш вақти.

Масалалар ечишга мисоллар

1 — мисол. p — яримўтказгичдан $j_x = 10^4 \text{ Ам}^{-2}$ ток ўтиб турганда уш $B_z = 1 \text{ Тл}$ индукцияли магнитик майдонга жойланган. Агар намунада электронлар зичлиги 10^{21} м^{-3} , унинг кўндаланг ўлчами (кенглиги) $d_y = 10^{-3} \text{ м}$ бўлса, Холл потенциаллар айрими нимага тенг?

Ечиш. (5.54) ифодалардан $V_y = E_y d_y = R d_y j_x B_z$ эканлиги маълум. Етарлича аниқликда тақрибан $R \approx 1/ep$ деб олинса бўлади. Демак, $V_y = d_y j_x B_z / ep$.

Жавоб: $V_y = 6,25 \cdot 10^{-2} \text{ В}$.

2-мисол . Агар $g_n=2$ ва $N_C n = 10^3$ деб ҳисобланса, n -тип яримўтказгичнинг дифференциал ЭЮКи қанча бўлади?

Ечиш. Бу масала (5.63) ифода асосида ечилади. k, e лар қийматлари жадвалларидан олинади. $g_n=2$, $\ln(N_C n) = \ln 10^3 = 3 \cdot \ln 10 \approx 6,9$.

Жавоб: $\alpha_n \approx 0,77 \cdot 10^{-3}$ В/К

Масалалар

5.61. Кремнийда ҳона температурасида $\mu_n = 0,145$ м²В⁻¹с⁻¹ бўлади, бунда электронларнинг эффектив массаси m'_n ўрнига

$$\frac{1}{m'} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{m_{\parallel}} + \frac{2}{m_{\perp}} \right)$$

массани қўйиш керак. $m_{\parallel} = m_0$, $m_{\perp} = 0,2m_0$ деб

олиб, тўқнашиш ўртача вақти $\langle \tau_n \rangle$ ни аниқланг.

5.62. Германийда $m_{\parallel} = 1,58m_0$, $m_{\perp} = 0,082m_0$ эканлиги маълум. $\langle \tau_n \rangle = 0,25 \cdot 10^{-12}$ с бўлса, электронлар ҳаракатчанлиги қанча?

5.63. n -кремнийдаги барча донорлар ионланган ва электронлар зичлиги ўзгармас бўладиган температуралар оралигида температура 1,5 марта кўтарилса, бу намунанинг солиштирма ўтказувчанлиги неча марта ўзгаради? Электронлар акустик тебранишларда сочилади деб ҳисоблансин.

5.64. Олдинги масалани оптик тебранишларда ва ионларда сочиши холлари учун ечилсин.

5.65. n -Si да электронлар акустик тебранишларда сочилган ҳолда ва $T=300$ К да $n=10^{21}$ м⁻³ бўлганда уларнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентни аниқлансин. $r = -1/2$

5.66. Юқоридаги масалани ионларда сочилиш ҳоли учун ($r = 3/2$) ечилсин.

5.67. n -тип яримўтказгич намунасида x ўқи бўйлаб ток зичлиги $j_x = 10^3$ А/м². Магнитик майдон индукцияси z ўқи бўйича $B=0,1$ Тл. Паўжара тебранишларида сочилиш шароитида магнитик майдондаги ҳаракатчанлик $\mu_{\text{ни}} = 1,18 \cdot \mu_n$. Холл доимийси ва Холл кучланиши топилсин. Бу ҳолда $n_0 = 10^{21}$ м⁻³, $d_y = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м.

5.68. p-тип намунаги ток йўналишига тик бўлган $H=4000$ Э ($B=0,1$ Тл) магнитик майдонга жойлаштирилган. Агар $\mu_{pn}=0,2240$ $m^2B^{-1}s^{-1}$ бўлса, Холл бурчаги $tg\theta_x=E_y/E_x$ аниқлансин.

5.69. (5.55) ифодадан фойдаланиб ва $\langle \tau_n \rangle^2 \approx \langle \tau_n^2 \rangle$ ҳисоблаб, n-тип яримўтказгич учун Холл коэффициентини аниқланг.

5.70. Агар τ заряд ташувчилар энергиясига боғлиқ бўлмаса, унинг ўртача қийматлари узига тенг (масалан, $\langle \tau \rangle = \tau$). Ана шу мулоҳаза билан (5.55) – (5.60) ифодаларни таҳлил қилинг, соддалаштиринг. $\tau = \tau_n = \tau_p$ деб ҳисобланг.

5.71. 5.70-масала ечимидаги (5.55) ифоданинг соддалашган шаклидан фойдаланиб, қачон $R < 0$, $R = 0$, $R > 0$ бўлишлигини таҳлил қилинг.

5.72. n-тип яримўтказгичда
$$\frac{\langle \tau^3 \rangle \langle \tau \rangle - \langle \tau^2 \rangle^2}{\langle \tau \rangle^2} = 10^{24} \text{ с}^2, B=0,5 \text{ Тл}$$

бўлса, солиштирма қаршилиқ неча фоизга ошади?

5.73. Агар индий антимониди $InSb$ да Холл ҳаракатчилигининг дрейф ҳаракатчанликка нисбати $1,18$; $\mu_n/\mu_p=80$, магнитик майдон кучсиз, $n_i=1,6 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ $T=300 \text{ К}$ бўлса, бу намунада тўла ионланган акценторлар зичлиги $N_a=5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ бўлса, бу ҳолда Холл доимийси аниқлансин.

5.74. p-тип яримўтказгичда $\beta_p=\mu_p B=0,2$ бўлганда $R_p=0$ га тенг. Агар $b=\mu_n/\mu_p=30$ бўлса τ_n ва τ_p ҳам энергияга боғлиқ бўлмаса, магнитик қаршилиқ коэффициенти топилсин.

5.75. Электронларнинг сочилиши акустик тебранишларда содир бўлаётган бўлса, n-тип яримўтказгичда хона температурасида дифференциал Эюк қандай бўлади? Бу намунада $E_F=0,01 \text{ эВ}$ деб ҳисоблансин.

5.76. Металларда ионларнинг сочилиш ҳолида дифференциал

термо Эюк
$$\alpha_{\text{мет}} = + \frac{1}{2} \frac{\pi^2 k^2 T}{3eE_{F\text{мет}}}$$
 ифода бўйича ҳисобланади.

$E_F=4,5 \text{ эВ}$, $T=300 \text{ К}$ деб олиб, $\alpha_{\text{мет}}$ ни ҳисобланг ва олдинги масала натижаси билан солиштиринг.

- 5.77. Икки яримўтказгич контактидан $j=10^4 \text{ A/m}^2$ ток утиб турип — ти. $T=300 \text{ K}$, дифференциал термо ЭЮК лар $\alpha_1=3 \cdot 10^{-4} \text{ ВК}^{-1}$, $\alpha_2=2 \cdot 10^{-4} \text{ ВК}^{-1}$. Шу ҳолда контаклда 1 см^2 да 1 с да қанча иссиқлик миқдори ажралади?
- 5.78. n -тип яримўтказгичнинг тэрмо ЭЮКи унинг температу — раси $T_1=200 \text{ K}$ дан $T_2=300 \text{ K}$ гача ўзгарганда қанча марта ўзгаради? E_F нинг температурага боғланиши бу ораликда назарга олинмасин ва $E_F = -0,2 \text{ эВ}$ деб ҳисоблансин. $g_n=2$.
- 5.79. Агар яримўтказгичда товуш тезлиги $v_0=3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $L_{\Phi}=10^{-6} \text{ м}$, $T=30 \text{ K}$, $\mu(30\text{K})=1,0 \text{ м}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ бўлса, α_{Φ} нинг қиймати қандай?
- 5.80. $\alpha_n=0,4 \text{ T}^{-1}$ қонун бўйича ўзгарса, τ_T Томсон коэффици — енти $T=300\text{K}$ да қандай қийматга эга бўлади?

Термомагнитик ҳодисалар ҳаммаси бўлиб олтига. Улардан фақат учтасини кўриб ўтамиз. Бу ҳодисалар температура гради — енти ва электрик майдон (ток) мавжуд бўлганда ҳаракатланаётган заряд ташувчиларга магнитик майдон таъсири оқибатидир.

1.Нернст — Эттингсгаузен кўндаланг эффеки ∇T_x гра — диентли намунани кўндаланг магнитик \vec{B}_z майдонга жойлашти — рилганда ∇T_x ва \vec{B}_z га тик йўналишда E_y электрик майдон пайдо бўлишидан иборат :

$$E_y = -QBV T_x. \quad (5.69)$$

Q — Нернст коэффициенти

n -тип яримўтказгич учун кучсиз майдонда ($\mu_n B \ll 1$):

$$Q = \frac{k}{e} \frac{e}{m_n} \varphi_1(\tau) \quad (5.70)$$

$$\varphi_1(\tau) = \frac{\langle \tau \rangle \langle \tau^2 x \rangle - \langle \tau^2 \rangle \langle \tau x \rangle}{\langle \tau^2 \rangle}; \quad (5.71)$$

кучли майдонда ($\mu_n B \gg 1$):

$$Q = \frac{k}{e^2} \frac{m_n}{B^2} \varphi_2(\tau), \quad (5.72)$$

$$\varphi_2(\tau) = \langle x \rangle \langle \frac{1}{\tau} \rangle - \langle \frac{x}{\tau} \rangle, \quad (5.73)$$

Айрим тўқнашиш механизмлари учун : $\langle f \rangle = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} f e^{-x} x^{\frac{1}{2}} dx$
 интегралдан ўртача қийматлар топиш осон.

2. Магнитик майдонга жойлаштирилган намунада дифференциал термо ЭЮК α ўзгаради. Тўқнашишлар акустик тебранишларда содир бўлади (Нернст- Эгтингсгаузен буйлама эффекти).

Кучли магнитик майдонда :

$$\Delta\alpha = \frac{k}{e} \left[\frac{5}{2} \frac{\langle \tau x \rangle}{\langle \tau \rangle} \right], \quad (5.74)$$

3. Магнитик майдонга жойлаштирилган намунада заряд ташувчилар иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти χ ўзгариши умкин (Мажи - Риги - Ледюк эффекти):

$$\Delta\chi(B) = n\mu \left(r + \frac{5}{2} \right) \frac{k^2 T}{e} a_r (\mu B)^2. \quad (5.75)$$

ндаги r - сон $\tau = \tau_0 x^r$ даги курсаткич, a_r - бир неча бирлик ҳалиғида қиймат оладиган кўпайтувчи.

Масалалар

81. Агар $dT/dx=10^3$ К/м, $B=0,1$ Тл бўлганда Нернст кўндаланг йдони $E_y=1$ В/м бўлса , Нернст доимийси Q нимага тенг ?

82. Акустик тебранишларда тўқнашишлар асосий ўрин тутганда $= \tau_a x^{1/2}$, бунда $\tau_a \sim T^{3/2}$. (5.49) ифодадаги ўртачалаштирилларни ажариб $\Delta\alpha$ ни аниқланг.

83. Агар $n_0=10^{22} \text{ м}^{-3}$, $\mu=0,15 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, $r=3/2$, $\alpha_r \approx 1$ бўлганда $T=250$ К $B=0,01$ Тл майдонда электронлар иссиқлик ўтказувчанлиги ўз-ришини ҳисобланг .

5.7. Фотоэлектрик ҳодисалар

Ёруғликнинг моддада ютилиши қўйидаги Бугер – Ламберт қонунига бўйсинади:

$$I(x) = I(0) \cdot \exp(-\alpha x) \quad (5.32)$$

Буни фотонлар оқими орқали ифодалаш мумкин:

$$I(x) = \hbar \omega_q q(x) \text{ ва } q(x) = q(\omega) \exp(-\sigma N x), \quad (5.33)$$

бундаги N – фотонлари ютувчи марказлар зичлиги, σ – уларнинг кундаланг кесими. $\alpha = \sigma N$

Ҳажм бирлигида ёруғлик ютилиши суръати :

$$-\frac{d(I(x))}{dx} = \alpha \cdot I(x). \quad (5.34)$$

Ёруғлик ютилиши бир неча йўл билан содир бўлади.

Ёруғлик таъсирида электрик ўтказувчанлик ўзгаришини фототўтказувчанлик дейилади:

$$\Delta\sigma = \sigma_\phi = e\mu_n \Delta n + e\mu_p \Delta p. \quad (5.76)$$

Доимий ёритиш шароитида :

$$\Delta n_{cm} = \eta_n \cdot \alpha \cdot l \cdot \tau_n, \quad \Delta p_{cm} = \eta_p \cdot \alpha \cdot l \cdot \tau_p, \quad (5.77)$$

бундаги η_n, η_p мос равишда 1 фотон ютилиши оқибатида (ўрғача) ҳосил бўладиган электронлар ва коваклар сони, τ_n, τ_p – номуноазатий заряд ташувчилар яшаш вақти.

Ёруғлик оқими кучсиз бўлганда:

$$\Delta n_{cm} \neq I, \Delta p_{cm} \neq I, \Delta\sigma_\phi \neq I. \quad (5.78)$$

Ёруғлик оқими кучли бўлганда:

$$\Delta n_{cm} \neq I^{\frac{1}{2}}, \Delta p_{cm} \neq I^{\frac{1}{2}}, \Delta\sigma_\phi \neq I^{\frac{1}{2}}. \quad (5.79)$$

Дембер ҳодисаси. Ёруғлик яримўтказгич ичкарасига кириб борган сари унинг интенсивлиги (энергияси) ва бинобарин, генерация тезлиги $g(x)$ камай боради:

$$g(x) = g(0) e^{-\alpha x}, \quad (5.80)$$

$g(0)$ – ёритилаётган сиртда генерация тезлиги.

Номувозанатий заряд ташувчиларнинг потекис вужудга келтирилиши уларнинг яримўтказгич ичига томон диффузияла- шига олиб келади. Электронлар ва коваклар ҳаракатчанлиги (диффузия коэффициенти) тенг бўлмаганлиги сабабидан элек- тронлар ёритилмаган сиртга оддинроқ етиб бориб, уни манфий зарядлайди, ёритилаётган сирт эса мусбат зарядланади. Ҳосил бўлган майдон (E_D - Дембер майдони) электронлар диффузион оқимини камайтиради. Оқибатда стационар ҳолат ўрнашади.

Хусусий ютилиш ҳолида, $\Delta n = \Delta p$. Яна $\nabla n = \nabla p$ деб ҳисобла- сак, $D_n/D_p = \mu_n/\mu_p = b$ бўлишличини, $D = kT\mu/e$ эканлигини эътиборга олсак, Дембер электрик майдони x йўналишида ёритиш бўлаётганда

$$E_D = \frac{b-1}{b} \frac{kT}{e} \frac{dn}{dx} \quad (5.81)$$

шаклда ифодаланади. E_D билан боғлиқ потенциаллар фарқи:

$$V_D = (1-b) \frac{kT}{e} \int \frac{1}{bn+p} \frac{dn}{dx} dx, \quad (5.82)$$

унда d - намунанинг қалинлиги.

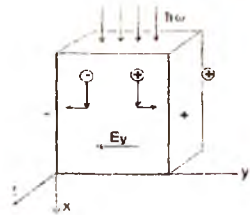
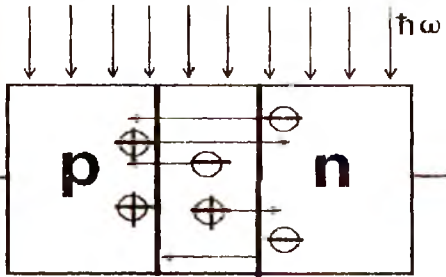


Фото ЭЮК. Агар яримўтказгичдаги $p-n$ ўтиш ва унга ён- дашган соҳалар ёритилиб, электрон-ковак жуфтлар ҳосил қилинса, электронларни E_{p-n} майдон p - соҳага, ковакларни p - соҳага кўчиради, оқибатда қўшимча E_{ϕ} майдон ва u билан боғлиқ V_{ϕ} потенциаллар айирмаси (фото ЭЮК) вужудга келади. Агар намуна ёпиқ занжир таркибида бўлса, занжирда фотоЭЮК ҳосил бўлади.

Фотомагнитик ходиса. Агар кучли ютиладиган ёруғлик билан ёритилган яримўтказгични кўндаланг магнитик майдонга жойланса, ёруғлик оқими ва магнитик майдонга тик учинчи йўналишда электрик майдон вужудга келади.

n – тип яримўтказгичда :

$$E_y = \frac{eD_p}{\sigma_n} B(\mu_p - \mu_n) \frac{d\Delta n}{dx}. \quad (5.83)$$

Агар $\Delta n = \Delta n(0) \cdot \exp(-x/L_n)$ қонун бўйича ўзгарса, у ҳолда

$$E_y = \frac{eD_p}{\sigma_n L_n} B(\mu_p - \mu_n) \Delta n. \quad (5.84)$$

Бу майдон билан ўлчанувчи : $V_y = \int_0^a E_y dy$

потенциаллар айирмаси боғлиқ, а $- dy$ – йўналишида намуна ўлчами.

Масалалар

- 5.84. Агар квант чиқишлар $\eta_n = \eta_p = 1$, бир текис ёритилаётган намунанинг бирлик ҳажмида I с да ютилаётган фотонлар сони $(\alpha \cdot l) = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, мувозанатий зичлик $n_0 = p_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $\tau_i = 10^{-4}$ с бўлганда хусусий ярим ўтказгич ўтказувчанлигининг нисбий ўзгариши қанча?
- 5.85. Агар $\eta_n = 0,8$, $(\alpha \cdot l) = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ бўлса, фотоэлектронларнинг $\Delta n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ зичлигига қандай япаш вақти тўғри келади?
- 5.86. Агар $\Delta n_{cm} = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ва $\tau_n = 1,25 \cdot 10^{-3}$ с бўлса, у ҳолда рекомбинация тезлиги қанча бўлади?
- 5.87. Ёритиш кучли бўлганда $\Delta n \gg n_0, p_0$ бўлиши мумкин. Бу ҳолда (5.79) боғланишлар ўринли бўлади. Энди $\Delta n_{cm} = \Delta p_{cm}$ ва τ ҳамда α катталиклар ёруғлик интенсивлиги I (фотонлар оқими) га боғлиқ эмас деб ҳисоблаб, I неча марта ўзгарса, электрик ўтказувчанлик 4 марта ўзгаради?

- 5.84. Агар зичлик градиенти $dn/dx \approx d\Delta n/dx=10^{20} \text{ м}^{-4}$, $n=p=n_i=2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $b=2,1$, $T=300 \text{ К}$ бўлса, E_D Дембер майдони кучланганлиги нимага тенг?
- 5.85. (5.82) ифодадан хусусий кремний учун Дембер кучланиши V_D ни аниқланг. $T=300 \text{ К}$, $b=2,9$. Бу ҳолда $\Delta n(0) - \Delta n(d) \approx \Delta n(0) \approx 10^{15} \text{ м}^{-3}$ деб ҳисоблансин.
- 5.86. Агар қалин n -Ge ярим ўтказкичда $T=300 \text{ К}$ да ($\mu_n=0,38$ ва $\mu_p=0,18 \text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, $L_n=10^{-4}\text{м}$) ёритиш оқибатида $\Delta n/p_0=0,1$ бўлган намунани $B=0,1 \text{ Тл}$ магнитик майдонга жойланган бўлса, фотомагнитик ҳодиса электрик майдони қандай бўлади?

5.8.Яримўтказкичли асбоблар

1.Агар метал билан n -тип ярим ўтказкич бир бирига туташтирилса, электронларнинг ярим ўтказкичдан чиқиш иши χ_n металдан чиқиш иши χ_m дан кичик ($\chi_n < \chi_m$) бўлса, бундай контактда беркитувчи қатлам ҳосил бўлади, у ҳажмий заряд (донор ионлари заряди) қатлами бўлиб, унда электронлар йўқ даражада кам. яримўтказкичдан металга томон йўналган электрик майдон \bar{E}_k у билан боғлиқ φ_k контакт потенциаллар айирмаси мавжуд бўлади. Бундай контакт ўзгарувчан токни тўғрилаш хоссасига эга, унинг мувозанатий кенглиги :

$$L(0) = \left(\frac{\varepsilon \varphi_k}{2\pi e^2 n_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.86)$$

бундаги ε —диэлектрик синдирувчанлик, n_0 — ярим ўтказкич ҳажмидаги эркин электронлар зичлиги.

Агар шу контактга V кучланиш берилса, унинг потенциаллар айирмаси (потенциал тўсиғи) ,кенглиги ўзгаради

$$L(V) = \left[\frac{\varepsilon(\varphi_k - eV)}{2\pi e^2 n_0} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5.87)$$

Метал – яримўтказкич контакти электрик сифимга эга:

$$C(0) = \frac{\epsilon}{4\pi L} = \left(\frac{\epsilon e^2 n_0}{8\pi \phi_k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.88)$$

V кучланиш берилганда :

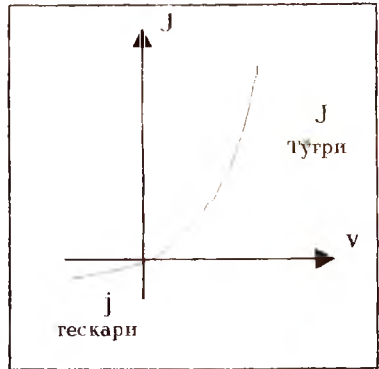
$$C(V) = \left(\frac{\epsilon e^2 n_0}{8\pi(\phi_k - eV)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.89)$$

Метал – яримўтказгич контакти вольт – ампер ҳарактеристики ток зичлиги билан берилган кучланиш орасидаги

боғланишни ифодалайди:
$$j = j_0 \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right], \quad (5.90)$$

бунда аниқи V – контактнинг ўзига берилган кучланишдир. V>0 бўлса, $j_{тўғри} \approx j_0 \exp(eV/kT)$ яъни V ўсиши билан тўғри ток жуда тез ўсади, V<0 бўлганда $j_{тес} \approx j_0 [\exp(-e|V|/kT) - 1]$ ва |V| катта бўлганда $|j_{тес}| \rightarrow j_0$.

Контактнинг тўғрилаш хоссаси расмдан кўришиб турибди. (5.89) ифода металл – яримўтказгич(M – Я) контакти сизими V билан бирга ўзгаришни кўрсатади.



Шу ва бошқа хоссалар M – Я контакти асосида турли туман ас – боблар ясаш имконини беради.

2. p – n ўтиш. Агар p – ва n – ўтказувчанликни соҳалай туташган бўлса, бу ҳолда уларнинг чегарасида p – n ўтиш деф аталадиган ҳажмий заряд соҳаси ҳосил бўлади, бу қатламда E_p – электрик майдон ва u билан боғлиқ ϕ_{p-n} потенциаллар айирмаси мавжуд бўлади. Бу қатламда ҳаракатчан заряд ташувчилар жуда камайиб қолган, шунинг учун солишгирма қаршилиқ жуда катта.

p – n ўтишнинг кенглиги:
$$L_{p-n}(0) = \left(\frac{\epsilon \phi_{p-n} N_d + N_a}{2\pi e^2 N_d N_a} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (5.91)$$

V кучланиш берилганда:

$$L_{p-n}(V) = \left(\frac{\varepsilon(\varphi_{p-n} - eV) N_d + N_a}{2\pi e^2 N_d N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.92)$$

p-n ўтишининг вольт-ампер ҳарактеристикаси (ВАХ и):

$$j = \left(\frac{eD_p p_n}{L_p} + \frac{eD_n n_p}{L_n} \right) \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) = j_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (5.93)$$

p-n ўтишининг электрик сизими :

$$C(V) = \left(\frac{\varepsilon e^2 N_d N_a}{8\pi(\varphi_{p-n} - eV) N_d + N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.94)$$

Демак, p-n ўтиш ўзгарувчан токни тўғрилаш ва электрик сизим вазифасини уташ ҳоссаларига эга.

p-n ўтишининг контакт потенциаллар айирмаси потенциал ҳусиқ баландлиги p- ва n - соҳадаги эркин заряд ташувчиларичликлари орқали аниқланади:

$$\varphi_{p-n} = kT \cdot \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (5.95)$$

p-n ўтишининг дифференциал қаршилиги r_{p-n} ни :

$$r_{p-n} = dV / (Sdj) \quad (5.96)$$

зунда S - p-n ўтиш юзи

Агар p-n ўтиш қатламида $(N_d - N_a) = kx$ қизиқий қонунринли бўлса, у ҳолда p-n ўтишининг электрик сизими ифодаси:

$$C(V) = S \left[\frac{ek\varepsilon^2}{12(\varphi_{p-n} - V)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.97)$$

примўтказичли диод ўзгарувчан токда ишлаганда унда диффузион иғим мавжуд бўлади:

$$C_d = \frac{e^2 S}{2kT} (p_n L_p + n_p L_n) \exp \frac{eV}{kT} \quad (5.98)$$

p_n, p_p – диоднинг p -, p - соҳаларида нососий заряд ташувчилар зичлиги, L_p, L_n – уларнинг диффузион узунлиги.

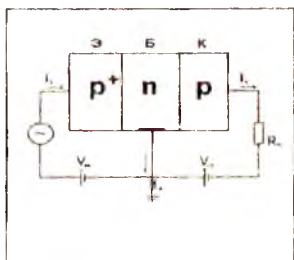
Агар ташқи манба V берадиган кучланиш унча катта бўлмаса ва унинг ҳаммаси p - n ўтишга тушса, (5.90) диоднинг ВАХ и бўлади. Агар кучланишнинг бир қисми диоднинг асоси (базаси) ва кон – тактларга тушса, у ҳолда p - n ўтишга кучланишнинг қандайдир $1/m$ улуши тўғри келади; яъни $V_{p-n}=V/m$ ва ВАХ қуйидаги кўри –

нишда бўлади:

$$j = j_s \left(e^{\frac{eV}{m k T}} - 1 \right). \quad (5.93')$$

p - n - p типдаги ясси (планар) транзисторнинг қуйидаги муҳим параметрлари бор:

- 1) $\gamma = dI_{p3} / d(I_{p3} + I_{n3})$ – эмиттернинг эффективлиги – эмиттер токининг қайси қисми базадан ўтиб, коллектор токини бошқаришини кўрсатади ;
- 2) $\beta = dI_{pK} / dI_{p3}$ – кўчириш коэффициентини – эмиттердан ўтган ковакларнинг қайси қисми коллекторга етиб боришини кўрсатади;
- 3) $M_K = d(I_{pK} + I_{nK}) / dI_{pK}$ – коллекторнинг кўпайтириши ко – эффективлиги (коллекторнинг эффективлиги) – эмит – тердан етиб келган коваклар токидан коллекторнинг тула токи неча марта оргиклигини кўрсатади;
- 4) $\alpha = (dI_K/dI_3) |_{V_{KB}=\text{const}} = \gamma\beta M_K$ (5.99) – токни узатиш ёки ку – чайтириш коэффициентини – коллектор токи ўзгариши – нинг эмиттер токи ўзгаришига нисбати – ток бўйича кучайтиришни ифодалайди;
- 5) транзисторнинг кучланиш бўйича кучайтириш коэф – фициенти



$$\mu = \left(\frac{dV_K}{dV_3} \right)_{I_K = \text{const}} \quad (5.100)$$

- 6) транзисторнинг қувват бўйича кучайтириш коэффици – енти:

$$\eta = M_K \mu / 4 \approx \mu \quad (5.101)$$

Одатда Б база w кенлиги унга киритилган ноасосий заряд ташувчилар L_p диффузион узунлигидан кичик қилинади. Базанинг солиштирма қаршилиги эмиттерникидан анча катга бўлади. Умумий база схемасида :

$$\gamma = \left(1 + \frac{\sigma_n w}{\sigma_p L_p} \right)^{-1} \quad (5.102)$$

$$\beta = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w}{L_p} \right)^2 \quad (5.103)$$

эмиттердан базага коваклар унча кўп киритилмаганда $M_k \approx 1$ ва

$$\alpha = \gamma \beta. \quad (5.104)$$

Эмиттердан базага ноасосий заряд ташувчилар киритилади, улар базада жамғарилади. Бу ҳодисани диффузион сизим ифода қилади:

$$C_D = \frac{e I_s w^2}{2kTD} \quad (5.105)$$

Токни узатиш (кучайтириш) коэффициентини α такрорийлик ω га боғлиқ.

Агар наст такрорийликларда (ўзгармас тоқлар) ҳолида $\alpha(\omega=0) = \alpha_0$ деб белгиласак, муайян такрорийликлар оралиғида:

$$\alpha = \alpha_0 / (1 + \omega^2 / \omega_\alpha^2)^{1/2} \quad (5.106)$$

ифода ўринли бўлади. ω_α шу транзисторга хос бўлиб, у ковакларнинг база орқали диффузияланиш вақти τ_D орқали белгиланади:

$$\tau_D = w^2 / D_p, \quad \omega_\alpha = \sqrt{6} / \tau_D.$$

Масалалар ечишга мисоллар

1-мисол. Агар p - n ўтишни ташкил қилган p - ва n -соҳалардаги асосий заряд ташувчилар зичлиги, мос равишда $p_p=10^{23} \text{ м}^{-3}$, $n_n=10^{21} \text{ м}^{-3}$ бўлса, бу соҳалардаги киришмалар тўла ионланган бўлса, p - n ўтишлар қатлами асосан қайси соҳада жойлашган бўлади ?

Ечиш. Масала шартига кўра, $p_p=N_a$, $n_n=N_d$, ва $p_p/n_n = N_a/N_d = 10$. Демак, бу ҳолда N_a га нисбатан N_d ни назарда олмаслик мумкин.

(5.91) ифода, тақрибан, $L_{p-n}(0) = \left(\frac{\varepsilon \Phi_{p-n}}{2\pi e^2 N_d} \right)^{\frac{1}{2}} = L_n$, яъни p -ўтиш асосан, n -соҳада (паст легирланган соҳада) жойлашган бўлади.

2-мисол. Агар диодга берилган V тўғри кучланишнинг ярми p -ўтишга тўшаётган бўлса ва ярми p - n ўтишдан ўтаётган ток ковакларнинг диффузион токи бўлса, у ҳолда тўғри ток ифодас қанақа бўлади ?

Ечиш. Бу ҳолда (5.93) ифодада тўйиниш токининг фақат коваклар

ташкил этувчиси, яъни $j_s = j_{sp} = \frac{eD_p p_n}{L_p}$ қолдирилади, сўнгра

кўрсаткичи функция (экспонента) даги V ўрнига $V/2$ ёзилади.
Жавоб:

$$j = j_{ps} \left(e^{\frac{eV}{2kT}} - 1 \right) = \frac{eD_p p_n}{L_p} \left(e^{\frac{eV}{2kT}} - 1 \right).$$

МАСАЛАЛАР

5.91 Агар яримўтказкичнинг диэлектрик синдирувчанлиги $\varepsilon=10$ контакт потенциаллар айирмаси $0,2 \text{ эВ}$, электронлар зичлиги $n_0=10^{21} \text{ м}^{-3}$ бўлса, метал-яримўтказкич контакти қанча бўлади ?

- 5.91. Метал — яримўтказгич контактига бир марта $V_1=0,5$ В ва иккинчи марта $V_2=-0,5$ В кучланишлар берилган. Агар $\phi_k=0,7$ эВ ва $n_0=10^{15}$ м⁻³, $\epsilon=10$ бўлса бу ҳолларда электрик сизим қийматлари қандай бўлади?
- 5.92. Агар метал — яримўтказгич контакти учун $j_0=1$ А/м² бўлса, $T=300$ К да унга $V=0,26$ В кучланиш берилса, контактдан қандай ток ўтади? Унинг максимал тескари токка (j_0) нисбати қанақа бўлади?
- 5.93. Агар (кучланиш йўқлигида) p — n ўтиш ҳосил қилган p — n — соҳаларда $N_d=10^{16}$ см⁻³, $N_a=10^{15}$ см⁻³, $\epsilon=10$ бўлса ва потенциал тўсиқ баландлиги $\phi_{p-n}=0,7$ эВ қийматига эга бўлса, бу ҳолда p — n ўтишнинг кенглиги қанча? $V=-4,9$ В кучланиш берилса — чи?
- 5.94. $T=300$ К да $D_p=37,6 \cdot 10^{-4}$ м⁻²с⁻¹, $b=2,9$, $L_n=0,1$ см, $p_n=p_p=10^5$ см⁻³ деб олиб, кремнийдаги p — n ўтиш учун j_s тўйиниш токи зичлигини аниқланг.
- 5.95. Юқоридаги масала шароитида агар p — n ўтишга $0,4$ В тўғри кучланиш берилса, тўғри ток зичлиги қанча бўлади?
- 5.96. Кремнийда p — n соҳада тўла ионланган акцептор ва донор киришмалар зичлиги $N_a=10^{22}$ м⁻³, $N_d=1,1 \cdot 10^{20}$ м⁻³ бўлса, $T_1=300$ К ва $T_2=200$ К температураларда контакт потенциаллар айирмаси қандай қийматларга эга бўлади?
- 5.97. $T=290$ К да p — n ўтишга $V=0,1$ В кучланиш берилган, унинг юзи $S=10^{-6}$ м², $j_0=1$ А/м². p — n ўтишнинг дифференциал қаршилигини аниқланг.
- 5.98. Киришмалар зичликлари айирмаси чизиқий қонун бўйича p — n ўтиш қатламида ўзгара борса, $K=10^{30}$ м⁻⁴, $\epsilon=10$ пФм, ўтиш юзи $S=10^{-7}$ м², $\phi_{p-n}=0,3$ В бўлса, унга тескари $V=-5$ В кучланиш берилган бўлса p — n ўтишнинг электрик сизими қанча?
- 5.99. Агар p — n ўтишнинг юзи $S=10^{-6}$ м², температура $T=300$ К, $p_n=p_p=10^9$ м⁻³, $L_n=L_p=10^{-4}$ м бўлса, бу диодга $V=0,52$ В кучланиш берилса, диоднинг диффузион сизими нимага тенг?
- 5.100. Диодга берилаетган тўғри кучланиш $V=2$ В нинг фақат тўртдан бир улуши p — n ўтишга тушади. Агар $V=0,3$ В бўл

ганда эди, унинг ҳаммаси p—n ўтишга тушар эди. $T=300$ К деб ҳисоблаб, шу иккала ҳолдаги тоқлар нисбатини аниқланг.

5.102. Дiodдан ўтаётган ўзгарувчан тоқнинг кучланиши амплитудаси $V_{\text{макс}}=0,3$ В бўлса, бу ҳолда тўғри ва тескари тоқлар нисбати (тўғрилаш коэффициентини) қандай бўлади ? $T=295$ К. Кучланиш фақат p—n ўтишга тушади.

5.103. Агар база ўтказувчанлигининг эмиттер ўтказувчанлигига нисбати $\sigma_n / \sigma_p = 10^{-2}$ ва база w кенглигининг ковақлар диффузион узунлигига нисбати $w / L_p = 10$ бўлса, транзистор эффективлиги нимага тенг?

5.104. Олдинги масала шароитида кўчириш коэффициентини нимага тенг?

5.105. Агар $M_k = 1$ бўлса, $\sigma_n : \sigma_p = 10^{-3}$ ва $w / L_p = 0,3$ бўлса, тоқни узатиш коэффициентини нимага тенг ?

5.106. Агар эмиттер тоқи $I_3 = 10^{-2}$ А/м², $w = 10^{-4}$ м, $T = 300$ К, $D = 0,2$ м²с⁻¹ бўлса, у ҳолда транзисторнинг диффузион сизими қандай қийматига эга ?

5.107. Агар доимий тоқ бўйича транзисторнинг кучайтириш коэффициентини $\alpha = 0,985$ бўлса, база тоқи 20 мкА, эмиттер занжири узук бўлганда коллектор — база сирқиш тоқи $I_{\text{кбо}} = 1$ мкА бўлса коллектор тоқи қанча бўлади ?

5.108. Агар транзистор базаси орқали ковақлар диффузияланиш вақти $\tau_D = 10^{-8}$ с ва ташқи сигнал такрорийлиги $\omega = 10^8$ Гц бўлса, паст такрорийликларда кучайтириш коэффициентини $\alpha_o = 0,98$ бўлса, бу ҳолда $\alpha(\omega)$ нимага тенг ?

ДИЭЛЕКТРИКЛАР

Асосий тушунчалар ва формулалар

1. Электрик дипол — катталиклари жиҳатидан тенг, лекин ишоралари қарама — қарши иккита нуқтавий зарядлардан иборат тизим бўлиб, одатда улар орасидаги l масофа диполь марказидан кузатиш нуқтасигача бўлган r масофадан жуда кичик деб қаралади. Диполнинг электрик хоссалари дипол моменти билан характерланади. Манфий заряддан мусбат зарядга томон ўтқа — зилган ва мутлоқ қиймати жиҳатидан зарядлар орасидан масофага тенг бўлган \vec{l} вектор диполнинг елкаси дейилади.

Дипол ташкил қилувчи зарядларнинг ихтиёрий битгасини мутлақ қиймати $|Q|$ дипол заряди ва

унинг дипол елкаси \vec{l} га кў — пайтмага диполнинг электрик моменти дейилади:

$$\vec{P} = |Q| \vec{l} \quad (6.1)$$

2. Дипол майдонининг кучланганлиги умумий ҳолда :

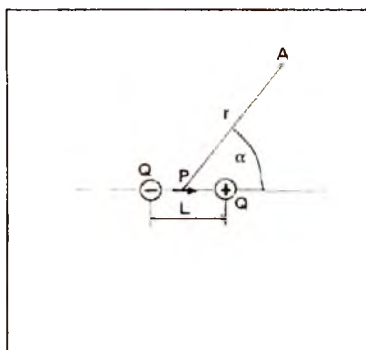
$$E = \frac{P}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2\alpha}.$$

(6.2)

кўринишга эга. Бу ерда P — диполнинг электрик моменти; r — дипол марказидан майдон кучланганлиги аниқланаётган нуқтага ўтқа — зилган радиус — векторнинг модули; ϵ_0 — электрик доимий; ϵ — диэлектрик сингдирувчанлик; α — радиус вектор \vec{r} ва дипол елкаси \vec{l} орасидаги бурчак (1 — расм).

Дипол майдонининг кучланганлиги дипол ўқида ётувчи ($\alpha=0$) нуқтада :

$$E = \frac{P}{2\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^3}, \quad (6.3)$$



диполнинг ўртасидан унинг елкасига тик ўтказилган чизиқда

ётувчи нуқтада ($\alpha=\pi/2$):
$$E = \frac{P}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^3}. \quad (6.4)$$

(3) ва (4) лардан яққол кўриниб турибдики $\alpha=0$ ва $E=E_{\max}$, $\alpha=\pi/2$ да эса $E=E_{\min}$ бўлади.

3. Дипол майдонининг потенциали умумий ҳолда:

$$\varphi = \frac{P}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^2} \cos\alpha. \quad (6.5)$$

Дипол ўқида ($\alpha=0$) ётувчи нуқтадаги дипол майдонининг потенциали:

$$\varphi = \frac{P}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^2}; \quad (6.6)$$

диполнинг ўртасидан унинг елкасига тик ўтказилган чизиқда ётувчи ($\alpha=\pi/2$) нуқтадаги дипол майдони потенциали :

$$\varphi=0; \quad (6.7)$$

яъни дипол майдони потенциалининг қиймати ҳам ($\alpha=0$) да мак — симум $\varphi=\varphi_{\max}$, $\alpha=\pi/2$ да $\varphi=\varphi_{\min}=0$ минимум бўлади.

4. Е кучланганликли бир жинсли электрик майдонга жой — лаштирилган. электрик моменти \vec{p} бўлган диполга таъсир этувчи механиқ момент :

$$\vec{M} = [\vec{p} \cdot \vec{E}] \text{ ёки } M=pE \cdot \sin\alpha. \quad (6.8)$$

Бу ерда ўрта қавс вектор кўпайтмани, α эса \vec{p} ва \vec{E} векторлар орасидаги бурчакни ифодалайди.

Бир жинсли бўлмаган майдонда диполга механиқ момент (жуфт кучлар) дан ташқари яна бошқа куч ҳам таъсир қилиб, х ўқиға нисбатан симметрик бўлган майдон ҳолида бу куч :

$$F_x = p \frac{\partial E}{\partial x} \cos\alpha \quad (6.9)$$

муносабат билан ифодаланади; бу ерда $\frac{\partial E}{\partial x}$ майдоннинг x ўқи йўналишидаги бир жинслимаслик даражасини характерловчи катталиқдир.

$\alpha > \pi/2$ да F_x мусбат. Демак унинг таъсирида дипол кучли майдон соҳасига тортилади.

5. Диелектрикларнинг қутбланиши. Бир жинсли қутбланишдаги қутбланиш вектори, яни диелектрик ҳажм бирлигининг электрик моменти аниқланишига кўра:

$$\bar{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \bar{p}_i, \quad (6.10)$$

бу ерда \bar{p}_i — алоҳида (i) молекуланинг (ёки атомнинг) электрик моменти (бундан буён ҳар доим қисқалик учун фақат молекула тўғрисида гапириб, бу атомга тааллуқли эканлигини назарда тутамиз), $N - \Delta V$ ҳажмдаги молекулалар сони.

Қутбланиш векторининг диелектрикдаги ўртача макроскопик майдон кучланганлиги E билан боғланиши:

$$P = \chi \epsilon_0 E, \quad (6.11)$$

бу ерда χ — диелектрик қабул қилувчанлик.

Диелектрик синглярўвчанлик ϵ билан χ диелектрик қабул қилувчанлик орасидаги боғланиш:

$$\epsilon = 1 + \chi. \quad (6.12)$$

Диелектрикдаги ўртача макроскопик майдон кучланганлиги E ташқи майдон кучланганлиги E_0 билан қуйидаги муносабатлар орқали боғланган:

$$E = E_0 / \epsilon \quad \text{ва} \quad E = E_0 - P / \epsilon_0 \quad (6.13)$$

(ўртача майдон E ташқи майдон E_0 ни ҳамда барча молекулалар, жумладан қаралаётган молекуланинг ҳам, майдонларини ҳисобга олади).

Қутбланмаган суюкликлар ва куб сингоник кристаллар ичидаги маҳаллий (локал) майдон кучланганлиги E_{\max}

$E_{\max} = E + P / 3\epsilon_0$ ва $E_{\max} = E_0 (\epsilon_0 + 2) / 3\epsilon$. (6.14) формулалар билан ифодаланади. Мужассамланган майдон E_{\max} ташқи майдон E_0 ни ва майдон таъсири қаралаётган молекула майдонидан бошқа барча молекулаларнинг майдонларини ҳисобга олади.

Алоҳида молекуланинг индукцияланган электрик моменти шу молекулага таъсир қилувчи мужассамланган электрик майдоннинг кучланганлиги E_{\max} га пропорционал:

$$p = \alpha \epsilon_0 E_{\max}, \quad (6.15)$$

бу ерда α – молекуланинг қутбланувчанлиги ($\alpha_e + \alpha_a$, бу ерда α_e – электрон қутбланувчанлик; α_a – атом қутбланувчанлик).

Диэлектрик қабул қилувчанлик χ молекуланинг қутбланувчанлиги α билан қуйидаги муносабат орқали боғланган:

$$\chi = n\alpha, \quad (6.16)$$

бу ерда n – диэлектрик ҳажм бирлигидаги молекулалар сони, яъни молекулалар концентрацияси.

Диэлектрик қабул қилувчанлик χ ни молекуланинг қутбланувчанлиги α билан янада аниқроқ боғланиши қуйидаги курунишга эга:

$$\chi / (\chi + 3) = \alpha n / 3. \quad (6.17)$$

6.Клаузиус – Мосотти тенгламаси

$$(\epsilon - 1) / (\epsilon + 2) = \alpha n / 3 \quad \text{ва} \quad \frac{M \epsilon - 1}{\rho \epsilon + 2} = \frac{1}{3} \alpha N_a, \quad (6.18)$$

кейинги тенгламада $n = \rho N_a / M$ эканлиги ҳисобга олинган. Бу ерда M – модданинг моляр массаси, ρ – модданинг зичлиги, N_a – Авогадро сони.

7.Лоренц – Лорентц формуласи

$$(n^2 - 1) / (n^2 + 2) = \alpha_e n / 3 \quad \text{ва} \quad \frac{M n^2 - 1}{\rho n^2 + 2} = \frac{1}{3} \alpha_e N_a. \quad (6.19)$$

Бу формулаларнинг чап томонларидаги n – диэлектрикнинг синдириш кўрсаткичи; α_e – молекуланинг (атомнинг) электрон қутбланувчанлиги.

8.Молекуланинг йўналтирилган (ориентацияланган) қутбланувчанлиги

$$\alpha_{\text{й}} = p^2 / 3\epsilon_0 kT, \quad (6.20)$$

бу ерда p – молекуланинг электрик моменти, k – Болцман доимийси, T – термодинамик температура.

9.Дебай – Ланжевен формуласи:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{1}{3} n \left(\alpha + \frac{p^2}{3\varepsilon_0 kT} \right) \text{ ёки } \frac{M \varepsilon - 1}{\rho \varepsilon + 2} = \frac{1}{3} N_a \left(\alpha + \frac{p^2}{3\varepsilon_0 kT} \right), \quad (6.21)$$

бу ерда $\alpha = \alpha_e + \alpha_a$, $\alpha + \frac{p^2}{3\varepsilon_0 kT} = \alpha_{ум}$. (6.20) ни эътиборга олсак

$$\alpha_{ум} = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_{й}.$$

10. Яккаланган ўтказгич ёки конденсаторнинг электрик сифими :

$$C = \Delta Q / \Delta \phi, \quad (6.22)$$

бунда Q — ўтказгичга (конденсаторга) берилган заряд; $\Delta \phi$ — шу заряд томонидан вужудга келтирилган потенциалнинг ўзгариши.

Диэлектрик синдирувчанлиги ε бўлган чексиз муҳитда жойлашган R радиусли яккаланган ўтказувчи сферанинг электрик сифими :

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon/R. \quad (6.23)$$

Сферанинг ғовак ёки диэлектрик билан тўлдирилган бўлиши унинг электрик сифимига таъсир қилмайди.

Ясси конденсаторнинг электрик сифими:

$$C = \varepsilon_0\varepsilon S/d, \quad (6.24)$$

бунда S — қопламалар (ҳар бир қопламанинг) юзаси ; d — қопламалар орасидаги масофа; ε — қопламалар оралиғидаги бўшликни тўлдириб турувчи диэлектрикнинг диэлектрик синдирувчанлиги.

Ҳар бирининг диэлектрик синдирувчанлиги ε_i ва қалинлиги d_i бўлган n — та диэлектрик қатлам билан тўлдирилган ясси конденсатор (қатламли конденсатор) нинг электрик сифими :

$$C = \varepsilon_0 S / \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \dots + \frac{d_n}{\varepsilon_n} \right). \quad (6.25)$$

Цилиндрик конденсаторнинг электрик сифими (узунлик — лари L ва радиуслари R_1 ҳамда R_2 бўлган иккита коаксиал цилиндрнинг орасидаги бўшлик ε синдирувчанликли диэлектрик билан тўлдирилган):

$$C = 2\pi\varepsilon\varepsilon_0 L / \ln(R_2/R_1). \quad (6.26)$$

Сферик конденсаторнинг электрик сизими (радиуслари R_1 ҳамда R_2 бўлган концентрик сфералар орасидаги бўшлик ϵ син – гдирувчанликли диэлетрик билан тўлдирилган):

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2 / (R_2 - R_1). \quad (6.27)$$

Кетма – кет уланган конденсаторларнинг электрик сизими

С умумий ҳолда :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}, \quad (6.28)$$

бунда n – конденсаторлар сони.

Иккита конденсаторлар ҳолида :

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2). \quad (6.29)$$

Ҳар бирининг сизими C_1 бўлган n – та бир хил конденсаторлар ҳолида :

$$C = C_1 / n. \quad (6.30)$$

Параллел уланган конденсаторларнинг электрик сизими; умумий ҳолда :

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n; \quad (6.31)$$

иккита конденсатор ҳолида :

$$C = C_1 + C_2; \quad (6.32)$$

ҳар бирининг сизими C_1 бўлган n – та бир хил конденсаторлар ҳолида:

$$C = n C_1. \quad (6.33)$$

Масалалар ечишга доир мисоллар

1 – мисол. Электрик моменти $\vec{p} = 2 \text{ нКл} \cdot \text{м}$ бўлган дипол кучланганлиги $E = 30 \text{ кВ/м}$ ли бир жинсли электрик майдонга жойлашган; \vec{p} вектор куч чизиқлари йўналиши билан $\alpha = 60^\circ$

бурчак ҳосил килади. Диполни $\beta = 30^\circ$ га буришда ташқи кучлар бажарган **A** иш аниқлансин.

Берилган: $\vec{p} = 2$ нКл·м = $2 \cdot 10^{-9}$ Кл·м; $E = 30$ кВ/м = $3 \cdot 10^4$ В/м;
 $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 30^\circ$.

Топиладин: A (иш)

Ечиш: Диполни бошланғич ҳолатдан (2а расм)

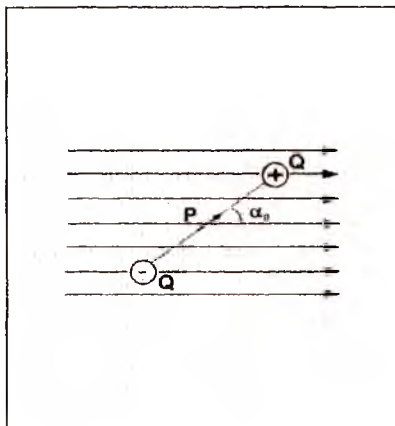
$\beta = 30^\circ = \frac{\pi}{6}$ бурчакка икки йўналишда буриш мумкин: соат миля йўналиши буйлаб $\alpha_1 = \alpha_0$ –

$\beta = \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{6}$ бурчакка (2б расм) ёки соат миля ҳаракатига қарама – қарши йўналишда $\alpha_2 = \alpha_0 + \beta = \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{2}$ (2в расм).

Биринчи ҳолда, дипол майдон кучлари таъсирида букилади. Бинобарин, бу ҳолда ташқи кучларнинг иши манфий бўлади. Иккинчи ҳолда эса бурилиш фақат ташқи кучлар таъсиридагина амалга оширилиши мумкин ва демак бунда ташқи кучларнинг бажарган иши мусбат бўлади.

Диполни буришда бажарилган ишنى икки хил усул билан ҳисоблаш мумкин: 1) элементар иш ифодасини бевосита интеграллаш усули билан; 2) бажарилган иш ва электрик майдондаги диполнинг потенциал энергиясининг ўзгариши орасидаги муносабат ёрдамида.

Биринчи усул: Диполни $d\alpha$ бурчакка буришдаги элементар иш:



$$dA = M \cdot d\alpha = p \cdot E \cdot \sin\alpha \, d\alpha ,$$

α_0 дан α гача бурчакка буришдаги тулиқ иш :

$$A = \int_{\alpha_0}^{\alpha} pE \sin\alpha \, d\alpha = pE \int_{\alpha_0}^{\alpha} \sin\alpha \, d\alpha .$$

Интеграллашни бажариб оламиз:

$$A = - p \cdot E (\cos\alpha - \cos\alpha_0) = p \cdot E (\cos\alpha_0 - \cos\alpha) . \quad (1)$$

иполни соат миля ҳаракати йўналишига қарама-қарши томонга буришда бажарилган иш:

$$A_1 = p \cdot E (\cos\alpha_0 - \cos\alpha_1) = -21,9 \text{ мкЖ} .$$

Соат миля ҳаракати йўналишига қарама-қарши томонга буришда бажарилган иш:

$$A_2 = p \cdot E (\cos\alpha_0 - \cos\alpha_2) = 30 \text{ мкЖ} .$$

Иккинчи усул. Ташқи кучлар бажарган иш A потенциал энергиянинг ўзгариши $\Delta\Pi$ билан

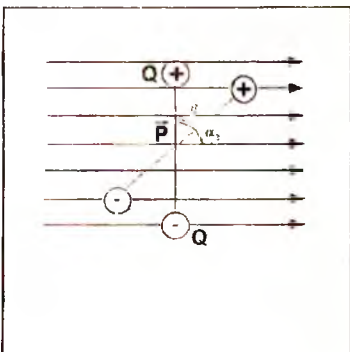
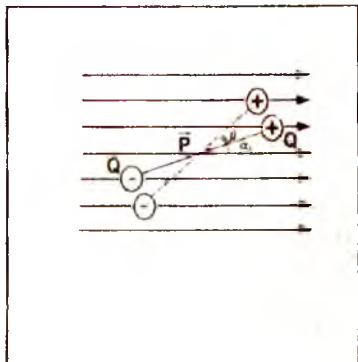
$$A = \Delta\Pi = \Pi_2 - \Pi_1 \quad (1)$$

муносабат воситасида боғланган; бу ерда Π_1 ва Π_2 лар мос равишда тизимнинг бошланғич ва охири ҳолатлардаги потенциал энергиялари. Диполнинг электрик майдондаги потенциал энергияси $\Pi = -pE \cos\alpha$ формула ёрдамида ифодаланишини назарда тутиб,

$$A = p \cdot E (\cos\alpha_0 - \cos\alpha) \quad (2)$$

натижани олиш мумкин. Бу ифода 1-усул билан олинган (1) формула билан мос тушади.

2-мисол. Диполнинг $Q = \pm 3,2$ нКл зарядлари орасидаги масофа $L = 12$ см. Ҳар иккала заряддан $r = 8$ см узоқликда турган нуқтада дипол ҳосил қилган майдоннинг кучланганлиги E ва потенциали ϕ топилин.



Берилган: $Q = \pm 3,2 \text{ нКл} = \pm 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$; $L = 12 \text{ см} = 12 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
 $r = 8 \text{ см} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

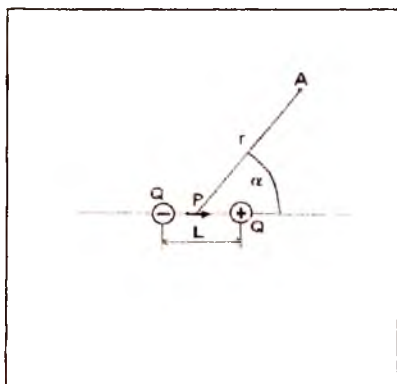
Топилсин : E ва φ

Ечиш: Масала шартига мос шакл чизамиз. 3 – расмдан кўринадики ҳар иккала заряддан бирхил ма–софада ётувчи нуқта дипол мар–казига тик ўтказилган чизиқда ётади.

Масалани ечиш учун умумий ҳолга мос келувчи:

$$E = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2\alpha}, \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^2} \cos\alpha \quad (2)$$



формулаларни масала шартига мос кўринишда ($\alpha=90^\circ$, $p=Q \cdot L$ эканлигини эътиборга олиб) ёзамиз:

$$E = \frac{Q \cdot L}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^3}, \varphi = 0. \quad (1')$$

Демак, A нуқтада диполнинг ҳосил қилган потенциали 0 га тенг деган биринчи натижа келиб чиқди.

E ни ҳисоблашда $\epsilon=1$, $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Фм}^{-1} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Нм}^2$ деб оламиз ва r масофани дипол марказидан эмас, заряд турган жойдан бошланади деб ҳисоблаймиз. Бундай олиншининг сабаби одатда $L \ll r$ бўлиши зарур эди. Қаралаётган масаланинг ўзига хослиги шундаки, $L > r$. Айтилганларни назарда тутиб ($1'$) ифодада катталикларнинг сон қийматларини қўйсак :

$$E = \frac{3,2 \cdot 10^{-9} \cdot 12 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (8 \cdot 10^{-2})^3} \text{ В/м} = 6,75 \cdot 10^3 \text{ В/м} = 6,75 \text{ кВ/м}$$

Жавоб: $E=6,75 \text{ кВ/м}$, $\varphi=0$.

3 — мисол. Радиуси $R=5$ см бўлган метал шар $d=2$ см қалинликдаги чинни қатлам билан бир текис ўралган. Мос равишда диэлектрикнинг ички ва ташқи сиртларидаги боғланган заряддар зичликлари σ'_1 ва σ'_2 лар аниқлансин. Шарнинг заряди $Q = 10$ нКл.

Берилган: $R=5\text{см}=5 \cdot 10^{-2}\text{м}$, $d=2\text{см} = 2 \cdot 10^{-2}\text{м}$;
 $Q=10\text{нКл}=10 \cdot 10^{-9}\text{Кл}=10^{-8}\text{Кл}$

Топилиши: σ'_1 ва σ'_2 .

Ечиш: Масала шартига мос шакл чизамиз ва масалани икки усул билан ечамиз.

1 — усул: Маълумки, қутбланиш вектори P диэлектрикдаги ўргача макроскопик майдон кучланганлиги E билан

$$P = \chi \epsilon_0 E \quad (1)$$

ифода орқали боғланган. Яна шуни таъкидлаш мумкинки бир текис қутбланган диэлектрикда ($P = \text{const}$) боғланган зарядларнинг зичлиги

$$\sigma = P_{1n} - P_{2n}$$

формулага кўра нолга тенг. Бунинг сабаби диэлектрикнинг туташ соҳалари бир хил физик ҳолатда бўлганлиги учун ҳеч қаерда бир хил ишорали зарядларнинг тўпланиши руй бермаслиқда.

қутбланган диэлектрик билан вакуум еки металнинг чегарасида эса (2) формулага кўра зичлик :

$$\sigma = \pm P_n \quad (3)$$

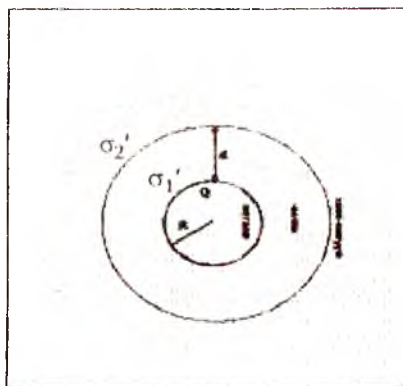
бўлган боғланган сирт зарядлари тупланеди (чунки вакуумда ҳам, металда ҳам $P=0$). (2) ва (3) ларда n — индекс нормал ташкил этувчини билдиради.

Айтилганларга кўра, (1) ни қуйидагича ёзиш мумкин :

$$\sigma' = P = \chi \epsilon_0 E, \quad (4)$$

$\chi = \epsilon - 1$, $E = E_0 / \epsilon$, E_0 — ташқи майдоннинг кучланганлиги.

$$\sigma' = (\epsilon - 1) \epsilon_0 E_0 / \epsilon, \quad E_0 = Q / 4\pi \epsilon_0 R^2, \quad (5)$$



$$\sigma_1^c = -\frac{Q}{4\pi R^2} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$$\sigma_2^c = \frac{Q}{4\pi(R_1 + d)^2} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}, \quad (7)$$

Бу ерда ε чиннининг диэлектрик сингдирувчанлиги. Унинг катталиги жадвалдан олинади.

(6) ва (7) ифодалардаги катталикларнинг ўрниларига сон қийматларини қўйсак

$$\sigma_1^c = -\frac{10^{-8}}{4 \cdot 3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2} \frac{4}{5} \text{ Кл/м}^2 = -0,255 \cdot \text{мкКл/м}^2;$$

$$\sigma_2^c = \frac{10^{-8}}{4 \cdot 3,14 \cdot (7 \cdot 10^{-2})^2} \frac{4}{5} \text{ Кл/м}^2 = 0,130 \cdot \text{мкКл/м}^2$$

2-усул: Бу усул билан масалани ечишда (1) ва (2) формулалардан фойдаланиб, $P = \varepsilon_0 E_0 (\varepsilon - 1) / \varepsilon$ ҳосил қиламиз; бунга $E_0 = Q / 4\pi \varepsilon_0 R^2$ ни қўйсак

$$P = \sigma^c = \frac{Q}{4\pi R^2} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \quad (3)$$

Шуни аниқ ҳолга тадбиқ қилсак яна

$$\sigma_1^c = \frac{Q}{4\pi R_1^2} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \quad \text{ва} \quad \sigma_2^c = \frac{Q}{4\pi(R_1 + d)^2} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}$$

формулаларга келамиз.

4-мисол: Ясси конденсатор қопламалари орасидаги бўш-лик молекулалари $\mu_m = 2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м электрик моментга эга бўлган қаттиқ дипол сифатида қараш мумкин бўлган диэлектрик билан тўлдирилган. Диполларнинг концентрацияси $n = 10^{26}$ м⁻³. Агар диэлектрик йўқлигида конденсатор қопламалари орасидаги кучланганлик $E_0 = 100$ В/м булса, диэлектрикдаги ўртача макроскопик майдоннинг кучланганлиги E аниқлансин. Молекулаларни ориентирсизлантирувчи (йўнал-тирилганлигини йўқотувчи) ис-сиқлик ҳаракатининг таъсири инобатта олинмасин.

Берилган: $\mu_m = 2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м ; $n = 10^{26}$ м⁻³ ; $E_0 = 100$ В/м = 10^8 В/м

Тоңилсин: E .

Ечиш: Масалани ечиш учун ташқи (E_0) ва макроскопик (E) майдонларни боғловчи :

$$E = E_0 - P/\epsilon . \quad (1)$$

формуладан фойдаланамиз. Бу ерда P диэлектрикнинг қутбланиш вектори. Уни қаралаётган ҳол учун:

$$P = \mu_m n . \quad (2)$$

қўринишда ёзиш мумкин; бу ерда n — диполларнинг концентрацияси. (2) ни (1) га қўйсақ :

$$E = E_0 - \mu_m n / \epsilon_0 . \quad (3)$$

(3) га катталиқлар сон қийматларини қўйсақ :

$$E = (10^{-8} - \frac{2 \cdot 10^{30} \cdot 10^{20}}{8,85 \cdot 10^{-12}}) B / m'' = 77,4 Mb / m''$$

Жавоб: $E = 77,4$ МВ/м.

5 — мисол. Диэлектрик синдирувчанлиги $\epsilon = 5$ бўлган диэлектрикнинг қандай P қутбланганлигида маҳаллий майдон кучланганлиги $E_{\max} = 10$ МВ/м бўлади ?

Берилган: $\epsilon = 5$; $E_{\max} = 10$ МВ/м = 10^7 В/м

Тоңилсин: диэлектрикнинг қутбланувчанлиги P

Ечиш: Кубик сингонияга эга бўлган кристаллар учун ўринли ҳисобланувчи :

$$E_{\max} = \frac{\epsilon + 2}{3\epsilon} E_0 . \quad (1)$$

ифодадан фойдаланамиз. Ундан E_0 ни топамиз:

$$E_0 = \frac{3\epsilon E_{\max}}{\epsilon + 2} . \quad (2)$$

Иккинчидан: $E = E_0/\epsilon$; $E = E_0 - P/\epsilon_0$ тенгламаларни ҳам E_0 га нисбатан ечиб :

$$E_0 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0(\epsilon - 1)} P . \quad (3)$$

ифодани оламиз. (2) ва (3) нинг чап томонлари тенг бўлганлиги учун :

$$\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} E_{\max} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0(\varepsilon + 1)} P$$

буцдан
$$P = \frac{3(\varepsilon - 1)}{\varepsilon + 2} \varepsilon_0 E_{\max} \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Нм}^2$$

(4) даги катталиклар урнига берилган қийматларини қўйсақ :

$$P = \frac{3 \cdot (5 - 1)}{5 + 2} 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^7 \text{ Кл}^2/\text{м}^2 = 152 \text{ мкКл}^2/\text{м}^2$$

Жавоб: $P = 152 \text{ мкКл}^2/\text{м}^2$.

6 – мисол. Олмос (углерод) атомларининг қутбланувчанлиги α аниқлансин. Олмоснинг диэлектрик синдирувчанлиги $\varepsilon = 5,6$, зичлиги $\rho = 3,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Берилган: $\varepsilon = 5,6$, $\rho = 3,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$;

Ечиш: Бунинг учун Клаузиус – Мосоттининг қуйидаги қўринишдаги тенгламасидан фойдаланамиз:

$$\frac{M}{\rho} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{1}{3} \alpha N_A \quad (1)$$

бу ерда M – углероднинг атомар массаси.
(1) дан

$$\alpha = \frac{3M}{\rho N_A} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \quad (2)$$

ва $M = 12 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ эканлигини назарда тутиб, берилган қийматларни (2) га қўйсақ,

$$\alpha = \frac{3 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \frac{5,6 - 1}{5,6 + 2} \text{ м}^3 = 1,04 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$$

Жавоб: $\alpha = 1,04 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$

7 – мисол. Агар сув молекуласининг электрик моменти $p = 6,1 \cdot 10^{-30} \text{ Кл} \cdot \text{м}$ бўлса, $t = 27^\circ \text{ С}$ температурада сув молекуласининг йўналтирилган қутбланувчанлиги $\alpha_{\text{й}}$ ҳисоблансин.

Берилган: $p = 6,1 \cdot 10^{-30} \text{ Кл} \cdot \text{м}$, $t = 27^\circ \text{ С} = 300 \text{ К}$

Ечиш: Йўналтирилган қутбланишнинг электрон ва атом қутбланишлардан энг асосий фарқи унинг температурага боғлиқлигидир. Шунинг учун молекуланинг йўналишли қутбланувчанлигини :

$$\alpha_{\text{Й}} = p^2 / 3\epsilon_0 k T$$

ифодадан топилади. Бу ерда p – молекуланинг электрик моменти, k – Болцман доимийси, T – термодинамик температура ,

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Нм}^2, \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ж/К}$$

лигини назарда тутиб, қолган катталиклар қийматларини (1) га қўйсак

$$\alpha_{\text{Й}} = 3,38 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3,$$

Жавоб: $\alpha_{\text{Й}} = 3,38 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$.

8 – мисол. Ясси конденсатор $U = 600 \text{ В}$ потенциаллар фарқигача зарядланган. Унинг қопламалари орасида иккита диэлектрик қатлами бор: қалинлиги $d_1 = 7 \text{ мм}$ бўлган шиша ва қалинлиги $d_2 = 3 \text{ мм}$ бўлган эбонит. Конденсатор ҳар бир қопламасининг юзаси $S = 200 \text{ см}^2$.

1) Конденсаторнинг сифими C ; 2) ҳар бир қатламдаги майдон индукцияси D , кучланганлиги E ва потенциал тушиши $\Delta\phi$ топилисин.

Берилган: $U = 600 \text{ В}$, $d_1 = 7 \text{ мм} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $d_2 = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $S = 200 \text{ см}^2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; $\epsilon_1 = 7$; $\epsilon_2 = 3$.

Топилсин: C , D , E ва $\Delta\phi$.

Ечиш: 1) Таърифга кўра конденсаторнинг сифими $C = Q/U$, бунда Q – конденсатор қопламаларидаги заряд; U – қопламалар потенциаллар фарқи. Бу тенгликда конденсатордаги умумий потенциаллар фарқи U ни диэлектрик қатламлардаги кучланишлар йиғиндиси $U_1 + U_2$ билан алмаштриб қуйидагини оламиз.

$$C = Q / (U_1 + U_2), \quad (1)$$

$Q = \sigma S$, $U_1 = E_1 \cdot d_1 = D d_1 / \epsilon_0 \epsilon_1$ ва $U_2 = E_2 d_2 = D d_2 / \epsilon_0 \epsilon_2$ эканини эътиборга олиб, (1) тенгликни

$$C = \frac{\sigma S}{\frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_1} d_1 + \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_2} d_2} \quad (2)$$

кўринишда ёзиш мумкин. Бунда σ — қопламалардаги заряднинг сиртий зичлиги; E_1 ва E_2 мос равишда диэлектрикларнинг биринчи ва иккинчи қатламларидagi майдон кучланганликлари; D — диэлектриклардаги майдоннинг электрик индукцияси.

(2) тенгликнинг сурат ва махражини ϵ_0 га кўпайтириб ва $D = \sigma$ эканлигини ҳисобга олсак,

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} \quad (3)$$

Охирги ифода бўйича ҳисоблашларни бажариб, натижани топамиз:

$$C = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{\frac{7 \cdot 10^{-3}}{7} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{3}} \Phi = 88,5 \text{ пФ}$$

2) D ни қуйидагича топамиз:

$$U = U_1 + U_2; \quad U_1 = Dd_1 / \epsilon_0 \epsilon_1 \quad \text{ва} \quad U_2 = Dd_2 / \epsilon_0 \epsilon_2$$

$$U = Dd_1 / \epsilon_0 \epsilon_1 + Dd_2 / \epsilon_0 \epsilon_2 = D / \epsilon_0 (d_1 / \epsilon_1 + d_2 / \epsilon_2)$$

$$D = \frac{\epsilon_0 U}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} \quad (4)$$

Катталиклар қийматларини охирги ифодага қўйсак :

$$D = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 600}{\frac{7 \cdot 10^{-3}}{7} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{3}} \text{ Кл/м}^2 = 2,66 \text{ мкКл/м}^2$$

Бу ерда $D_1 = D_2 = D$ деб олинишининг сабаби электрик майдон индукцияси D нинг қиймати муҳитга боғлиқ эмаслигида.

3) $E_1 = D / \epsilon_0 \epsilon_1$ ва $E_2 = D / \epsilon_0 \epsilon_2$ ифодалардан:

$$E_1 = \frac{U}{\epsilon_1 \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)}$$

$$E_2 = \frac{U}{\epsilon_2 \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)}$$

Сон қийматларини қўйиб $E_1=42,8$ кВ/м , $E_2=100$ кВ/м натижани оламыз.

4) $\Delta\phi_1 = E_1 d_1$; $\Delta\phi_2 = E_2 d_2$ ифодалардан $\Delta\phi_1 = 300$ В ; $\Delta\phi_2 = 300$ В яъни $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$ натижа келиб чиқади.

Жавоб: 1) $C=88,5$ пФ; 2) $D=2,66$ мкКл/м² 3) $E_1=42,8$ кВ/м , $E_2=100$ кВ/м

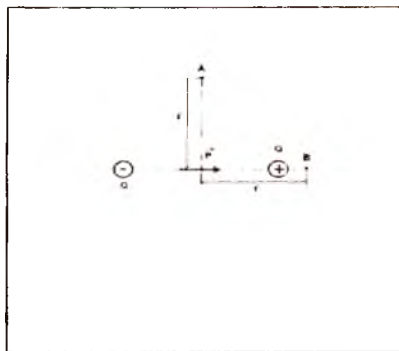
4) $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = 300$ В

Масалалар

6.1. Дипол электрик майдони

6.1. Заряди $Q=10$ нКл ва елкаси $L=0,5$ см бўлган диполнинг электрик моменти p ҳисоблансин.

6.2. Электрик моменти $p=0,12$ нКл·м бўлган дипол иккита $Q=\pm 1$ нКл нуқтавий зарядлар томонидан ҳосил қилинган. Диполнинг марказидан $r=8$ см масофада турган А ва В нуқталардаги (расм) майдон кучланганлиги E ва потенциал ϕ топилинсин.

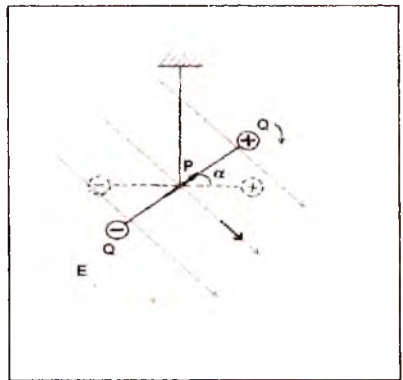


6.3. Диполнинг А ва В нуқталарда ҳосил қилган майдон кучланганлиги E ва потенциал ϕ аниқлансин (4 – расм). Унинг электрик моменти $p = 1$ нКл·м, А ва В нуқталардан дипол марказигача бўлган r масофа эса 10 см га тенг.

- 6.4. Электрик momenti $p = 4$ пКл·м бўлган диполнинг электрик momenti вектори билан $\alpha = 60^\circ$ бурчак ташқил қиладиган йўналишда, дипол марказидан 10 см масофада ҳосил қилган майдон кучланганлиги E ва потенциали ϕ аниқлансин.
- 6.5. Электрик momenti $p = 1$ пКл·м бўлган дипол марказидан елкасига тик ўтган ўққа нисбатан $\nu = 10^3$ с⁻¹ частота билан бир текис айланмоқда. Диполнинг айланиш текислигида унинг марказидан $r = 1$ см узоқликдаги муайян нуқта учун потенциалнинг ўзгариш қонуни вақтнинг функцияси \sin -фатида чиқарилсин. Нуқтанинг бошланғич пайтдаги ϕ_0 потенциали 0 га тенг деб олинсин.
- 6.6. Электрик momentлари $p_1 = 1$ пКл·м ва $p_2 = 4$ пКл·м бўлган икки дипол бир-биридан $r = 2$ см масофада турибди. Агар диполларнинг ўқлари бир тўғри чизиқда ётган бўлса, уларнинг ўзаро тасир кучлари аниқлансин.
- 6.7. Электрик momentлари $p_1 = 20$ пКл·м ва $p_2 = 50$ пКл·м бўлган иккита дипол бир-биридан $r = 10$ см масофада ўқлари бир тўғри чизиқда жойлашган ҳолда турибди. Диполларнинг турғун мувозанатига мос келувчи ўзаро таъсир потенциал энергияси ҳисоблансин.

6.2. Электрик майдондаги дипол

- 6.8. Электрик momenti $p = 100$ пКл·м бўлган дипол қайишқоқ ишга маҳкамланган (5 – расм). Дипол турган жойда унинг елкасига ва унга тик $E = 3$ кВ/м кучланганликли майдон ҳосил қилинганда дипол 30° бурчакка бурилди. Ишнинг буралиш доимийси S аниқлансин.
- 6.9. Олдинги масала шартларида дипол майдон тасирида кичик бурчакка буралади деб ҳисоблаб ишнинг буралиш доимийси S аниқлансин.



(* Буралиш доимийси деб ишни 1 рад га буриш учун зарур куч моментига тенг бўлган катталиқка айтилади.)

- 6.8. Электрик momenti $p=20$ мкКл·м бўлган дипол $E=50$ кВ/м кучланганликли бир жинсли электрик майдонда турибди. Электрик моментнинг вектори майдон чизиқлари билан $\alpha=60^\circ$ бурчак ташкил қилади. Диполнинг погенциал энергияси P қандай қийматга эга? {Курсатма. Нолинчи потенциал энергия деб дипол электрик моментининг вектори май—дон чизиқлари тик жойлашган ҳолатига мос келувчи энергияси қабул қилинсин.)
- 6.9. Электрик momenti $p=100$ пКл·м га тенг бўлган дипол куч—ланганлиги $E=10$ кВ/м бўлган бир жинсли электрик майдонда эркин жойлашган. Диполни $\alpha=180^\circ$ бурчакка буриш учун бажарилиши керак бўлган A иш ҳисоблансин.
- 6.10. Электрик momenti $p=100$ пКл·м бўлган дипол кучланганлиги 10 кВ/м бўлган бир жинсли электрик майдонда эркин жой—лашган. Диполни $\alpha=60^\circ$ га бурганда унинг потенциал энергиясининг ўзгариши ΔP аниқлансин.
- 6.11. Электрик momenti $p=12$ пКл·м бўлган дипол елкасига тик йўналган $E=300$ кВ/м кучланганликли бир жинсли электрик майдон юзага келтирилган. Майдон кучлари таъсирида дипол ўзининг марказидан ўтувчи ўқ атрофида бурила бошлайди. Диполнинг мувозанат ҳолатдан ўтаётган пайтдаги бурчакий тезлиги ω топилсин. Диполнинг елкасига тик ва марказдан ўтувчи ўққа нисбатан инерция momenti $I=2 \cdot 10^{-9}$ кг·м².
- 6.12. Электрик momenti $p=200$ пКл·м бўлган дипол бир жинсли бўлмаган майдонда турибди. Майдоннинг бир жинслимаслик даражаси дипол ўқи йўналишида олинган $dE/dx=1$ МВ/м катталиқ билан характерланади. Шу йўналишда диполга таъсир қилувчи куч аниқлансин.
- 6.13. Электрик momenti $p=200$ пКл·м бўлган дипол $Q=100$ нКл нуқтавий заряд майдонида, ундан $r=10$ см масофада эркин жойлашган. Шу нуқта куч чизиғи йўналишида майдоннинг бир жинслимаслик даражасини характерловчи $|dE/dr|$ катта—лик ҳамда диполга таъсир этувчи F куч аниқлансин.

- 6.16. Электрик momenti $p=4$ пКл·м дипол $\tau=500$ нКл/м чи-зиқли зичлик билан зарядланган чексиз тўғри иш ҳосил қилган майдонда ундан $r=10$ см масофада эркин ўрнашган. Шу нуқтада куч чизиғи йўналишида майдоннинг бир жинслимаслик даражасини ҳарактерловчи $|dE/dr|$ катталиқ ҳамда диполга таъсир этувчи куч аниқлансин.

6.3. Диэлектрикларнинг қутбланиши

- 6.17. HF молекуласи $p=6,4 \cdot 10^{-30}$ Кл·м электрик моментга эга. Ядролараро масофа $d=92$ пм. Шундай диполнинг заряди Q топилин ва унинг катталиғи элементар заряднинг катта-лиғидан сезиларли фарқ қилиши тушунтирилсин.
- 6.18. Ясси конденсатор қопламалари орасидаги масофа $d=2$ мм, потенциаллар фарқи $U=1,8$ кВ . Диэлектрик шиша. Ши-шанинг диэлектрик қабул қилувчанлиғи χ ва шиша сирти-даги қутбланган (боғланган) зарядларнинг сирт зичлиғи σ' аниқлансин.
- 6.19. HCl молекуласининг электрик momenti $p=3,44 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Дипол елкаси L ҳисоблансин.
- 6.20. Қаттиқ гелийнинг қутбланувчанлиғи $\alpha=2,5 \cdot 10^{-30}$ м³, зич-лиғи $\rho=210$ кг/м³ булса, унинг диэлектрик қабул қилувчанлиғи χ ҳисоблансин.
- 6.21. Кубик панжарали кристалнинг диэлектрик қабул қилувчанлиғи $\chi=0,75$. Унинг диэлектрик синдирувчанлиғи ϵ аниқлансин.
- 6.22. Эбонитдан ясалган ясси параллел пластина кучланганлиғи $E_0=2$ МВ/м бўлган бир жинсли электрик майдонда жой-лашган. Пластинанинг қирралари кучланганлик чи-зиқларига тик. Пластина қирраларидаги боғланган заряд-ларнинг сирт зичлиғи σ' аниқлансин.
- 6.23. Кучланганлиғи $E_0=1$ МВ/м бўлган электрик майдонига диэлектрик ($\epsilon=3$) пластинаси киритилди. Ички майдонни Лоренц майдони деб фараз қилиб, унинг диэлектрикдаги алоҳида мо

- лекулага таъсир этувчи, маҳаллий (локал) майдоннинг кучланганлиги $E_{\text{маҳ}}$ аниқлансин.
- 6.24. Кубик сингония кристаллидаги маҳаллий майдон кучланганлиги $E_{\text{маҳ}}$ ўртача макроскопик майдон кучланганлиги E дан неча марта катта?. Кристалнинг диэлектрик сингдирувчанлиги $\epsilon=2,5$ га тенг.
- 6.25. Диэлектрик сингдирувчанлик ϵ нинг қандай максимал қийматида маҳаллий майдоннинг кучланганлиги $E_{\text{маҳ}}$ ни ташқи майдон кучланганлиги E_0 билан алмаштиришдаги хатолик 1% дан ошмайди.
- 6.26. Маҳаллий майдон кучланганлиги $E_{\text{маҳ}}$ ўрнига диэлектрикдаги ўртача макроскопик майдон кучланганлиги E айрилганда йўл қўйиладиган нисбий хатолик аниқлансин. Ҳисоблашлар қўйидаги икки ҳол учун бажарилсин: 1) $\epsilon=1,003$ 2) $\epsilon=2$.
- 6.27. Диэлектрикнинг қутбланувчанлиги $p=1,77 \cdot 10^{-4}$ Кл/м². Агар $\epsilon=2$ бўлса, диэлектрикдаги майдоннинг ўртача макроскопик кучланганлиги E аниқлансин.
- 6.28. Агар ташқи электрик майдон кучланганлиги $E_0=10^6$ В/м бўлса, диэлектрик сингдирувчанлиги $\epsilon=3$ бўлган кристалнинг қутбланганлиги P аниқлансин.
- 6.29. Диэлектрикдаги ($\epsilon=3$) ўртача макроскопик майдон кучланганлиги E нинг қандай қийматида P қутбланганлик 200 мкКл/м² қийматга етишади.
- 6.30. Кучланганлиги $E_0=5$ МВ/м бўлган ташқи электрик майдонга жойлаштирилган шишанинг қутбланганлиги P аниқлансин.
- 6.31. Кучланганлиги $E_0=20$ кВ/м бўлган ташқи электрик майдонга жойлаштирилганда ундаги ўртача макроскопик майдон кучланганлиги $E=4$ кВ/м чиққан бўлса, диэлектрикнинг қутбланганлиги P нимага тенг бўлади?
- 6.32. Суюқ азотнинг диэлектрик сингдирувчанлиги $\epsilon=1,445$, зичлиги $\rho=804$ кг/м³ бўлса, азот молекулаларининг қутбланувчанлиги α аниқлансин.
- 6.33. Водород молекуласининг қутбланувчанлиги α ни $1,0 \cdot 10^{-29}$ м³ га тенг деб қабул қилиш мумкин. Водороднинг диэлектрик

- қабул қилувчанлиги χ қуйидаги: 1) нормал шароитларда газсимон; 2) зичлиги $\rho=70,8 \text{ кг/м}^3$ бўлган суюқ ҳолатлар учун аниқлансин.
- 6.34. Газсимон аргоннинг нормал шароитлардаги диэлектрик қабул қилувчанлиги $\chi=5,54 \cdot 10^{-4}$. Суюқ ($\rho_1=1,40 \text{ г/см}^3$) ва қаттиқ ($\rho_2=1,65 \text{ г/см}^3$) аргоннинг диэлектрик сингдирув – чанликлари ϵ_1 ва ϵ_2 аниқлансин.
- 6.35. Тизим эластиксимон кучлар билан боғланган иккита бир хил қийматли ишоралари қарама – қарши $|Q|=0,1 \text{ нКл}$ за – рядлардан ташкил топган. Тизимнинг қайишқоқлик коэф – фициенти $k=1 \text{ мН/м}$ бўлса, унинг қутбланувчанлиги α аниқлансин.
- 6.36. Водород атомининг қутбланувчанлиги α ва нормал шаро – итларда атомар водороднинг диэлектрик сингдирувчанлиги ϵ ҳисоблансин. Электрон орбитасининг радиуси $r=53 \text{ пм}$ деб олинсин.
- 6.37. Нормал шароитларда аргоннинг диэлектрик сингдирув – чанлиги $\epsilon=1,00005$. Аргон атомининг қутбланувчанлиги α аниқлансин.
- 6.38. Ксенон атоми (қутбланувчанлиги $\alpha=5,2 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$) протон – дан $r=1 \text{ нм}$ масофада турибди. Ксенон атомида вужидга келтирилган электрик момент p аниқлансин.
- 6.39. Сув молекуласидан $r=1 \text{ нм}$ масофада турган неон атомида қандай максимал p_{max} электрик момент вужудга келтири – лади? Сув молекуласининг электрик моменти $p=6,2 \cdot 10^{-30} \text{ Кл} \cdot \text{м}$. Неон атомининг қутбланувчанлиги $\alpha=4,7 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3$.
- 6.40. Калий бромид (KBr) кристали молекулаларининг электрон қутбланувчанлиги α_e топилсин. Кристалнинг синдириш кўрсаткичи $n=1,52$, зичлиги эса $\rho=2,75 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
- 6.41. Газсимон кислороднинг нормал шароитлардаги синдириш кўрсаткичи $n=1,000272$. Кислород молекулаларининг элек – трон қутбланувчанлиги α_e аниқлансин.
- 6.42. Суюқ углерод сульфид CS_2 нинг синдириш кўрсаткичи $n=1,62$. Углерод сульфиднинг зичлигини билган ҳолда унинг электрон қутбланувчанлиги α_e аниқлансин.

- 6.43. Аргон атомининг қутбланувчанлиги $p=2,03 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$. Зичлиги $\rho=1,44 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ бўлган суюқ аргоннинг диэлектрик синдирувчанлиги ϵ ва синдириш кўрсаткичи n аниқлансин.
- 6.44. Нормал шароитларда газсимон кислороднинг синдириш кўрсаткичи $n_2=1,000212$ булса суюқ кислороднинг синдириш кўрсаткичи n_1 аниқлансин. Суюқ кислороднинг зичлиги $\rho_1=1,19 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
- 6.45. Нормал шароитда сув буғларининг синдириш кўрсаткичи $n=1,000252$ эканлигини ва сув молекулалари $p=6,1 \cdot 10^{-30} \text{ Кл} \cdot \text{м}$ электрик моментига эга бўлишини билган ҳолда умумий қутбланганликдан (электрон ва йўналтирилган) қанча хиссасини молекулаларнинг электрон қутбланувчанлиги ташкил қилиши аниқлансин.
- 6.46. Ош тузи NaCl кристали молекуласининг ион қутбланувчанлиги α_n аниқлансин. Кристалнинг диэлектрик синдирувчанлиги $\epsilon=5,62$, синдириш кўрсаткичи $n=1,5$, зичлиги эса $\rho=2,17 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
- 6.47. Молекулаларнинг электрик моменти $p=12,7 \cdot 10^{-30} \text{ Кл} \cdot \text{м}$, зичлиги $\rho=5,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ва температураси $t=-53^\circ \text{ С}$ бўлган йодли водород (HI) нинг диэлектрик қабул қилувчанлиги χ топилин.

6.4. Диэлектрикли конденсаторлар

- 6.48. Қопламаларининг юзаси $S=100 \text{ см}^2$, улар орасидаги масофа $0,1 \text{ мм}$ бўлган слюдали ясси конденсаторнинг электрик сизими C аниқлансин.
- 6.49. Ясси конденсатор қопламалари орасидаги масофа $d=1,33$, қопламаларнинг юзаси $S=20 \text{ см}^2$. Конденсатор қопламалари орасидаги бўшлиқда диэлектрикларнинг иккита қатлами бор: қалинлиги $d_1=0,7 \text{ мм}$ ли слюда ва қалинлиги $d_2=0,3 \text{ мм}$ ли эбонит. Конденсаторнинг электрик сизими C аниқлансин.
- 6.50. Ясси конденсаторга, унинг қопламаларига жипслашиб турадиган қилиб қалинлиги $d=1 \text{ см}$ бўлган парафин тахта кири

тилади. Дастлабки сизимни ҳосил қилиш учун қопламалар ораси – даги масофани қанча орттириш керак ?

- 6.51. Ясси конденсаторнинг электрик сизими 1,5 мкФ га тенг. Қопламалар орасидаги масофа $d=5$ мм. Агар пастдаги қопламага $d_1=3$ мм қалинликли эбонит тахтачаси қўйилса, конденсаторнинг электрик сизими C қандай бўлади?
- 6.52. Ясси конденсатор қопламалари орасида зич ёпишиб турган шиша тахтача бор. Конденсатор $U_1=100$ В потенциаллар фарқигача зарядланган. Агар шиша тахтача конденсатордан чиқариб олинса, потенциаллар фарқи U_2 қандай бўлади?
- 6.53. Радиуслари $R_1=2$ см ва $R_2=2,1$ см бўлган иккита концентрик метал сфера сферик конденсаторни ҳосил қилади. Агар сфералар орасидаги соҳа парафин билан тўлдирилган бўлса, конденсаторнинг сизими C аниқлансин.
- 6.54. Конденсатор иккита концентрик сферадан ташкил топган. Ички сферанинг радиуси $R=10$ см , ташқисиники $R_2=10,2$ см. Сфералар орасидаги бўшлиқ парафин билан тўлдирилган. Ички сферага $Q=5$ мкКл заряд берилган. Сфералар орасидаги потенциаллар фарқи U аниқлансин.
- 6.55. Ҳаво конденсатори $U=600$ В потенциаллар фарқигача зарядланиб , кучланиш манбаидан узилгач, унга шундай ўлчамли ва шаклли , лекин диэлектрикли (чинни), зарядланмаган иккита конденсатор параллел уланди. Агар иккинчи конденсатор улангандан кейин потенциаллар фарқи $U_1=100$ В гача камайган бўлса, чиннининг диэлектрик сингдирувчанлиги ϵ аниқлансин.

7 — БОБ

Қаттиқ жисмларнинг магнитик хоссалари

Атом ядроси атрофида Бор орбиталаридан бири бўйича айланаётган электроннинг ҳаракат миқдори моменти :

$$L_{\text{орб}} = n\hbar, \quad (7.1)$$

унга мос магнитик момент :

$$P_{\text{орб}} = n \frac{e}{2m} \hbar. \quad (7.2)$$

бунда p — Бор орбитаси санаси.

Бу моментларнинг

$$\Gamma_{\text{орб}} = \frac{P_{\text{орб}}}{L_{\text{орб}}} = \frac{e}{2m} \quad (7.3)$$

нисбатини гиромангнитик муносабат дейилади. Бу муносабат ҳар қандай эллиптик орбита учун адолатлидир.

Гиромангнитик тажрибаларнинг кўрсатишича, айрим металлларда (масалан, темирда) магнитик хоссаларни аниқлашда электронлар орбитал ҳаракати эмас, балки электронларнинг спин моментлари асосий аҳамиятга молик.

Спин (электроннинг ўз ўқи атрофида айланиш механик momenti) электрон учун $\frac{\hbar}{2}$ бўлганлиги учун

$$\Gamma_{\text{сп}} = 2\Gamma_{\text{орб}} = \frac{e}{m} \quad (7.4)$$

эканлиги маълум бўлди.

Диамангнитизм хоссалари электроннинг орбитал ҳаракатига магнитик майдон таъсиридан келтириб чиқарилади. Электрон H магнитик майдон йўналиши атрофида ҳам

$$\omega_L = - eH/2m^* \quad (7.5)$$

такрорийлик билан айланади (ω_L — Лармор такрорийлиги). Бунинг оқибатидаги диамангнетик модда магнитик майдонга қарши магнитланишга эга бўлиб қолади. Диамангнитик магнитланиш momenti \vec{M}_d (бирлик ҳажмга туғри келган momenti) :

$$\vec{M}_d = +\chi_d \vec{H} \quad (7.6)$$

ифодага эга, бундаги χ_d диамангнитик қабулчанлик :

$$\chi_d = - \frac{zn_0 e^2 \bar{r}^2}{6mc^2} \quad (7.7)$$

z — атомдаги электронлар сони, $n_0 = N_A \rho / \mu$ — бирлик ҳажмдаги атомлар (молекулалар) сони, e ва m — электрон заряди ва массаси, \bar{r}^2 — ядродан электронларгача масофа квадрати ўртачаси, c — ёруғлик тезлиги.

χ_d — қабулчанлик T га, N га боғлиқмас, фақат элементнинг z са — насига пропорционал.

Агар атом ёки молекуланинг тўла магнитик моменти ташқи магнитик майдон йўқлигида ҳам бор ва ўзгармас бўлса, бу ҳолда магнитик майдон таъсирида атомлар ёки молекулалар магнитик моментлари майдон йўналиши томон бурилади. Бунинг оқибатида магнитик майдон бўйича йўналган натижавий магнитланиш мо — менти вужудга келади:

$$\vec{M}_{\text{пар}} = \chi_{\text{пар}} \vec{H}, \quad (7.8)$$

бундаги парамагнитик қабулчанлик $\chi_{\text{пар}}$ қуйидагича ифодаланади:

$$\chi_{\text{пар}} = \frac{n_0 p_{\text{AT}}^2}{3k} \frac{1}{T} = \frac{C}{T}. \quad (7.9)$$

Бу ифодада p_{AT} — атомнинг доимий магнитик моменти, бошқа

белгилар одатдаги. (7.9) қонунни Кюри қонуни. $C = \frac{n_0 p_{\text{AT}}^2}{3k}$ ни

Кюри доимийси дейилади.

Ўтказувчанлик электронлари магнитик хоссаларига эгадир. Бир томондан, магнитик майдон эркин электронлар ҳаракати йў — лини эгрилайди, уларни майдон йўналиши ўқи атрофидаги вин — тсимон чизиқ бўйлаб ҳаракатланишига мажбур қилади. Бу диа — магнитик ходисадир. Иккинчи томондан, электрон спин магнитик моментга эга бўлганлиги туфайли магнитик майдон йўналиши то — мон бурилади (ориентирланади). Бу парамагнитик ҳодисадир.

Металда парамагнитик қабулчанлик диамагнитик қабулчанликдан 3 марта катта: $\chi_{\text{пар}} = 3 \cdot |\chi_d|$. Ҳисоблардан ўтка — зувчанлик электронлари парамагнитик қабулчанлиги:

$$\chi_{\text{мэ}} = \frac{n_0 p_{\text{э}}^2}{E_{\text{F}}}. \quad (7.10)$$

бўлишлиги маълум, бунда $p_{\text{э}}$ — эркин электрон магнитик момен — ти, n — уларнинг зичлиги.

Металларда n ва E_{F} катталиклар температурага деярли боғлиқмас, демак, бундай моддаларда $\chi_{\text{мэ}}$ қабулчанлик темпера — турага боғлиқ эмас деб ҳисоблаш мумкин. Аммо яримўтказгич

ларда p зичлик температурага кучли боғлиқ бўлганлигидан $\chi_{\text{пз}}$ температурага боғлиқ бўлади.

Диамангнетик ва парамангнетикларда магнитик индукция \vec{B} ташқи майдон билан қуйидагича боғланган:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad \vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M}. \quad (7.11)$$

μ_0 — магнитик доимий, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Булардан магнитик сингдирувчанлик

$$\mu = 1 + 4\pi\chi. \quad (7.12)$$

Диамангнетиклар учун $\mu < 1$, парамангнетиклар учун $\mu > 1$.

Магнитик резонанс ҳодисалари

1. Электрон B индукцияли магнитик майдонда :

$$\omega = eB/m^*. \quad (7.13)$$

такрорийликда B майдонга тик текисликда айланади, ω — циклотрон такрорийлиги, m^* — электроннинг кристалдаги массаси. Агар B магнитик майдон мавжуд бўлган намунадан электрик вектори B га тик текисликда ўзгарувчи $\omega_0 = \omega$ такрорийликли электромагнитик нуруланиш ўтказилса, у кучли ютилади (циклотрон ёки диамангнетик резонанс).

2. Парамангнитик хоссаларга эга бўлган моддаларда магнитик майдон таъсирида электронларнинг энергетик ҳолатлари спинларнинг икки қарама — қарши йўналишларига мос келадиган сатҳларга ажралади. $\hbar\omega_{\phi}$ энергияси шу сатҳлар энергиялари $2\mu_B H$ фарқига тенг бўлган фотонлар оқимида иборат ёруглик ўтказилганда у намунада кучли даражада ютилади (электрон — парамангнитик резонанс — ЭПР). бунда μ_B — Бор магнетони. ЭПР шарги:

$$\omega_{\phi} = \frac{2\mu_B H}{\hbar}. \quad (7.14)$$

3. Атомлар ядролари ҳам магнитик моментларга эга бўлиш — лиги маълум, ядро магнитик моментининг ташқи майдон магнитик индукция вектори йўналишига проекцияси :

$$\mu_z = g\mu_N m_i. \quad (7.15)$$

бўлади, бунда g — Ланде омили, $\mu_{\text{я}}$ — ядро магнетони, m_i — ядронинг спин магнитик квант сони, $m_i = 1, 1-1, \dots, -1$.

Ташқи магнитик майдон таъсирида ядронинг парчаланган энергетик ҳолатлари орасида ўтишларни таъминлайдиган электромагнитик нурланиш ўтказилганда у кучли ютилади, яъни ядро — магнитик резонанс — ЯМР — ходисаси юз беради.

Бу ходисалардан моддаларнинг тузилиши ва хоссаларини урганишда фойдаланилади.

Протон учун гиромангнитик нисбат :

$$\Gamma_p = \gamma = \frac{g\mu_{\text{я}}}{\hbar}, \quad (7.16)$$

бунда, масалан, протон учун, $g=5,52$, $\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p}$

Ферромагнитик моддалар магнитик нуқта назардан кучли хоссаи бўлиб, улар ҳатто кучсиз магнитик майдон таъсирида ҳам кучли даражада магнитланиши мумкин. Улар учун магнитик сингдирувчанлик $\mu = \mu(H)$.

Ферромагнитик моддалар ҳар бири ўзига хос юқори температурада (T_C Кюри нуқтаси) парамагнетик ҳолатга ўтади.

Бунда

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}, \quad (7.17)$$

Кристалларда ферромагнитизм бўлишлиги шарт :

$$\frac{d}{2R} > 1,5, \quad (7.18)$$

бунда d — панжара доимийси, R — мувозанатланмаган спинли электроннинг орбитаси радиуси.

Масалалар

- 7.1. Эркин электрон учун гиромангнитик нисбат аниқлансин.
- 7.2. Эркин электрон ўзгармас магнитик майдонда ($B=1$ Тл) ўтаётган электромагнитик нурланиш энергиясини ютиши учун унинг тақрорийлиги қандай бўлиши керак?

- 7.3. Электрон — парамагнитик резонанс такрорийлигининг (айни магнит майдон индукцияси B бир хил бўлганда циклотрон резонанс такрорийлигига нисбати аниқлансин.
- 7.4. Электрон — парамагнитик резонансни кузатиш учун мулжалланган спектрометрлар диапазонларидан бирида қайд қилинган $\nu=9.9$ ГГц такрорийликка эга. Эркин электронларнинг радио такрорийликли майдон энергиясини резонанс равишда ютиши рўй бериши учун майдоннинг магнитик индукцияси B қандай бўлади?
- 7.5. Эркин протон учун гиромангнитик нисбат аниқлансин.
- 7.6. Ўзгармас магнитик майдонда ($B=1$ Тл) эркин протон бор. Протоннинг энергияни резонанс ютиши учун ўтаётган электромагнитик нурланишнинг такрорийлиги $\nu_{рез}$ қандай бўлиши керак? $g=5,53$ га тенг.
- 7.7. Магнитик резонанс усули билан асосий ҳолатдаги ^{25}Mg атомларининг магнитик хоссаларини ўрганиш бўйича ўтказилган тажрибаларда майдоннинг магнитик индукцияси $B=0,54$ Тл ва ўтаётган электромагнитик нурланиш такрорийлиги $\nu=1,4$ МГц бўлганда энергиянинг резонанс ютилиши аниқлансин. Ядронинг g омили аниқлансин.
- 7.8. Магнитик резонанс усули билан нейтроннинг магнитик моменти аниқланмоқда. Резонанс ютилиш магнитик майдон индукцияси $B=0,682$ Тл ва ўтаётган электромагнитик нурланиш такрорийлиги $\nu_{рез}=19,9$ МГц бўлганда кузатилади. Нейтроннинг ядровий g омили ва магнитик моменти μ_M ҳисоблансин. Спин механик ва магнитик моментларининг йўналишлари қарама — қарши. Нейтроннинг спини $I=1/2$.
- 7.9. Асосий ҳолатдаги ND молекуласи учун ядро магнитик резонанси кузатилади: 1) протон учун ($I=1/2$) ўзгармас магнитик майдонда ($B=94$ мТл) ўтаётган электромагнитик нурланишнинг такрорийлиги $\nu_{рез}=4$ МГц ; 2) дейтон учун ($I=1$) мос равишда $B=0,37$ Тл, $\nu_{рез}=2,42$ МГц . Протон ва дейтоннинг g — омиллари, магнитик моментлари μ_p ва μ_n аниқлансин (μ_N бирликларда).

- 7.10. Ўзгармас майдоннинг магнитик индукцияси $B=2,35$ Тл бўлса, ўтаётган электромагнитик нурланишнинг қандай такрорийлигида 9F ($I=1/2$, $\mu=2,63\mu_B$) ядроларининг ЯМРи кузатилади?
- 7.11. Литий Li ядролари ($I=3/2$, $g=2,18$) бир жинсли магнитик майдонда ($B=2$ Тл) жойлашган. Атроф мухитнинг температураси $T=80$ К. Мумкин бўлган энергетик сатҳлардан ҳар бирининг бандлигининг энг кичик энергияли сатҳнинг бандлигига нисбати топилсин.
- 7.12. Агар ҳар бир атомнинг магнитик моменти Бор магетонига ва уларнинг зичлиги $6 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ га тенг бўлса, жисмнинг тўйиниш ҳолатида магнитланиши ҳисоблансин.
- 7.13. Манганнынг магнитик қабулчанлиги $1,21 \cdot 10^{-4}$ га тенг. Магнитик майдон кучланганлиги 10^5 А/м бўлганда манганнынг магнитланиши ҳисоблансин. Манган зичлиги $7,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
- 7.14. Алюминий учун грам – атом магнитик қабулчанлиги $1,65 \cdot 10^{-5}$ г/атом га тенг булса унинг магнитик сингдирув – чаплиги ва магнитик қабулчанлиги аниқлансин.
- 7.15. Мисдаги магнитик майдон кучланганлиги 10^6 А/м. Агар унинг магнитик қабулчанлиги $\chi = -0,82 \cdot 10^{-6}$ бўлса, магнитик индукция ва магнитланиш аниқлансин.
- 7.16. Ҳажми 10^{-5} м^3 бўлган тўғри бурчакли ферромагнетик па – мунаси кучланганлиги 800 А/м бўлган магнитик майдонда $0,8 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ магнитик моментта эга бўлган бўлса, унинг магнитик сингдирувчанлиги қанақа?
- 7.17. Агар тўйинган темирнинг магнитланиши $1,84 \cdot 10^5$ А/м га тенг бўлса, унинг битта атомига тўғри келган. Бор магнетонининг ўртача қиймати ҳисоблансин.
- 7.18. Миснинг зичлиги $8,93 \text{ кг/м}^3$. Унда электронларнинг ядродан ўртача узоқлиги $2 \cdot 10^{-10}$ м, $z=1$. Миснинг диамагнитик қабулчанлиги аниқлансин.
- 7.19. Платинанинг магнитик сингдиручанлиги $1,000360$ га тенг. Унинг магнитик қабулчанлигини топинг.
- 7.20. Кристал панжараси доимийси $5 \cdot 10^{-10}$ м. Спيني мувазанат – ланмаган электроннинг орбитаси диаметри $3 \cdot 10^{-10}$ м бўлса, бу кристал ферромагнитик бўла оладими? Агар орбита диаметри $6 \cdot 10^{-10}$ м бўлса – чи?

- 7.21. Агар парамагнетик модда атомининг дсимий магнитик моменти $\mu_{\text{ЛГ}}=7,7 \cdot 10^{-27}$ Жм/А, атомлар зичлиги $n_0=6 \cdot 10^{28}$ м⁻³ бўлса, унинг Кюри доимийси нимага тенг?
- 7.22. Ҳўтакувчанлик электронлари зичлиги $n=4 \cdot 10^{28}$ м⁻³, бир электроннинг магнитик моменти μ_B бўлса, у ҳолда парамагнитик қабулчанлик нимага тенг бўлади? $E_F = 3,5$ эВ.

Ж а в о б л а р

- 1.1. 1; 4; 2.
- 1.2 $\pi/6$; $\sqrt{2} \cdot \pi/6$; $\sqrt{3} \cdot \pi/8$ ёки 0,523; 0,737; 0,68.
- 1.3. NaCl кристаллида г қиррали куб молекуланинг ярмисини ўз ичига олади. бинобарин, N молекулали кристал ҳажми $V=2N\tau^3$ (1.2) ва (1.3) ифодаларнинг мувозанат шароитидаги қийматларидан фойдаланиб п топилади. $p \approx 9,4$.
- 1.4. $U(r_0) = - (N\Lambda e^2/r_0) \cdot (1 - 1/n)$
- 1.5. Икки ион оралиги $r_{ij} = \alpha_{ij} r = p r$. Энг яқин ионлар оралиги учун $p = 1$. Чап ва ўнг қўшнилар ҳисобга олинади. $A = 2 \ln 2$.
- 1.6. $2,1 \cdot 10^{28}$
- 1.7. $0,316 \cdot 10^{-9}$ м; $0,274 \cdot 10^{-9}$ м
- 1.8. $0,37 \cdot 10^3$ кг/м³
- 1.9. 0,32 нм; 0,521 нм.
- 1.10. $0,207 \cdot 10^3$ кг/м³
- 1.11. $\approx 1,5 \cdot 10^{12}$ м⁻³
- 1.12. $\approx 2,6$ эВ.
- 1.13. 0,173 нм.
- 1.14. 45°
- 1.15. $\cos \varphi \approx 0,78$, $\varphi = \arccos 0,78 \approx 35^\circ$
- 1.16. $b_i = 2\pi/a_i$, $b_1 = b_2 = b_3 = 2\pi/a$ (i=1,2,3)
- 1.17. $0\theta \approx 18^\circ$
- 1.18. $\lambda \approx 0,566$ нм.
- 1.19. Шотки вакансияси учун $N_V \cdot 100\% / N = 100\% \cdot \exp(-U_{\text{ш}}/kT) \approx 10^{-11} \cdot 100\% = 10^{-9}\%$

- 2.1 $1,12 \text{ М} \cdot \text{Ж} \cdot \text{К}^{-1}$
- 2.2 $c_{\text{СН}} = 390 \text{ Ж/кг} \cdot \text{К}$; $c_{\text{Fe}} = 450 \text{ Ж/кг} \cdot \text{К}$; $c_{\text{Al}} = 930 \text{ Ж/кг} \cdot \text{К}$
- 2.3 $\mu = 108 \text{ кг/К} \cdot \text{мол}$, демак, бу шарча кумуздан ясалган.
- 2.4 $c_{\text{Al}} / c_{\text{Pt}} = 7,22$.
- 2.5 66° га
- 2.6. $E = 2,056 \text{ кЖ}$; $c = 8,57 \text{ Ж/К}$
- 2.7 $E = 0,124 \text{ МЖ}$; $c = 414 \text{ Ж/К}$.
- 2.8. Йўқ, бажарилмайди.
- 2.9. $861 \text{ Ж/К} \cdot \text{кг}$; $681 \text{ Ж/К} \cdot \text{кг}$
- 2.10. 97 м/с
- 2.11. θ_{Δ} тебранишларнинг максимал такрорийлиги орқали аниқланади: $\theta_{\Delta} = h\omega_{\text{ин}}/k$, у иссиқлик сифимининг классик қошуни ҳақли бўладиган ва ҳақли бўлмайдиган температу – ралар соҳасини чегаралайди.
- 2.12.
$$E_{\text{ак}} = 3RT \left(\frac{T}{\theta_{\text{B}}} \right)^3 \theta_{\text{B}} \int_0^T \frac{x^3 dx}{e^x - 1}$$
- 2.13. $E_0 = 3 \text{ кЖ}$.
- 2.14. $\omega_{\text{макс}} = 2,36 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$.
- 2.15. $\omega_{\text{макс}} = 3,16 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$.
- 2.16. $0,53 \cdot 10^{-2}$
- 2.17. $(2 - 10)$ ифодадан фойдаланинг. $\theta_{\Delta} \approx 215 \text{ К}$.
- 2.18. Нисбий хатолик $2,7$ марта.
- 2.19. $C_{\mu} = 43,2R(T/\theta_{\Delta})^2$
- 2.20. $C_{\mu} = \pi^2 R(T/\theta_{\Delta})$
- 2.21. $3,95 \cdot 10^{-21} \text{ Ж}$
- 2.22. $R_{\Phi} = 10^{-25} \text{ Н} \cdot \text{с}$
- 2.23. $v = 1,5 \text{ км/с}$
- 2.24. $\lambda = 4,8 \text{ нм}$
- 2.25. $v = 4,3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$
- 2.26. Энг қисқа тулқин узунлик $\lambda_{\text{мин}} = 2d$ бўлишлиги эътиборга олинсин. $v = 0,35 \cdot 10^4 \text{ м/с}$.

2.27 46 Мпа.

2.281,35 · 10⁻¹ кал/кг · К

2.2992 кал/кг · К

2,30 ≈ 10,4 $\overset{\circ}{\text{A}}$

$$2.31 t_x = \frac{\chi_1 t_1 d_2 + \chi_2 t_2 d_1}{\chi_1 d_2 + \chi_2 d_1} = 34,5^\circ \text{C.}$$

2,32 $\chi = 1,28 \text{ Ж/м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}$

2,33 = 1,9 · 10⁵ Ж.

2.34 1) 2 кал/с 2) 60 г.

2,35 11,7 Ж.

2.36 106° С.

2,37 28,4 соат ўтнач

2,38 21360 ккал.

2.39 0,36° С.

2.40 28,5 кал/м · с · К

$$2.41 Q = \frac{2\pi\chi t(T_2 - T_1)\ell}{\ln(d_1/d_2)} = 2 \cdot 10^5 \text{ ккал.}$$

2.42 1030 ккал.

2.43 12000

2.44 Қора куя қатламининг температураси 400 — 200° С ; темир деворники 200 — 195° С; қуйқаниннг температураси 195 — 183° С.

$$2.45 \bar{\ell}_\phi = 1,47 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

2.46 1,6 кал/ м · с · К

2.47 3,9 нм.

2.484,1.

2.49 (2-21) тенгламани $\Delta T = T \frac{\Delta P(V_C - V_K)}{Q_0}$ кўринишда ёзамиз.

Энтропия ўзгариши $\Delta S = \nu q_0 / T$, бунда ν — киломоляр сони.

Демак,
$$\Delta T = T \frac{\Delta P(V_C - V_K)v}{\Delta S}$$
 Сув учун

$V_C = \mu / \rho_C = 18 / 1000 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $V_K = \mu / \rho_K = 18 / 900 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$. $v = 2$.
 Масалада берилган маълумот асосида $\Delta T = 0,18^\circ$.

2.50. $\Delta S = 15,8 \cdot 10^3 \text{ Ж/К}$.

2.51. $\Delta V = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кмол}$

2.52. $0,147 \text{ м}$; $-0,105 \text{ м}$.

2.53. $T_x = 1164 \text{ К}$, $\Delta T = 891$.

2.54. $21,3^\circ \text{ С}$.

2.55. Тўртбурчак пўлат варақ томонларини a ва b деб белги – ласак, уларнинг 0°С даги қийматлари a_0 ва b_0 , $s_0 = a_0 \cdot b_0$ бўлсин. Бу ҳолда $a = a_0(1 + \alpha \Delta t)$, $b = b_0(1 + \alpha \Delta t)$, $s = s_0(1 + 2\alpha \Delta t)$ бундан : $\Delta s = s_0 2\alpha \Delta t = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

2.56. $0,59 \text{ м}^3$.

2.57. $\Delta \ell = 2,5 \text{ мм} \gg 0,01 \text{ мм}$,демак, иссиқликдан диаметр узай – ганини пайқаш мумкин.

2.58. а) 420° С ; б) 140° С .

2.59. 16 с га

2.60. $\omega = \omega_0 [1 + \alpha t]^2$; кинетик энергия $\approx J_0 \omega_0^2 \alpha t$ миқдорга кама – ядди.

2.61. $\Delta S = 36,6 \text{ Ж / кг} \cdot \text{град} = 8,7 \text{ кал / кг} \cdot \text{град}$.

3.1. $1,5 \text{ мм}$, $0,75 \cdot 10^{-3}$

3.2. 6 Н

3.3. 5 та

3.4. 10^{-14} м .

3.5. 3 мм

3.6. $U = - \frac{dy}{dt} = - (dy/dx) \cdot (dx/dt) = - \epsilon \cdot c$

3.7. 5 км/ с .

3.8. $3,12 \text{ км/ с}$.

3.9. Ортади.

3.10. $v = 0,5$.

- 3.11. 177 м.
- 3.12. $4,3 \cdot 10^6$ Па.
- 3.13. $82,5 \text{ с}^{-1}$.
- 3.14. 0,32 см.
- 3.15. 2,7 см.
- 3.16. $\Delta d = 3,3 \cdot 10^{-5}$ см
- 3.17. $\Delta V = 8 \text{ мм}^3$.
- 3.18. $\Delta S = 0,28 \text{ см}^2$.
- 3.19. $2,5^\circ$.
- 3.20. $2,5 \cdot 10^{-9}$ Н.
- 3.21. $6,75 \cdot 10^{-21}$ Ж.
- 3.22. $\beta = 60$ Н/м.
- 3.23. $\alpha = 5 \cdot 10^{-44} \gamma \text{ Па}^{-1} \text{ К}^{-1}$
- 3.24. $\gamma = 9,4 \cdot 10^{38}$ Па
- 3.25. $75^\circ 30'$
- 3.26. 0,706 Ж.
- 3.27. $0,32 \cdot 10^{-3}$
- 3.28. $2,26 \cdot 10^{-7}$ Пм
- 3.29. 1 мм^3 га

- 4.1. $\rho = 1 \text{ т / е} = 2,3 \text{ г см с}^{-1}$.
- 4.2. 240 йил.
- 4.3. 15 Кл.
- 4.4. $0,346 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$.
- 4.5. $3,1 \cdot 10^{-3}$ м/с.
- 4.6. $0,1 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ м}^2$.
- 4.7. $4,8 \cdot 10^9 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$
- 4.8. 11,26 Ом
- 4.9. 144 кал
- 4.10. 2,5 м.
- 4.11. 40° .

4.12. $\alpha = 0,00464 \text{ град}^{-1}$.

4.13. $4,57 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$.

4.14. 0,9.

4.15. 1 та электрон.

4.16. 2,17.

4.17. 1) 0,893 ва 0,119 ; 2) 0,999965 ва $4,5 \cdot 10^{-5}$

4.18. 4,2 эВ.

4.19. 1,83 марта

4.20. 0,03

4.21. 24,8 кК.

4.22. $dn(p) = \frac{1}{\pi^2 \hbar^2} p^2 dp$

4.23. $dn(v) = \frac{m^3}{\pi^2 \hbar^3} v^2 dv$

4.24. $1,86 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

4.25. $\approx 11 \text{ эВ}$.

4.26. $- 1,38 \text{ кТ}$ ва $+1,38 \text{ кТ}$.

4.27. 0,6.

4.28. $\approx 1,14$ марта камаяди.

4.29. $\approx 11,4$ марта камаяди.

4.30. 1280 Ж.

4.31. —

4.32. —

4.33. $\bar{V} = 0,75 \cdot v_{\max}$

4.34. $v_{\text{кв}} = 0,7775 \cdot v_{\max}$

4.35. Босим $p = \frac{\partial}{\partial V} (N \bar{E}_{\text{эл}}) = \frac{(3\pi^2)^{\frac{2}{3}} \hbar^2}{5m} n^{\frac{5}{3}} = 3,8 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

4.35. $r_0 = 1,30 \text{ \AA}$

$$4.37. \quad \mathbf{B} = \left(\frac{1}{12\pi r} \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}_{\text{эн}}}{\partial r^2} \right)_{r=r_0}$$

$$4.38. \quad v_T = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \frac{m}{15M} \left(\frac{1}{mr_0} \right)^2 \left(\frac{9}{4\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{бунда} \quad \rho = \frac{3M}{4\pi r_0^3}$$

Ферми сатҳига мос тезлик $v_T = \sqrt{\frac{m}{15M}} v_F$. Литий метали учун

($E_F = 5,22$ эВ) $v_T = 3 \cdot 10^3$ м/с.

- 4.39. 0,8 % (4.11) ифодадан фойдаланинг.
- 4.40. 13 % (2.18) ва (4.11) ифодалардан фойдаланинг.
- 4.41. ≈ 5 К. (2.18) ва (4.11) ифодалардан фойдаланинг.
- 4.42. $106 \text{ Ж} \cdot \text{м}^{-3} \text{К}$
- 4.43. 100 .
- 4.44. $2 \cdot 10^{-2} \text{ Ж/м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}$.
- 4.45. 0,13 А
- 4.46. 3,46 эВ.
- 4.47. ≈ 1720 К.
- 4.48. $\approx 10^{14}$
- 4.49. $\approx 0,35 \cdot 10^4 \text{ А/ м}^2$.
- 4.50. $2,63 \cdot 10^{-21} \text{ Ж}$.
- 4.51. 1880 В.
- 4.52. 0,96 эВ.
- 4.53. 3,1 эВ.
- 4.54. 0,15 А.
- 4.55. а) $E_1 = 3,76$ эВ, $E_2 = 4,96$ эВ ; б) $E_3 = 2,11$ эВ в) $E_4 = 1,93$ эВ.
- 4.56. $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Ж} \cdot \text{с}$.
- 4.57. $0,76 \cdot 10^6 \text{ м/с}$.
- 4.58. 1,62 эВ.
- 4.59. $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Ж} \cdot \text{с}$.

4.60. $0,5 \text{ эВ} = 0,8 \cdot 10^{-19} \text{ Ж}$.

4.61. $0,5 \text{ В}$.

4.62. $1,5 \text{ В}$.

4.63. $2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Ж}$.

5.1. Хусусий яримўтказгичда электронлар ва коваклар зичлиги n_i ифодасидан фойдаланамиз ва $n(300) / n(200) = 3,6 \cdot 10^3$ натижа оламиз.

5.2. $m^*_n m^*_p / m_0^2 = 0,21$

5.3. $n_i(\text{Si}) \approx 10^{16} \text{ м}^{-3}$

5.4. $n_i(\text{Ge}) \approx 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

5.5. $E_{g0} = 0,26 \text{ эВ}$

5.6. $N_C = 5,4 \cdot 10^{21} \text{ Т}^{3/2} \text{ м}^{-3}$; $N_C(300\text{К}) = 2,8 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$,
 $N_C(100\text{К}) = 5,4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $N_C(30\text{К}) = 8,86 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

5.7. $E_F = 0,0034 \text{ эВ}$ (метал учун ифода асосида), $E_F = 0,0177 \text{ эВ}$ (оралик айниш ҳоли учун тақрибий ифода асосида)

5.8. $E_F = -0,205 \text{ эВ}$

5.9. Бу ҳолда юқори температуралар (киришманинг тўла ионланиш) соҳаси мавжуд: $8(N_A / N_V) \exp(E_A / kT) \ll 1$. Шунинг учун ҳам $p_0 = N_A = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ бўлади.

5.10. Бу паст температуралар соҳасида ушбу ифода ўринли $n_0 = ((N_d - N_a) / 2N_a) N_c \exp(E_d / kT)$. Хисоб натижаси: $n_0 = 3,8 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$.

5.11. Аниқланаётган соҳанинг пастки чегараси $(N_d - N_a / 2N_a) N_c(T_1) \exp(-E_d / kT_1) = N_d - N_a$ шартдан аниқланади: $T_1 = (E_d / k) \cdot \ln[N_c(T_1) / 2N_a]$. Юқориги чегара электронлар хусусий температураси орқали топилади: $n = N_d - N_a = N_c \exp(-E_g / kT_2)$ шартдан: $T_2 = (E_{g0} / 2k) \cdot \{ \ln[N_c(T_2) / (N_d - N_a)] + \xi / 2k \}^{-1}$. Тақрибий ҳисоблашлар натижаси: $T_1 \approx 225 \text{ К}$, $T_2 \approx 700 \text{ К}$.

5.12. $T_X = 80 \text{ К}$. Бу масалани ечишда (5.15) ифодадан фойдаланиш мумкин.

5.13. $n_I = N_{c1} \exp(E_F / kT)$, $n_{II} = N_{c2} \exp(E_F - \Delta E / kT)$ ифодалар асосида $n_{II}(300) / n_I(300) = 0,9 \cdot 10^{-4}$; $n_{II}(1000) / n_I(1000) = 1$

5.14. Бу масала 5.11. – масалага ўхшаш йўл билан ечилади. Ҳосил бўладиган трансцендент тенгламаларни ҳисоблаш машинаси ёрдамида ечиш маъқул. Ечим: $T_1=149$ К, $T_2=316$ К.

5.15. $\sigma_i(\text{Si})=0,312 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; $\rho_i(\text{Si})=3,2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

5.16. $\sigma_i(\text{Ge})=2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; $\rho_i(\text{Ge})=0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

5.17. $\sigma(1000\text{K}) / \sigma(300\text{K}) \approx 0,5$

5.18. $\rho_{30}(\text{Ge})=1,2 \cdot 10^{59} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

5.19. Коваклар зичлиги ўзгармайдиган температуралар оралиғида $p=N_a$, $\rho=1/er\mu_p=0,62 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

5.20. $n_i(400\text{K}) / n_i(300\text{K}) \approx 0,53 \cdot 10^3$, $\sigma_i(400\text{K}) / \sigma_i(300\text{K}) \approx 0,345 \cdot 10^3$

5.21. $E_F=-0,5176 \text{ эВ}$

5.22. $T(n_0=N_d)=309 \text{ К}$. ($T=2E_d/3k$)

5.23. $\sigma_n/\sigma_i = eN_d\mu_n / en_i(\mu_n+\mu_p)=9,04 \cdot 10^3$

5.24. Бу ҳолда Ферми E_F сатҳи тақиқланган зона ичкарисида (ўрта қисмида) жойлашган. Шунинг учун ўтказувчанлик зонасидаги электронлар зичлиги $n=N_C \exp(E_F/kT)$, Сурманинг нейтрал атомлари зичлиги $N_{Sb}^0=n_d=2N_{Sb} \exp(E_d+E_F/kT)$. Бу ифодадан $N_{Sb}^0/n = n_d/n = 2AN_{Sb}/N_C$, бу ерда $A=\exp(E_d/kT)/N_C$, $T=300 \text{ К}$ учун: $N_{Sb}^0/n=2,14 \cdot 10^{-3}$.

5.25. (5.20) ифодадан p_a топилади, у ионланмаган акцепторлар зичлигини беради, N_a-p_a эса ионланган акцептор атомлар зичлигини беради. Қидирилган жавоб: $(N_a-p_a)/p_a=18$.

5.26. $\Delta n(t) = \Delta n(0) \exp(-t/\tau)$ ифодадан фойдаланиб, $\tau=4 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ бўлишлиги аниқланади.

5.27. Стационар (доимий ёритиш) ҳолатда генерация билан рекомбинация тезликлари бир бирига тенг, яъни $R_n=g_n$ ёки $\Delta n/\tau=\alpha q$. Бундан: $\Delta n=\alpha q \tau=10^{20} \text{ м}^{-3}$. $\Delta \sigma/\sigma_0 = \Delta n(\mu_n+\mu_p)/n_0\mu_n = 0,1(1+\mu_p/\mu_n)$. Германий учун $\mu_p/\mu_n = 1/2,1$ ва $\Delta \sigma/\sigma_0=0,15$.

5.28. (5.29) ифодадан, масала шартларини қўлаб, кучсиз ёритиш ҳоли учун

$$\tau = \frac{1}{\gamma \bar{N}_t} \frac{n_0 + p_0 + n_1 + p_1}{n_0 + p_0} \quad \text{ифода} \quad \text{ҳосил} \quad \text{бўлади. Германия}$$

учун: $n_0 = (p_e \mu_n)^{-1} = 3,3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $p_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $E_t = E_g/2$ шартдан: $n_1 = p_1 = n_i = 8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Бу қийматлар асосида: гутилиш коэффициенти $\gamma \approx 2,9 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Бинобарин $S = \gamma / v_T = 2,5 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$. Бу ерда $v_T = 1,17 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ электронларнинг 300 К да иссиқлик ҳаракати тезлиги.

5.29. $S_p = (\tau N_t v_T)^{-1}$ ифодадан фойдаланиб ва $v_T(200\text{К}) = 0,96 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ эканлигини эътиборга олсак, $S_p = 2,6 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$.

5.30. $\tau = \tau_{p0} = (\gamma_p N_t)^{-1} = (10^{18} \cdot 3 \cdot 10^{-15})^{-1} \text{ с} = (3 \cdot 10^3)^{-1} \approx 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

5.31. $n_1 \approx 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $p_1 \approx 0,5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$

5.32. Бугер – Ламберт қонунинга асосан, $q(d)/q(0) = e^{-5} \approx 0,0068$

5.33. $x_m = 1,5 \text{ см}$

5.34. (5.29) ифодадан султ ёритишда $\tau_0 = (\gamma_p N_t)^{-1} (1 + n_1/n_0)$ ва $\tau = (\gamma_p N_t)^{-1} \cdot [1 + n_1/(n_0 + \Delta n) + \gamma_p \Delta n / \gamma_n (n_0 + \Delta n)]$ келиб чиқади. Бундан $(1 + n_1/n_0) \tau / \tau_0 = (1 + n_1) / (n_0 + \Delta n) + \gamma_p \Delta n / \gamma_n (n_0 + \Delta n)$, $n_1 = N_C \exp(E_t/kT) = 4,710^{21} \text{ м}^{-3}$ бўлганлигдан $n_1/n_0 = 4,66$, $\tau/\tau_0 = 2,35$. Бу қийматларни қўйиб, тенгламадан изланган нисбатни топамиз. $\gamma_p / \gamma_n = s_p/s_n = 89$.

5.35. Бу масала шартига кўра, $\tau_0 = (\gamma_p N_t)^{-1} (1 + \gamma_p n_1 / \gamma_n n_0)$, $\tau_1 = (\gamma_p N_t)^{-1} (1 + \gamma_p (p_1 + \Delta n) / \gamma_n (n_0 + \Delta n))$ Буларга кирган n_0 , p_1 , $\Delta n/n_0$ катталиклар ҳисобланади. Сўнг γ_p / γ_n учун ифода топилади, τ_0/τ_1 нисбат берилган. Топилган қийматлардан фойдаланиб, $\tau_{p0} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, $\tau_{n0} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

5.36. Паст температурада донорлар ҳисобидан акцепторлар электронлар билан тўлган, яъни $N_d = N_a^+ = 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $N_a^0 = 9 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Бу ҳолда N_a^- , $N_a^0 \gg n_0, p_0, n_1, p_1$ N_a^0 ва N_a^+ нейтрал ва зарядли акцепторлар рекомбинация марказлари вазифасини ўтайди. $\tau_n = (\gamma_n N_a^0)^{-1}$, $\tau_p = (\gamma_p N_a^+)^{-1}$, $\Delta n = g \tau_n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $\Delta p = \Delta n (\tau_p / \tau_n) = 9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $\tau_p = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

5.37. $\gamma_n = (\tau_n N_a^0)^{-1} = 1,1 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$, $\gamma_p = \gamma_n (s_p/s_n) = 1,1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$

5.38. Стационар шарситда $\Delta p = g\tau$, $\Delta p_t = \Delta p(\tau_2/\tau_1)$, $\Delta n = \Delta p(1 + \tau_2/\tau_1)$. Узлуксизлик тенгламалари ечими: $\Delta n = A \exp(-k_1 t) + B \exp(-k_2 t)$, $\Delta p = C \exp(-k_1 t) + D \exp(-k_2 t)$ Бу ифодалардаги доимийлар A, B, C, D масала шартлари асосида топилади.

5.39. $\Delta \sigma / \sigma_0 = (\Delta p \mu_p + \Delta n \mu_n) / n_0 \mu_n = 0,046$

5.40. $\Delta p_t / \Delta p$ ифодасида p_0, p_1 ва n_1 ларни эътиборга олинмайди. Бу ҳолда $\Delta p_t / \Delta p = \gamma_p N_{t1} / \gamma_n n_0 = 24$, бундан $\gamma_n = 1,04 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Ре – комбинация марказларининг бошқа зичлигида $\Delta p_t / \Delta p = 0,24$, $\tau_p = (\alpha_p N_{12})^{-1} = 10^{-4} \text{ с}$, $\tau_n = (1 + \Delta p_t / \Delta p) \tau_p = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ с}$

5.41. Германий учун: $D_n = 98 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, $D_p = 46,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$

Кремний учун: $D_n = 37,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, $D_p = 13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$

5.42. Эйнштейн муносабатидан фойдаланиб, $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$ ифодада D_n ни μ_n орқали алмаштирилади. Сўнгра масала маълумотлари асосида қуйидаги натижалар олинади: 1) $L_n = 10^{-3} \text{ м}$, 2) $L_n = 10^{-4} \text{ м}$.

5.43. Бу масалани ечишда $D_n = n \mu_n k T / (e d n / d E_F)$ ифодадан фойдаланилади. Кучли айниш соҳасида n ва E_F орасидаги боғланиш «Металлар» бобида берилган. Бу боғланиш $D_n = (h^2 \mu_n / 3 e m_n^*) (3/8\pi)^{2/3} n^{2/3}$ ифодага олиб келади. Бунга берилган маълумотни қўйсак, $D_n = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

5.44. Бу ҳолда $D = 2kT \mu_n / e(1+b)$ ифодага келинади, ундан $D = 63 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

5.45. $D = 2D_p = 20,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

5.46. $D_p d^2 \Delta p / dx^2 - \Delta p / \tau_p = 0$ диффузион тенглама ечими $\Delta p(x) = \Delta p(0) \exp(-x/L_p)$, бунда $L_p = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Шу ифодадан $\Delta p(x=4 \text{ мм}) = 1,4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

5.47. Олдинги масаладаги $\Delta p(x)$ ифодасидан фойдаланилади: $L_p = 10^{-3} \text{ м}$.

5.48. Бу ҳолда узлуксизлик тенгламаси: $D_p d^2 \Delta p / dx^2 + g_0 - \Delta p / \tau_p = 0$. Чегаравий шартлар: $D_p d \Delta p / dx |_{x=0} = s \Delta p |_{x=0}$, $x \rightarrow \infty$, $\Delta p \rightarrow g_0 \tau_p$. Узлуксизлик тенгламаси ечилиб $\Delta p(x)$ ифодаси топилади. Ундан $\Delta p(0) = 0,88 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

5.49. $L_p = \tau_p (s_1 - s_2 \Delta p_2 / \Delta p_1) / (\Delta p_2 / \Delta p_1 - 1) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.



зичлиги: $j = j_n + j_p = \sigma_0 E - (b-1) 0,5j \cdot \exp(-x/L_p)$ $x=0$ да $(E(0)=2,5 \text{ В/м.})$

5.59. Бу ҳолда узлуксизлик тенгламаси кўриниши :

$$D \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - E \mu \frac{d \Delta p}{dx} - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0, \text{ Кучли электик майдонда :}$$

$\Delta p(x) = \Delta p(0) \exp(-x/L_e)$, $L_e = E \mu \tau_p$. Дрейфга нисбатан диффузияни назарга олмасдан, тула ток зичлиги топилади: $j = e \mu_n (n_0 + \Delta n) E + e \mu_p (n_0 + \Delta n) E$, бундан: $E(0) = E|_{x=0}$ топилади ва қуйидагига қўйилади $j_p|_{x=0} = \xi j = e \mu_p (p_0 + \Delta p) E(0)$, Бундан аввал ξ сўнг $\Delta p(0) = -0,11 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ топилади.

5.60. $j_p(0) = \xi [j_p(0) + j_n(0)]$, $j_p(0) = e D_p \Delta p(0) / L_p$ Бу икки тенглик - дан, масала шартларидан фойдаланиб, изланган катталиқ топилади: $j_n(0) = 16,8 \text{ А/м}^2$

5.61. $\langle \tau_n \rangle \approx 0,41 \cdot 10^{-12} \text{ с.}$

5.62. $\mu_n \approx 0,37 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$

5.63. $\sigma_n = e n \mu_n$ ифода асосида $(\sigma_n)_1 / (\sigma_n)_2 = 1,84$ яъни ўтказувчанлик 1,84 марта камаяди.

5.64. 1,225 марта камаяди ; 1,84 марга ортади.

5.65. $\chi_n = 0,247 \cdot 10^{-4} \text{ кал / мсК}$

5.66. $\chi_n = 0,494 \cdot 10^{-4} \text{ кал / мсК}$

5.67. $j_x = e n_0 \mu_n E_x$, $j_y = e n_0 \mu_n (E_y + E_x \mu_{nH} V) = 0$ (кичик V лар, яъни $\mu V \ll 1$ сохаси). Бу тенгламалардан $R_H = -\mu_{nH} / (e n_0 \mu_n) = -0,738 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{Кл}$ $V_H = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$

5.68. Кучсиз магнитик майдонларда $\text{tg} \theta_x \approx \theta_x = \langle \tau_p^2 \rangle \mu_{nH} V / \langle \tau_p \rangle^2$. Тегишли ифодалар ёрдамида $\langle \tau_p^2 \rangle / \langle \tau_p \rangle^2$ нисбат 1 дан кам фарқ қилишини топса бўлади. Демак, $\text{tg} \theta_x \approx 0,224 \cdot \text{м}^2/\text{В}^{-1} \text{с}^{-1} \cdot 0,1 \text{ Тл} = 0,0224$, $\theta_x \approx 12,8^\circ$.

5.69. $R_n = -1/e n \approx -6,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$

5.70. Масалан, (5.55) ифода $R = -\frac{1}{e} \frac{n m_p^2 - p m_n^2}{(n m_p + p m_n)^2}$ кўриниш

олади.

5.71. $R < 0$ бўлиши учун $(n/p) > (m_n/m_p)^2$ шарт бажарилиши керак. $R=0$, $R > 0$ бўлиш шартларини аниқлаш ҳам осон.

5.72. 100%. $\Delta\rho/\rho = 1,28\%$

5.73. Ток зичлигининг у йўналишдаги ташкил этувчиси нолга тенг: $j_{ny} + j_{py} = 0 = eE(n\mu_n + p\mu_p) + eE_x B(n\mu_n\mu_{nv} - p\mu_p\mu_{pv})$ Бундан E_y ни аниқлаш қийин эмас. Бу ҳолда

$$R_B = \frac{E_y}{\tau_0 E_x B} = \frac{p - nb^2}{(p + nb)^2} \frac{\mu_{pv}}{\mu_p} \frac{1}{e}. \text{ Нейтраллик шarti:}$$

$$p = n + N_a = N_a + n_i^2/p, \text{ бундан: } p = \frac{N_a}{2} + \sqrt{\frac{N_a^2}{4} + n_i^2} = 5,47 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}, n = 0,47 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}. \text{ Демак, } R_B = -1,19 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}.$$

5.74. $R_B = 0$ бўлишлиги магнитик майдонда электронлар ва қонларнинг қарама-қарши томонларга оғдирилишидир.

Топилиши керак коэффициент $\zeta = -\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \left| R_{B0}^2 \tau_0^2 B^2 \right.$ ифодадан аниқланади. Олдинги масалаларни ечиш тажрибасидан

$$\text{фойдаланиб, } \zeta = -\frac{p}{n} \frac{b(1+b)^2}{(p/n - b^2)^2} = 0,95.$$

5.75. Бу ҳолда $g_n = 2$. $\ln N_C/n = -E_F/kT$. Тегишли қийматларни қўйиб, (5.63) ифодадан топамиз: $\alpha_n = 2,057 \cdot 10^{-4}$ В/К.

5.76. $\alpha_{\text{мет}} = 4,12 \cdot 10^{-6}$ В/К; $\alpha_{\text{мет}}/\alpha_n \approx 2 \cdot 10^{-2}$ Демак, металнинг термо ЭЮК я яримўтказгичникидан анча кичик.

5.77. (5.65) ифодадан фойдалансак, $Q_{II} = 0,71 \cdot 10^{-2}$ кал/см²с.

5.78. (5.63) ифодани $T_1 = 200$ К ва $T_2 = 300$ К бўлган ҳолда тадбиқлаб, уларнинг нисбатини оламиз: $\alpha(300\text{К})/\alpha(200\text{К}) = 0,568$.

5.79. $\alpha_{\phi} = 10^{-4}$ В/К Агар товуш тезлигининг паст температурларда янада ориб кетиши, фононларнинг эркин югуриш йўли катталашини ҳисобга олинса, α_{ϕ} яна ҳам катта бўлади.

5.80. $\tau_T = -0,4\text{T}^{-1} = -1,33 \cdot 10^{-3}$ В/К

5.81. $Q = 10^{-2}$ В/Тл·К.

5.82. $\Delta\alpha = k/e|5/2 - \langle\tau_x\rangle/\langle\tau\rangle| = 0,43 \cdot 10^{-4}$ В/К.

- 5.83. $\Delta C = 1,78 \cdot 10^{-3} \text{ } \text{ж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$
- 5.84. $s_{\text{ф}}/s_0 = \Delta n_{\text{см}}/n_i = 0,45$ ёки $(s_{\text{ф}}/s_0) 100\% = 45\%$
- 5.85. $t_n = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}$
- 5.86. $R_n = 8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$
- 5.87. Бу ҳолда $s_1/s_2 = (I_1/I_2)^{1/2}$. Демак, $I_1/I_2 = 16$ бўлиши керак.
- 5.88. $E_D = 4,18 \text{ В/м}$ [(5.81) ифодадан фойдаланинг].
- 5.89. $V_D(\text{Si}) = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ В}$.
- 5.90. $E_{\text{у}}^{\text{ФЭМ}} = 0,233 \text{ В/м}$.
- 5.91. $L(0) = 0,47 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Барча катгаликларни СГС бирликда ифодаланг.
- 5.92. $C(V=0,5 \text{ В}) = 1,7 \cdot 10^4 \text{ см} = 1,9 \text{ пФ}$; $(1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф})$,
 $C(V=-0,5 \text{ В}) = 0,7 \cdot 10^4 \text{ см} = 0,78 \text{ пФ}$;
- 5.93. $j(V=0,26 \text{ В}) = 2 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$, $J/J_0 = 2 \cdot 10^4$. Демак, тўғри ток максимал тескари токдан 4 тартиб катта.
- 5.94. СГС бирликларда ҳисоб қилинса, $L_{p-n}(0) = 0,92 \cdot 10^{-4} \text{ см}$;
 $L_{p-n}(-4,9 \text{ В}) = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}$, $L_{p-n}(-4,9 \text{ В})/L_{p-n}(0) = (8)^{1/2} = 2,82$.
- 5.95. $j_S = 0,96 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$.
- 5.96. $j(V=0,4 \text{ В}) = 0,4 \text{ А/м}^2$.
- 5.97. $\varphi_{p-n}(300 \text{ К}) = 0,60 \text{ эВ}$; $\varphi_{p-n}(200 \text{ К}) = 0,78 \text{ эВ}$.
- 5.98. j_0 ва V берилган (5.92) ифода асосида $j = 53,6 \text{ А/м}^2$. Энди ўша ифодани дифференциаллаб, $p-n$ ўтиш дифференциал қаршилиги топилади: $r_{p-n} = 458 \text{ Ом}$.
- 5.99. (5.96) ифода бўйича ҳисобланг. $C(V) = 46,5 \text{ пФ}$.
- 5.100. Масалада берилган қийматларни (5.97) ифодага қўйсак,
 $C_d = 246 \text{ пФ}$.
- 5.101. $j_1/j_2 = 2070$.
- 5.102. Тўғри ток зичлиги $j_{\text{тўғ}} = j_S e^{12} = 1,62 \cdot 10^5 j_S$, тескари ток зичлиги $j_{\text{тес}} = j_S (e^{-12} - 1) = -j_S$. Демак, $|j_{\text{тўғ}}/j_{\text{тес}}| = 1,62 \cdot 10^5$
- 5.103. $\gamma = 0,999$.
- 5.104. $\beta = 0,995$.
- 5.105. $\alpha = \gamma\beta = 0,955$.
- 5.106. $C_d = 100 \text{ пФ}$.

5.107. $I_K = \alpha I_{\Sigma} + I_{КБО}$ ифодадан фойдаланилади, $I_{КБО}$ – сирқинг токи. Умумий база схемасида $I_{\Sigma} = I_B + I_K$. Бу икки ифодадан: $I_K = [\alpha / (1 - \alpha)] \cdot I_B + [1 / (1 - \alpha)] I_{КБО} = 1,38$ мкА.

5.108. (5.105) ифодадан фойдалансак, $\alpha = 0,907$

6.1. $p = 50$ пКл·м.

6.2. $E_A = 1,08$ кВ/м ; $\varphi_A = 0$; $E_B = 22$ кВ/м; $\varphi_B = 386$ В.

6.3. $E_A = 9,0$ В/м, $\varphi_A = 0$; $E_B = 18$ кВ/м; $\varphi_B = 0,9$ В.

6.4. $E = 47,6$ В/м; $\varphi = 1,8$ В.

6.5. α ўзгарувчан бўлганлиги учун $\varphi = p / 4\pi\epsilon_0 r^2$ формулага $\alpha = \omega t$, $A = p / 4\pi\epsilon_0 r^2$ белгилашларни киритиб $\varphi = A \cos \omega t$ ни ёзиш мумкин. Лекин шартта кўра $t = 0$ да $\varphi = 0$ бўлиши учун $\varphi = A \sin \omega t$ бўлиши керак $A = 90$ В; $\omega \approx 6,28 \cdot 10^3$ с.

6.6. $F = 3p_1 p_2 / 2\pi\epsilon_0 r^4 = 1,35$ мкН.

6.7. $P = p_1 p_2 / 2\pi\epsilon_0 r^3$ нЖ.

6.8. $C = p E \sin \alpha / \alpha = 286$ нНм/рад.

6.9. Кичик бурчаклар учун $\sin \alpha \approx \alpha$ га тенглиги учун. $C = p E \sin \alpha / \alpha = p E = 300$ нНм/рад.

6.10. $P = -p E \cos \alpha = -500$ мкЖ.

6.11. Диполни α бурчакка буришда бажарилган элементар иш $dA = p E \sin \alpha / \alpha$ дан иборат. α_0 дан α гача буришдаги тула иш эса

$$A = \int_{\alpha_0}^{\alpha} p E \sin \alpha / \alpha = p E \int_{\alpha_0}^{\alpha} \sin \alpha / \alpha, \text{ интегралласак } A = -p E (\cos \alpha -$$

$\cos \alpha_0)$, $\alpha_0 = 0, \alpha = 180^\circ$ лиги учун $A = 2pE = 30$ мкЖ.

6.12. $\Delta P = A = pE (\cos \alpha_0 - \cos \alpha)$, чунки иш энергиянинг ўзгариши ҳисобига бажарилади. $\alpha_0 = 0^\circ, \alpha = 60^\circ$ бўлгани сабабли $\Delta P = 0,5$ мкЖ.

6.13. $\omega = (2pE/J)^{1/2} = 60$ рад/с.

6.14. $F = p dE/dx = 0,2$ мН.

6.15. $dE/dr = Q / 2\pi\epsilon_0 r^3 = 1,8$ МВ/м²; $F = Qp / 2\pi\epsilon_0 r^3 = 9$ мкН.

6.16. $dE/dr = \tau / 2\pi\epsilon_0 r^2 = 0,9$ МВ/м; $F = p dE/dr = 3,6$ мкН.

6.17. $Q = 0,695 \cdot 10^{-19}$ Кл, элементар заряд **e** ning қиймати эса $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл., $e/Q = 2,3$, бундай нисбатан катта фарқнинг сабаби.

баби протон яқинидаги электрон булутларини фтор атомининг ядросига томон тўла эмас, балки қисман силжишида.

6.18. $\chi=6$; $\sigma'=\chi\epsilon_0 U/d=47,8$ мкКл/м²

6.19. $\ell=0,212\cdot 10^{-10}$ м.

6.20. $\chi = \alpha\rho Na / M=0,079$.

6.21. $\epsilon - 1/\epsilon+2=\alpha n/3$; $\chi=\alpha n$; $\epsilon - 1/\epsilon+2=\chi/3$ бундан $\epsilon=2\chi+3/3 - \chi=2$.

6.22. $\sigma'=11,8$ мкКл/м².

6.23. $E_{\max}=555$ кВ/м.

6.24. $E_{\max}/E=1,5$.

6.25. $E_{\max}=E_0(\epsilon+r/3\epsilon)$; $E_{\max}/E=\epsilon+r/3\epsilon=1,01$ бундан $\epsilon=1,015$.

6.26. 0,1% ; 25%

6.27. $E=20$ мВ/м

6.28. $P=\chi\epsilon_0 E(1)$, $\chi=\epsilon - 1(2)$, $E_{\max}=E_0 - P/\epsilon_0(3)$. (2) ва (3)ларни (1)га қўйсақ: $P=(\epsilon - 1) \epsilon_0(E_0 - P/\epsilon_0)$ ҳосил бўлади. Бундан $P=E_0\epsilon_0(\epsilon - 1)/\epsilon=5,9$ мкКл/м².

6.29. $E=P/(\epsilon - 1)\epsilon_0 = 11,3$ мВ/м.

6.30. $P=(\epsilon - 1)\epsilon_0 E_0/ \epsilon=37,9$ мкКл/м².

6.31. $P=142$ нКл/м².

6.32. Клаузиус – Мосоттининг $M(\epsilon - 1)/\rho(\epsilon+2)=\alpha N_a/3$ кўринишидаги формуласидан: $\alpha = 3M(\epsilon - 1)/\rho N_a(\epsilon+2) = 2,24\cdot 10^{-29}$ м³.

6.33. 1) $\chi=\alpha n=2,7\cdot 10^{-4}$, 2) $3\rho N_a\alpha/(3M - \rho N_a\alpha)=0,23$.

6.34. $\epsilon=(3M - 2\chi\rho V_{ст})/(3M - \chi\rho V_{ст})$; $\epsilon_1=1,51$, $\epsilon_2=1,61$

6.35. $p=\alpha\epsilon_0 E_{\max}(1)$ шарита кўра $E_{\max}=E+P/3\epsilon_0$; $P=0$ бўлгани учун $E_{\max}=E(2)$ (1) ва (2) лардан: $p=\alpha\epsilon_0 E(3)$, иккинчи томондан тизим – нинг электрик моменти $p=Ql$ (4) ва $F=kl=qQE$; $E=kl/Q$ (5), (4) ва (5) ларни (3)га қўйиб оламиз $\alpha=Q^2/ke_0 = 1,13\text{см}^3$.

6.36. 1) $\alpha=1,87\cdot 10^{-3}$ м³ 2) ϵ нинг қийматини $\epsilon\approx 1+\alpha n$ тақрибий формуладан топиш мумкин. Бунда n – молекулаларнинг концентрацияси нормал шароитларда Лошмидг сонига тенг, яъни $n=2,69\cdot 10^{25}$ м⁻³ ; $\epsilon=1,00005$.

6.37. $\alpha=2\cdot 10^{-29}$ м³.

6.38. $p=\alpha\epsilon/4\pi r^2=5,1\cdot 10^{-31}$ Кл·м.

6.39. $E = \frac{\rho\sqrt{1+3\cos\alpha}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$, бундан: $E_{\max} = \rho/2\pi\epsilon_0 r^3$; $P_{\max} = \alpha\epsilon_0 E_{\max}$;

бундан $P_{\max} = \alpha\rho / 2\pi r^3 = 4,7 \cdot 10^{-33}$ Кл·м.

6.40. Лоренц — Лоренц формуласининг $M(n^2 - 1)/\rho(n^2 + 2) = \alpha_e N_a/3$ куринашидан $\alpha_e = 3M(n^2 - 1)/\rho N_a(n^2 + 2) = 6,65 \cdot 10^{-29}$ м³.

6.41. $\alpha_e = 2,02 \cdot 10^{-29}$ м³.

6.42. $\alpha_e = 1,05 \cdot 10^{-28}$ м³.

6.43. $\epsilon = (1+2\beta)/(1-\beta) = 1,52$; бу ерда $\beta = \alpha\rho N_a/3M$; $n = \epsilon^{1/2} = 1,23$.

6.44. $n_1 = [(1+2\beta)/(1-\beta)]^{1/2}$; бу ерда $\beta = RT\rho_1(n_2^2 - 1)/MP(n_2^2 + 2) = 1,2$.

6.45. 0,046.

6.46. $\alpha = \alpha_e + \alpha_u$; бундан: $\alpha_u = \alpha - \alpha_e$ (1) $M(\epsilon - 1)/\rho N_a(\epsilon + 2) = \alpha N_a/3$
(2) $M(n^2 - 1)/\rho(n^2 + 2) = \alpha_e N_a/3$ (3). Шулардан $\alpha_u = (3M/\rho N_a)[(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2) - (n^2 - 1)/(n^2 + 2)] = 4,18 \cdot 10^{-29}$ м³.

6.47. $\chi = 0,532$.

6.48. $C = 6,2$ нФ.

6.49. $C = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d - (d_1 + d_2)}{\epsilon_3}} = 35,4$ пФ, бу ерда $\epsilon_3 =$

ҳавонинг диэлектрик синдирувчанлиги.

6.50. $\Delta d = d_2 - d_1 = 1$ см.

6.51. $C = \frac{C_1 d}{\frac{d - d_1}{\epsilon} + \frac{d_1}{\epsilon_1}} = 2,5$ мкФ.

(2.7)

6.52. $U_2 = 700$ В.

6.53. $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R_1 R_2 / (R_2 - R_1) = 93,3$ пФ.

6.54. $U = Q(R_2 - R_1) / 4\pi\epsilon_0\epsilon R_1 R_2 = 4,41$ кВ.

6.55. $\epsilon = (U/U_1) - 1 = 5$.

7.1. $\Gamma_{\text{сш}} = e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг = $1,76 \cdot 10^{11}$ (Тл·с)⁻¹

- 7.2. Бу ҳолда циклотрон резонанс ҳодисаси юз беради. $\nu_{рез} = eV / 2\pi m = 28$ ГГц.
- 7.3. $g=2,00232$ деб олинса, $\omega_{ЭПР}/\omega_{ЦИКЛ}=1,00116$.
- 7.4. $0,353$ Тл.
- 7.5. $g_p=5,58$, $\Gamma_p=2,8 \cdot 10^8$ (Тл·с) $^{-1}$
- 7.6. $\nu_{рез}=42,6$ МГц.
- 7.7. $g=0,34$.
- 7.8. $-3,82$; $1,91 \mu_p$
- 7.9. протон учун $g=5,58$, $\mu_p=2,79 \mu_n$ дейтон учун : $g=0,86$, $\mu_d=0,86 \mu_n$.
- 7.10. $\nu_{рез}=94$ МГц.
- 7.11.
$$\frac{N(m_I)}{N(l)} = \exp\left\{-\frac{g\mu_B}{kT} - (l - m_I)\right\}$$
; $1 - 2 \cdot 10^{-5}$ ($m_I=1/2$); $1 - 4 \cdot 10^5$ ($m_I=-1/2$); $1 - 6 \cdot 10^{-5}$ ($m_I=-3/2$).
- 7.12. $0,223$ Ж/А·м².
- 7.13. $12,1$ А/м².
- 7.14. Алюминийда бир атомга 3 та эркин электрон деб ҳисобланса, унинг учун, $\chi \approx 1,83 \cdot 10^{-6}$, $\mu \approx 1,000023$.
- 7.15. $1,256$ Тл, $-0,82$ А/м.
- 7.16. $\mu=100$.
- 7.17. $\mu_{ат} \approx 1,16 \cdot 10^{-24}$ Жм/А.
- 7.18. $\approx 0,9 \cdot 10^{-7}$.
- 7.19. $289 \cdot 10^{-6}$
- 7.20. Биринчи ҳолда $5 \cdot 10^{-10}/3 \cdot 10^{-10} \approx 1,66 > 1,5$ – бу модда ферромагнетик бўла олади. Кейинги ҳолда $5 \cdot 10^{-10}/6 \cdot 10^{-10} \approx 0,83 < 1,5$ – бундай модда ферромагнетик бўла олмайди
- 7.21. $S \approx 0,0867$.
- 7.22. $0,9 \cdot 10^{-12}$, бу қийматнинг кичиклиги ўтказувчанлик электронларининг фақат $2kT/E_F \ll 1$ қисмигина ҳолат ўзгарги – рилишда қатнаша олишидан келиб чиқади.

АСОСИЙ ФИЗИК ДОИМИЙЛАР

Вакуумда ёруғлик тезлиги	$= 3 \cdot 10^8$	м/с
Электрон массаси (тинч ҳолатда)	$m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$	кг
Электрон заряди	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$	Кл
Болцман доимийси	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$	Ж/К
Универсал газ доимийси	$R = 8,31 \cdot 10^3$	Ж/К
Нормал шароитда 1 кмол идеал газнинг ҳажми	$V_0 = 22,4$	м ³
Стефан – Болцман доимийси	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$	Ж/с·м ² К ⁴
Планк доимийси	$h = 6,625 \cdot 10^{-34}$	Ж·с
Вакуумнинг диэлектрик сингдирувчанлиги	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$	Ф/м
Вакуумнинг магнитик сингдирувчанлиги	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	Г/м
Электрон радиуси	$r_e = 2,82 \cdot 10^{-15}$	м
Бор радиуси	$a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$	м
Авогадр сон	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$	мол ⁻¹

Кўп қўлланадиган катталиклар бирликлари орасидаги боғланиш

1 Ж = 0,239 кал	1 кал = 4,19 Ж
1 Ж = $6,25 \cdot 10^{18}$ эВ	1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Ж
электрон заряди	
1 e = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	1 e = $4,8 \cdot 10^{-10}$ СГС
1 гс = $1 \cdot 10^{-4}$ Тл	1 Тл = 10^4 гс
1 э = $0,25 \cdot 10^3$ А/м	1 Тл = $0,333 \cdot 10^{-4}$ э с/м

Йирикланган ва майдаланган бирликлар билан асосий бирликлар орасидаги муносабат

ГГц = Гига герц = 10^9 Гц	МГц = Мега герц = 10^6 Гц
КГц = Кило герц = 10^3 Гц	гВт = гекто Ватт = 10^2 Вт
мкм = микро метр = 10^{-6} м	нм = нанометр = 10^{-9} м
пФ = пикофарада = 10^{-12} Ф	

Баъзи металларнинг физик хоссалари

I — жадал

Катталиклар	Алю- ми- ний Al	Воль- фрам W	Кумуш Ag	Мис Cu	Никел Ni	Плат- тина Pt	Пулат	Темир Fe	Кур- ганич Pb
Пайжара даври, х 10 нм	4,05	3,16	4,18	3,61	3,52	3,92	—	2,87	4,95
Зичлик, х 10 ³ кг/м ³ (20°C)	2,7	19,3	10,5	8,7	8,9	21,4	7,7— 7,9	7,87	11,3
Суюлиш нуқтаси, °C ($r=760$ мм с.м.уст.)	659	3380	962	1082	1432	1770	1300— 1400	1530	327
Эластиклик (Юнг модули), Гпа	63—70	380	82,7	82— 123	204	147	195— 205	100— 130	16,2
Силжш модули, Гпа	24,5	88— 215	25,9	41,5	77	60,9	79—89	35—53	5,62
Чизикий кенгайш ко- эффидиенти, 10 ⁵ К ⁻¹	22,6 (0 °C)	0,43 (0 °C)	1,9 (20 °C)	1,66 (20 °C)	1,25 (0 °C)	0,895 (0 °C)	—	0,113 (0 °C)	2,83 (0 °C)

Баъзи яримўтказичиларнинг физик хоссалари

2 - жадал

Катталиклар	Бор	Германий Ge	Кремний Si	Селен Se	Телур Te	Ғалбий арсеник GaAs	Инарий мон In	Қадимий сульфид CdS	Эс Латвия
Панжара даври, $\alpha \times 10$ нм	$a=8,73$ $c=5,03$	5,66	5,42	$a=4,36$ $c=4,96$	$a=4,5$ $b=3,34$ $c=5,9$ $d=2,86$	5,65	Sb 6,48	$a=4,13$ $c=6,75$	
Зичлик, $\rho \times 10^3$ кг/м ³	2,34	5,3	2,3	4,8	6,25	5,32	5,78	4,82	
(20°С)	2030	936	1414	220	452	1238	525	1750	
Суюлиш нуқтаси, °С	—	0,55	1,06	—	—	0,068 (1000)	0,01	0,165	по- эркин элек- трон троли мег- эваси
Ҳолатлар зичлиги электрон эфф. массаси $m_{эф}/m_0$	—	—	—	—	—	1,21(100)	4 (000)	—	
Ҳолатлар зичлиги коваллар эфф. Массаси $m_{эф}/m_0$	0,7	0,36	0,59	0,96	0,4	0,5	0,2	1,34 (II) 0,4 - 0,5 (I)	
Циклий кенгайиш коэф- фициенти $\alpha \times 10^6, K^{-1}$	2,0	5,5	2,33	37,0	17,0	6,0	5,04	3,5 - 5,0	
Солиштирма иссиқлик сигими, кДж/кг·К	1,03	0,333	0,71	0,33	0,336	—	—	0,383	
Иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти, Вт·м·К	1,5	60,3 (0°С)	167 (0°С)	0,13 (29°С)	58,15 (20°С)	46	17	20,0	
Солиштирма электрик қаршилик $\rho \times 10^{-8}, Ом \cdot м$	—	0,47 (27°С)	2,3·10 ³ (27°С)	>10 ⁹	—	10 ⁸ - 10 ⁻³	7-10 -5	10 ¹⁰	

Пуассон коэффициенти	0,36 - 0,37	-	0,38 - 0,407	0,36 - 0,38	0,30	0,387	0,25	0,23 - 0,31	0,446
Иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти, Вт/м·К	210	130	118	39,5	92	74	-	75	35 (20 °C)
Солиқирма иссиқлик сигими, кЖ/кг·К	0,88	0,134	0,235	0,39	0,46	0,132	0,46	0,45	0,13
Солиқирма электрик қаршилик, 10 ⁻⁸ Ом·м	2,69 (20 °C)	5,5 (20 °C)	1,47 (0 °C)	1,67 (20 °C)	6,84 (20 °C)	9,81 (0 °C)	6,5 - 10,2	9,71 (20 °C)	20,6 (20 °C)
Қаршиликнинг тэмпе- ратурав коэффициенти, 10 ³ °C ⁻¹	4,2	4,6	4,033	4,30	6,0	3,927	-	6,51	3,36
Дебай температураси, К	394	310	215	315	446	229	-	420	88
Чикшиши, эВ	4,25	4,54	4,3	4,4	4,5	5,32	-	4,31	4,0
Стерженьда товуш тез- лиги, м/с (20 °C)	5080	4310	2640	3710	4785	2800	5050	5170	1200

Таққданган зона келган ги E_g , эВ	1,16- 1,7	0,746 0,665	1,165 1,12	1,8	0,36	1,43	0,18	2,4	
Таққданган зона келг- лигининг темир. Ко- эф. α_1 , $10^4 K^{-1}$	- 3,5	- 4	- 2,8	- 7,5	- 1,9	- 4,9	2,7	- 4,4	
Дебай температураси θ_D , К	-	377	647	200 (I) 500 (II)	140 (I) 290 (II)	344	262	250- 300	
Чўйиш яши, эВ	4,5	4,8	4,3	4,72	4,73	5,5	4,8	6,2- 7,2	
Электронлар оиракатчанлиги μ_n , $m^2 Bc$	10 ⁻⁴	0,39	0,11		0,17	0,95	7,8	0,85	
Каваклар оиракатчанлиги, μ_p , $m^2 Bc$	5-10 ⁻⁸	0,19	0,05	0,079	0,12	0,075	0,04 6	0,042	

Баъзи диэлектрикларнинг физик хоссалари

3 - жадал

Катталиклар	ош тузи NaCl	олмос С	парафин	слюда	шиша	чивни	эбонит
Зичлик, $\rho \times 10^3$ кг/м ³	2,17	3,07 - 3,56	0,4 - 0,9	2,8 - 3,2	2,2 - 4,0	2,4	1,3
Диэлектрик синайирув - чевалик ϵ	5,67 - 6,0	5,6 - 5,8	1,9 - 2,2	4,5 - 8,0	4 - 10	6,5	2,7
Синайириш кўрсаткичи, n	1,5	2,42	-	-	1,5	1,8	-
Чизилмай келгайиш коэффициенти $\alpha \times 10^7$, К ⁻¹	39,2 - 3,9	22,0 (40 - 280°С)	1,90 (20°С)	82,5 (20 - 300°С)	360	20 - 33,3	847 (25 - 45°С)
Солитирирма иссиқлик сирими, кЖ/кг·К	860	510	1302	890	894	1092	1432
Иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти, Вт/м·К	9,95	630	0,123 (20°С)	0,239 (20°С)	0,336 - 1,39	1,03	0,176
Таққидланган зона кенглиги, эВ		5,3					
Солитирирма электрик қаршилик ρ , Ом·м	10^7	10^{12} - 10^{14}	$3 \cdot 10^{11}$	10^{11} - 10^{15}	10^9 - 10^{12}	$3 \cdot 10^{12}$	10^{14}
Электр мустаққамлик, В·м	$1,56 \cdot 10^{11}$		10^2 - $3 \cdot 10^7$	10^1 - $2 \cdot 10^8$	10^2 - $3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$

Баъзи қаттиқ жисмларнинг магнитик хоссалари

1. Диаманетиклар

4 — жадал

Катталиклар	Германий Ge	Кремний Si	Ош тузи NaCl	Шини	Кварц SiO ₂	Мис Cu
Магнитик қабучанлик, $\chi_d \cdot 10^6$	-7,7		-30,3	-1,0	-1,2	-0,82
Магнитик сингли — рувчанлик, μ	0,999904		0,99962	0,999987	0,999985	0,999999
Дебай температураси, θ_d , К	377	674	289	—	602	365

2. Парамагнетиклар

5 — жадал

Катталиклар	Алюминий Al	Литий Li	Натрий Na	Калий K	Платина Pt	Эбонит
Магнитик қабучанлик, $\chi_d \cdot 10^6$	16,7	24,6	16,1	21,35	289	1,1
Магнитик сингли — рувчанлик, μ	1,00021	1,00031	1,0002	1,0003	1,0036	1,000014
Дебай температураси, θ_d , К	438	400	164	100	230	—

3. Ферромагнетиклар

6 — жадал

Катталиклар	Темир Fe	Кобалт Co	Никел Ni	Гадолийий Gd
Кюри температураси, К	1043	1403	631	289
Тўйиниш магнитланиши, J_{so} , Гс	1735	1445	508,8	1980
Дебай температураси, θ_d , К	478	385	375	176

МУНДАРИЖА

Сўз боши

1 – боб. Кристаллар тузилиши	4
2 – боб. Қаттиқ жисмларнинг иссиқлик хоссала- ри	9
2.1. Каттиқ жисмларнинг иссиқлик сизими. Фо- нонлар	
2.2. Каттиқ жисмларнинг иссиқлик ўтказувчанлиги	
2.3. Каттиқ жисмларнинг иссиқликдан кенгайиши (қисқариши)	
3 – боб. Қаттиқ жисмларда деформациялар.....	19
4 – боб. Металлар.....	23
4.1. Ом қонуни ва унинг қўлланиши	
4.2. Металларда электронлар квант статистикаси	
4.3. Металларда электронларнинг иссиқлик сизими, иссиқлик ўтказувчанлиги	
4.4. Термоэлектрон эмиссия ҳодисаси	
4.5. Металларда фотоэффект	
5 – боб. Яримўтказгичлар.....	32
5.1. Электронлар ва ковакларнинг энергетик спектри	
5.2. Электронлар ва коваклар статистикаси	
5.3. Яримўтказгичларнинг электрик ўтказувчанлиги	
5.4. Яримўтказгичларда заряд ташувчилар реком- бинацияси	
5.5. Яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг диффузияси ва дрейфи	
5.6. Яримўтказгичларда кинетик ҳодисалар	
5.7. Фотоэлектрик ҳодисалар	
5.8. Яримўтказгич асооблар	
6 – боб. Диэлектриклар.....	59
6.1. Дипол электрик майдони	
6.2. Электрик майдондаги дипол	
6.3. Диэлектрикларнинг қутбланиши	
6.4. Диэлектрикли конденсаторлар	
7 – боб. Қаттиқ жисмларнинг магнитик хоссалари.....	74
Жавоблар.....	79
Жадваллар.....	91

Чоп этишга 10.10.2001 да рухсат этилди
Бичими 84/108 1/32. Офсет босма.
Шартли босма табағи 20,16. Адади 500 нусха.
Буюртма № 12. Баҳоси шартнома асосида.

Андижон Давлат университети
« Устоз » жамғармаси
Ризографиясида чоп этилди

