

З.М.БОБУР НОМИДАГИ АНДИЖОН

ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

Физика – математика факультети

Физика кафедраси

РЕФЕРАТ

Мавзу: ФЕРМИ САТХИ

Бажарди: 4Ф1 гуруҳ талабаси Г.Омонбоева

АНДИЖОН – 2016

ФЕРМИ САТХИ РЕЖА

- 1. Ферми-Дирак тақсимооти.**
- 2. Эркин заряд ташувчиларнинг
концентрациясини аниқлаш.**
- 3. Яримўтказгичда электрик бетарафлик
шарти.**
- 4. Яримўтказгичларда Ферми сатҳи
ҳолатини аниқлаш.**
- 5. Хусусий яримўтказгич.**
- 6. n-тур яримўтказгич.**
- 7. p-тур яримўтказгич.**

ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА ФЕРМИ- ДИРАК ТАҚСИМОТИ

Яримўтказгич орқали ўтаётган электрик токининг зичлиги ва шу яримўтказгичга берилган кучланиш орасидаги боғланишни топиш учун берилган шароитдаги электронлар билан коваклар концентрациясини билиш зарур.

Электронлар ва коваклар концентрациясининг тегишли миқдорий ифодасини топиш учун исботсиз икки қондани қабул қиламиз. Булардан биринчиси, статистик физикага оид Ферми-Дирак тақсимооти функцияси бўлиб, у ҳар қандай алоҳида энергиявий сатҳнинг электрон билан тўлиш эҳтимоллигини кўрсатади. Квант механикасидан олинган иккинчи қонда эса, маълум энергиявий оралиқдаги квант ҳолатлар зичлигини аниқлайди.

Ўтказувчанлик зонасидаги ва киришмавий сатҳлардаги электронлар зичлиги, шунингдек, валент зонадаги коваклар зичлигини Ферми сатҳи орқали ифодаланувчи муносабатларни топамиз.

1. Ферми-Дирак тақсимооти

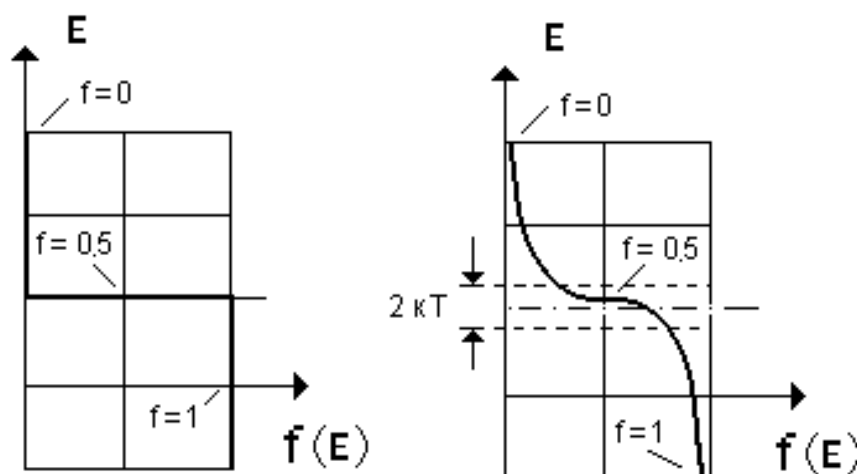
Мутлақ нол температурада кристаллдаги барча квант ҳолатлар маълум бир сатҳгача электронлар билан эгалланган ва бу сатҳдан юқоридаги барча ҳолатлар бўш (электронлар томонидан эгалланмаган) бўлади. Бироқ юқорироқ температураларда баъзи

бир электронлар юқори сатҳларга ўтиб уларни эгаллаши учун етарли энергияга эга бўлиб қолишлари мумкин.

Ферми-Дирак тақсимот функцияси энергияси W бўлган сатҳнинг электрон билан эгалланган бўлиш эҳтимоллигини аниқлайди:

$$f(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}} \quad (1.)$$

Бу ерда, k -Больцман доимийси, T -мутлак температура.



1.-расм. Ферми-Дирак тақсимот функцияси

W_F -энергиявий сатҳ Ферми сатҳи деб аталади. Бу шундай сатҳки, унинг электрон билан тўлиш эҳтимоллиги $1/2$ га тенг, чунки (1) ифодага кўра, агар $W=W_F$ бўлса, $f=1/2$ га тенг. (1.) ифодага асосан 0 K да Ферми сатҳи электрон билан эгалланган ҳолатларни электрон билан эгалланмаган ҳолатлардан ажратувчи сатҳдир. Юқори температураларда Ферми сатҳи электрон билан кўпроқ

эгалланган ҳолатларни камроқ эгалланган ҳолатлардан ажратиб туради. Тақсимот функцияси Ферми сатҳига нисбатан симметрик эканлигига ишонч ҳосил қилиш қийин эмас.

Хусусий яримўтказгичда коваклар сони электронлар сонига тенг бўлганлиги ва тақсимот функциясининг симметриклиги сабабли Ферми сатҳи тақиқланган зонанинг деярли ўртасида ётади.

Киришмали яримўтказгичда акцептор ёки донор киришмадан қайси бири кўп бўлишига қараб, Ферми сатҳи ё валент зонага ёки ўтказувчанлик зонасига яқин ётади. Масалан, агар яримўтказгичда донор киришма кўп бўлса-Ферми сатҳи ўтказувчанлик зонасига яқинроқ; агар акцептор киришма кўп бўлса-валент зонасига яқинроқ ётади.

Ферми-Дирак тақсимоти фақат маълум энергиявий сатҳнинг электрон билан эгалланганлиги эҳтимолини кўрсатишини эслатиб ўтамыз.

Динамик мувозанат ҳолатида электрон ва коваклар иссиқликдан уйғониш натижасида узлуксиз равишда ҳосил бўлиб туради. Шу билан бирга тескари жараён-эркин заряд ташувчиларнинг рекомбинацияланиб йўқолиши ҳам узлуксиз равишда содир бўлиб туради. Шу сабабдан тақсимот функцияси электронлар энергиясининг вақт бўйича ўртача тақсимотини кўрсатади.

2. Эркин заряд ташувчиларнинг концентрациясини аниқлаш

Киришма киритиш туфайли вужудга келган қўшимча квант ҳолатларни, алоҳида дискрет энергиявий сатҳлар сифатида қараш мумкин. Бу сатҳлар ΔW_d ва ΔW_a лар билан белгиланган. ΔW_d энергиявий квант ҳолатларининг сони кристаллга киритилган донор атомлар сонига тенг ёки агар 1 см^3 ҳажмли кристаллда, ΔW_d сатҳдаги квант ҳолатларнинг зичлиги донор атомлари концентрацияси N_d , см^{-3} га тенг бўлади.

Донор киришма атомларининг баъзилари ионлашган бўлиши, яъни ΔW_d энергиявий сатҳдаги электронларнинг баъзилари иссиқликдан уйғониши туфайли ўтказувчанлик зонасига ўтган бўлиши мумкин. Агар n_d электронлар ΔW_d энергиявий сатҳдаги ўз квант ҳолатларини сақлаб қолсалар, яъни донор атомларининг n_d/N_d қисми ионлашмаган ҳолда қолса, электронлар концентрацияси қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$n_d = \frac{N_d}{1 + e^{(\Delta W - W_F) / kT}} \quad (2)$$

(2) тенглама ΔW_d энергиявий сатҳдаги донор ҳолатларидаги электронлар концентрациясини Ферми сатҳи ва температура билан боғлайди.

Хона температурасида германий ва кремний кристалли учун Ферми сатҳи одатда ΔW_d энергиявий сатҳдан бир неча kT қадар

пастда жойлашади ва шунинг учун $[(\Delta W_d - W_F)/kT] \gg 1$ бўлади. Шу сабабли маҳраждаги 1 сони ҳисобга олинмаса (2) ифода қуйидагича кўринишда ёзилиши мумкин:

$$n_d = N_a e^{-(\Delta W_d - W_F)/kT} \quad (3)$$

(3) тенглама донор сатҳдаги электрон билан эгалланган ҳолатлар концентрациясини донор киришманинг концентрацияси- N_d , Ферми сатҳи- W_F ва мутлақ температура- T билан боғлайди.

Худди шу тарзда иссиқликдан уйғониши туфайли валент зонадан ΔW_a сатҳдаги акцептор ҳолатга ўтган электронлар концентрацияси n_a Ферми сатҳи W_F ва мутлақ температура T орқали қуйидагича ифодаланиши мумкин:

$$n_a = \frac{N_a}{1 + e^{(\Delta W_a - W_F)/kT}} \quad (4)$$

бу ерда, N_a -акцептор атомларнинг концентрацияси.

Ўтказувчанлик зонасидаги электронлар концентрациясини топиш нисбатан мураккаброқ масаладир. ўтказувчанлик зонасидаги квант ҳолатлар бу зонанинг туби W_c дан тақиқланган зонанинг қоқ ўртаси- $W_{1/2}$ қадар энергиявий ораликда жойлашган бўлади ва берилган ҳолатнинг эгалланганлик эҳтимоллиги бир ҳолатдан бошқа ҳолатга ўтганда ўзгариб туради.

Бу масалани ечиш учун исботсиз қабул этилган қоидаларнинг иккинчисидан фойдаланамиз: ўтказувчанлик зонасидаги W энергиявий сатҳ атрофидаги dW энергиявий ораликдаги квант

ҳолатлар зичлиги $g(W)dW$ қуйидагича муносабат билан ифодаланади:

$$g(W)dW = \frac{8\pi(2m_n^3)^{\frac{1}{2}}}{h^3} \quad (5)$$

бу ерда, m_n -электроннинг самаравий массаси, h -Планк доимийси.

(5) тенглама ўтказувчанлик зонасининг пастки қисми учун ўринлидир. Бироқ кўпчилик электронлар бу зонанинг тубига яқин жойлашгани учун ундан етарли даражада аниқлик билан фойдаланиш мумкин.

(1) ва (5) тенгламалардан фойдаланиб, ўтказувчанлик зонасидаги электронлар зичлигини аниқлаш мумкин:

$$n = \int_{W_c}^{W_2} f(W)g(W)dW = \frac{8\pi(2m_n^3)^{\frac{1}{2}}}{h^3} \int_{W_c}^{W_2} \frac{(W - W_c)^{\frac{1}{2}} dW}{e^{(W - W_c)/kT} + 1} \quad (6)$$

Агар хона температурасида $W_c - W_F$ энергиявий оралик бир неча kT га тенглигини ва W нинг ўсиши билан интеграл тез суръат билан камайишини (чунки кўпчилик электронлар юқорида қайд этилганидек ўтказувчанлик зонасининг тубига яқин жойлашган бўлади) ҳисобга олсак, (6) ифодани соддалаштириш ва қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$n = \frac{8\pi(2m_n^3)^{\frac{1}{2}}}{h^3} \int_{W_c}^{\infty} (W - W_c)^{\frac{1}{2}} e^{-(W - W_F)/kT} dW \quad (7)$$

Бу интегрални ечиш ўтказувчанлик зонасидаги электронлар концентрацияси учун қуйидаги ифодани беради:

$$n = N_c e^{-(W_c - W_F)/kT} \quad (7)$$

бу ерда,

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

N_c - ўтказувчанлик зонасидаги ҳолатларнинг самаравий зичлиги деб аталади. У ҳар бир яримўтказгич учун аниқ қийматга эгадир.

(6) ифода ўтказувчанлик зонасидаги эркин электронлар концентрациясини $W_c - W_F$ энергиявий оралиқ ва мутлақ температура T билан боғлайди. Хона температурасида германий учун $W_c \cong 5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^{-3}$, кремнийда эса $W_c \cong 2,82 \cdot 10^{-19} \text{ см}^{-3}$.

Юқоридагига ўхшаш усул билан валент зонадаги коваклар концентрацияси, Ферми сатҳи ва температура орасидаги боғланишни топиш мумкин:

$$p = N_g e^{-(W_F - W_a)/kT} \quad (8)$$

бу ерда, N_v - валент зона юқори чегараси(шипи)нинг энергияси.

$$N_g = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

m_p -валент зонадаги ковакларнинг самаравий массаси, W_v -валент зонадаги ҳолатларнинг самаравий зичлиги дейилади. Бу катталиқ ҳам ҳар бир яримўтказгич учун маълум қийматга эга. Масалан, хона температурасида германий учун $W_v \cong 6,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, кремний учун эса $W_v \cong 1,02 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эркин заряд ташувчилар концентрацияси n ва p ларнинг кўпайтмаси Ферми сатҳининг ҳолатига, яъни киришмалар концентрациясига боғлиқ эмаслигига эътиборни жалб қилмоқчимиз:

$$np = N_c N_g e^{-(W_c - W_g)/kT} = \text{const} \quad (10)$$

У ёки бу киришма яримўтказгичдаги электронлар концентрациясини оширса, у мос равишда коваклар концентрациясини шунча марта камайтириши ва аксинча, коваклар концентрациясини оширса, электронлар концентрациясини шунча марта камайтириши ушбу ифодадан кўриниб турибди.

3. Яримўтказгичда электрик бетарафлик шarti

Яримўтказгичлар тўрт хил зарядли зарраларга эга: ҳаракатчан заряд ташувчилар-ўтказувчанлик электронлари ва коваклари; ҳаракатсиз зарядлар-донор ва акцептор киришмаларнинг ионлашган атомлари. Булардан коваклар ва донор ионлар миқдор жиҳатдан электрон зарядига тенг мусбат зарядга, электрон ва акцептор ионлар эса манфий зарядга эга. Заряд миқдорининг сақланиш қонунига кўра, яримўтказгич кристаллидаги йиғинди заряд нолга тенг. Бундан, яримўтказгичда коваклар ва донор киришмалар ионларининг умумий сони электронлар ва акцептор киришмалар ионларининг умумий сонига тенг, деган хулоса келиб чиқади:

$$p + N_d^+ = n + N_a^- \quad (11)$$

бу ерда, N_d^+ ва N_a^- -донор ва акцептор киришмалар ионлашган атомларнинг концентрацияси.

Киришмалар концентрацияси ҳажм бўйлаб бир текис тақсимланган бир жинсли яримўтказгичларда бу қоида бутун кристалл учунгина эмас, балки унинг ҳар бир кичик ҳажмий элементи учун ҳам ўринлидир.

4. Яримўтказгичларда Ферми сатҳи ҳолатини аниқлаш

(11) тенгламани яна қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$p + (N_d - n_d) = n + N_a^- \quad (12)$$

Агар (2), (3) ва (8) тенгламаларни (11)га қўйилса, Ферми сатҳи ҳамда температурадан бошқа барча қолган катталиклар-яримўтказгичнинг тури, киришмаларнинг хили ва концентрацияси билан аниқланишини кўриш мумкин. Демак, W_F катталик температуранинг функцияси сифатида ифодаланиши мумкин. Умуман олганда, (11) тенглама трансцендент бўлиб, у график усулда ечилади. Бироқ кўпчилик амалий ҳолларда маълум соддалаштиришларни амалга ошириш ва шу шароитларда W_F ни етарли даражада аниқлик билан топиш мумкин.

5. Хусусий яримўтказгич

Тоза яримўтказгичда N_d , n_d ва N_a^- нолга тенг ва шунинг учун (12) га асосан:

$$p = n \quad (13)$$

Бошқа турдаги яримўтказгичларга тегишли катталиклардан фарқли қилиш учун киришмасиз яримўтказгичнинг барча

катталиклари i индекси билан берилади. Шунинг учун киришмасиз яримўтказгич учун $p = p_i$, $n = n_i$, $W_F = W_{F_i}$.

У ҳолда (6) ва (8) ларни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$n_i = N_c e^{-(W_c - W_{F_i}) / kT} = p_i \quad (14)$$

$$p_i = N_g e^{-(W_{F_i} - W_g) / kT} = n_i \quad (15)$$

Демак, хусусий яримўтказгичларда Ферми сатҳи ушбу тенгламадан:

$$N_c e^{-(W_c - W_{F_i}) / kT} = N_g e^{-(W_{F_i} - W_g) / kT} \quad (16)$$

қуйидагича кўринишда топилади:

$$W_{F_i} = \frac{W_c - W_g}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_g}{N_c} \right) \quad (17)$$

(7) ва (9) ифодалардан фойдалансак, W_{F_i} учун шундай муносабат оламиз:

$$W_{F_i} = \frac{W_c - W_g}{2} + \frac{3kT}{4} \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right) \quad (18)$$

Электронлар ва ковакларнинг самаравий массалари деярли тенг бўлгани учун (18) ифода киришмасиз яримўтказгичларда Ферми сатҳи тақиқланган зонанинг ўртасига жуда яқин ётишини кўрсатади. Шундай қилиб, $m_p = m_n$ деб қабул қилсак, қуйидагича ёзиш мумкин:

$$W_{F_i} = \frac{W_c + W_g}{2} \quad (19)$$

(13) ва (14) ифодалардан қуйидаги муносабатни олиш мумкин эканлигига эътиборни жалб қиламиз:

$$p_i \equiv n_i = (N_c \cdot N_g)^{1/2} e^{-(W_c - W_g)/kT} \quad (20)$$

Германий учун тақиқланган зонанинг кенглиги $\Delta W = W_c - W_g = 0,67$ эВ ва $N_c = N_g \cong 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ эканлиги ҳисобга олсак, хона температураси шароитида хусусий ўтказувчанликли германийдаги эркин заряд ташувчилар концентрацияси учун $n_i = p_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ тахминий қийматни оламиз. Тақиқланган зонаси кенглиги 1,12 эВ га тенг бўлган кремнийда эса, $n_i = p_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

6. n -тур яримўтказгич

Агар донорлар концентрацияси N_d акцепторлар концентрациясидан анча кўп бўлса, (11) тенгламада n_a ни ҳисобга олмаса ҳам бўлади. Шунингдек, барча донорлар ионлашган деб фараз қилиш мумкин, чунки хона температурасида германий ва кремний учун бемалол шундай деб олса бўлади. Бунга қўшимча равишда валент зонадаги коваклар концентрацияси ўтказувчанлик зонасидаги электрон(асосий заряд ташувчи)лар концентрациясидан анча кам деб қабул қилсак, (11) тенглама:

$$n_n \cong N_d \quad (20)$$

кўринишни олади, бу ерда, "n"-индекс ушбу катталик n -тур яримўтказгичга тегишли эканини кўрсатади.

Энди Ферми сатҳи учун (6) ва (21) тенгламалардан қуйидаги ифодани оламиз:

$$W_{F_n} = W_c - kT \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad (22)$$

n -тур яримўтказгичдаги ноасосий заряд ташувчилар-коваклар концентрациясини топиш учун (1.41) дан олинган катталикни (1.28) ифодага қўямиз. Натижада қуйидаги муносабат келиб чиқади:

$$p_n = \frac{N_c N_g}{N_d} e^{-(W_c - W_g)/kT} \quad (23)$$

7. *p*-тур яримўтказгич

Агар акцепторлар концентрацияси донорлар концентрациясидан катта бўлса, тенгламада N_d ва n_d катталикларни ҳисобга олмаса ҳам бўлади. Шунингдек, барча акцепторлар валент зонадан электрон олган, яъни $n_a = N_a$ деб қабул қилсак бўлади. Хона температурасида шундай ҳолат тўлиқ равишда ўринли бўлади. Бунга қўшимча равишда, валент зонадаги коваклар концентрацияси ўтказувчанлик зонасидаги электронлар концентрациясидан анча катта деб фараз қилсак, (11) тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$p_p \cong N_a \quad (24)$$

бу ерда, "р"-индекс ушбу катталик *p*-тур яримўтказгичга тегишли эканлигини кўрсатади.

Энди (8) ва (24) ифодалар ёрдамида Ферми сатҳини аниқлаш мумкин:

$$W_{F_p} = W_g + kT \ln \left(\frac{N_g}{N_a} \right) \quad (25)$$

(25) тенгламадан топилган W_F нинг қийматини (6) ифодага қўйсак, *p*-тур яримўтказгичдаги ноасосий заряд ташувчилар электронлар учун қуйидаги муносабатни оламиз:

$$n_p = \frac{N_c N_g}{N_a} e^{-(W_c - W_g) / kT} \quad (26)$$

(25) ифодадан кўринишича, Ферми сатҳи n -тур яримўтказгичда валент зонанинг шипига яқин жойлашар экан.