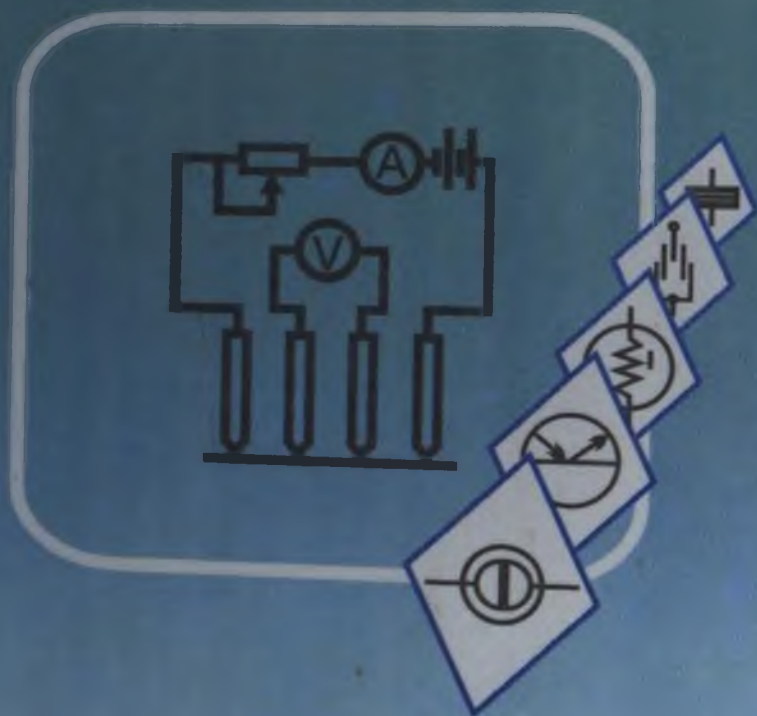


С. ЗАЙНОВИДИНОВ, Х. АКРОМОВ

С. ЗАЙНОБИДИНОВ, Х. АКРОМОВ

ЯРИМУТКАЗГИЧЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ АНИҚЛАШ УСУЛЛАРИ



“ЎЗБЕКИСТОН”

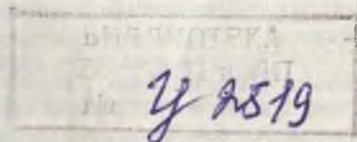


55
3-22

С. ЗАЙНОВИДДИНОВ, Х. АКРАМОВ

ЯРИМУТКАЗГИЧЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ АНИҚЛАШ УСУЛЛАРИ

*Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим
вазирлиги олий ўқув юр்தларининг яримўтказгичлар физикаси
ва техникаси мутахассислиги бўйича таълим олувчи талабалар
учун ўқув қўлланма сифатида тавсия этган.*



ТОШКЕНТ "ЎЗБЕКИСТОН" 2001

Тақризчилар — проф. Р. А. Муминов, ф.-м. ф.н. доцент
О. С. Саидхонов
Муҳаррир — Р. С. Тоирова

Зайнобиддинов С., Акрамов Х.

Яримўтказгичлар параметрларини аниқлаш усуллари:
Олий ўқув юртларининг талабалари учун ўқув қўллан-
ма.— Т.: "Ўзбекистон", 2001. — 320 б.

1. Муаллифдош.

Ўқув қўлланма яримўтказгичли моддаларнинг асосий параметрла-
ри — электр, гальваномагнит, ҳар хил структурали намуналарнинг хусу-
сиятларини аниқлашнинг замонавий усуллариини ўрганишга бағишлан-
ган бўлиб, унда 36 хил усулнинг таърифи ва моҳияти келтирилган.

Мазкур китоб Давлат таълим стандартининг бакалавр мутахассисли-
ги Б—010404 "Физика" йўналишига мос келади. У магистратура мута-
хассислиги М-010404 "Яримўтказгичлар ва диэлектриклар физикаси"
йўналишида таълим олувчи талабаларга, шунингдек университетлар, пе-
дагогика ва техника олий ўқув юртларининг яримўтказгичлар, микро-
электроника, электрон асбоблар ва бошқа соҳалар бўйича ихтисослаша-
ётган талабалар, аспирантлар, шунингдек, шу соҳа ўқитувчилари ва ил-
мий ходимларга мулжалланган.

ББК 22.379я73

ISBN 5-640-02839-5

А $\frac{1604010000-67}{351(04)2000}$ 2001

© "ЎЗБЕКИСТОН" нашриёти, 2001 й.

КИРИШ

Илмий-техникавий ривожланишни яримўтказгичли электроникасиз, хусусан микроэлектроникасиз тасаввур қилиш қийиндир. Замонавий микроэлектроникада яримўтказгичли материаллар ва кўп қатламли структуралардан кенг кўламда фойдаланилади ва улар асосида турли хил яримўтказгичли асбоблар ва микросхемалар тайёрланади. Яримўтказгичли материалларни ишлаб чиқаришнинг ривожланиши уларнинг сифатини лаборатория ва саноат шароитида текширишнинг юқори даражага кўтарилиши билан боғлиқ. Бунда ишлаб чиқариш соҳалари технологик йўқотишлари ва уларнинг ишлаб чиқаришдаги сифатини назорат қилишга кетган моддий харажатларнинг ўлчамлари аниқланади. Шунинг учун саноат корхоналарини юқори аниқликдаги ва юқори ишлаб чиқариш унумига эга воситалар билан жиҳозланган, яримўтказгич материалларнинг сифатини текширувчи янги, илғор усулларни ишлаб чиқиш ва ўзлаштириш яримўтказгич материаллар ва структураларни ишлаб чиқариш иқтисодий самарадорлигининг ўсиши билан бевосита боғлиқдир.

Афсуски яримўтказгичларнинг ҳамма параметрларини ҳам оддий ва қулай бўлган усуллар билан ўлчаш мумкин эмас. Уларнинг кўпчилигини ўлчаш махсус физик услубиятни ва мураккаб аппаратураларнинг ишлатилишини талаб қилади. Шунинг учун яримўтказгичларнинг параметрларини ўлчаш усуллари сўнгги йилларда яримўтказгичлар физикаси ва техникаси бўлимлари билан бир қаторда ривожланиб мустақил йўналиш бўлиб қолмоқда. Яримўтказгичлар физикаси ва яримўтказгичли электроника масалалари ёритилган китобларнинг сони кам эмас,

лекин уларда яримўтказгичларнинг параметрларини ўлчаш ва яримўтказгичли материалларни текшириш усулларига кам эътибор берилган. Умид қиламизки, мазкур қўлланма маълум даражада ўқувчиларнинг яримўтказгичлар физикасининг бу бўлимига бўлган эҳтиёжини қондиради. Қўлланмада яримўтказгич материаллар параметрларини ўлчаш усулининг физик асослари кенг ёритилган. Яримўтказгич параметрларини ўлчашнинг айрим муаммолари яримўтказгич материалларнинг хоссаларини ўрганувчи китобларда кенг ва тўла ёритилганлигини ҳисобга олган ҳолда ўлчаш усулларини ёритишнинг ҳожати бўлмади. Бу китоб ўзбек тилидаги дастлабки китоб бўлиб, у яримўтказгичлар физикаси ва техникаси масалалари билан бевосита шуғулланувчи талабаларга мўлжалланган.

Қўлланмада ҳар хил катта ҳажмдаги намуналар, пластинкалар, юпқа қатламлар, ҳар хил турдаги яримўтказгичли структуралар параметрларини ҳамда номувозанат ҳолатидаги заряд ташувчилар параметрларини, яъни заряд ташувчилар яшаш вақтини, диффузион узунликни диффузия коэффицентини, сирт рекомбинация тезлигини ва ниҳоят чуқур сатҳли марказлар параметрларини ўлчаш усуллари ёритилган.

ЯРИМУТКАЗГИЧЛАРДА СОЛИШТИРМА ҚАРШИЛИКНИ ЎЛЧАШ УСУЛЛАРИ

1.1-§. Яримўтказгичли намунанинг солиштира қаршилигини унинг тула қаршилиги бўйича аниқлаш

Солиштира қаршилиқ ρ ни намунанинг тула қаршилиги бўйича топишда таёқча (стержен) кўринишидаги намуна кўндаланг кесимларига металл контакт олинади. Металл яримўтказгич чегарасида заряд ташувчилар концентрацияси яримўтказгич ҳажмидагидан кичик бўлганда потенциал тўсиқ қатлами ҳосил бўлиши мумкин, шунинг учун бу қатлам намуна қаршилигини оширади. Намунада Ом контакти олинганда қаршилиги катта бўлган қатлам ҳосил бўлмайди. Ҳажм бўйича намунада металл чегарасигача заряд ташувчилар концентрацияси бир хил бўлади ёки заряд ташувчилар билан бойиган (антизапор) қатлам ҳосил бўлади.

Заряд ташувчилар билан бойиган қатламнинг қалинлиги намуна узунлигидан жуда кичик бўлгани учун унинг умумий қаршилиққа қўшган ҳиссасини ҳисобга олмаслик мумкин. Токнинг Ом контакти орқали оқиши намунада концентрациянинг ўзгаришига олиб келмайди, яъни *инжекция*, *экстракция*, *экслюзия* ва *аккумуляция* каби ҳодисалар бўлмайди. Кўрилатган ҳолатда **контактлардан** оқаётган ток ва намунага тушаётган кучланиш орқали тула қаршилиқ топилади:

$$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{S} \quad (1.1)$$

Бундан

$$\rho = R \frac{S}{l} = \frac{U}{I} \frac{S}{l} \quad (1.2)$$

келиб чиқади. Бу ерда: R — тўла қаршилик, l — намуна-
нинг узунлиги, S — кўндаланг кесими юзаси, U — икки
контакт орасидаги кучланиш, I — намунадан ўтаётган
ток. Солиштирма қаршиликни намунанинг тўла қарши-
лиги билан аниқлаш кичик солиштирма қаршиликка
($\rho < 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ва ўртача солиштирма қаршиликка
($0,01 < \rho < 1\,000\,000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) эга бўлган намуналарда ҳеч қан-
дай қийинчилик туғдирмайди.

Юқори Ом ли намуналарда ($\rho > 1\,000\,000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) бу усул
билан солиштирма қаршиликни аниқлашда бир қанча
ҳодисаларни, яъни сиғим токини, намуна қутбланиши-
ни, токнинг сирт ўтказувчанлиги бўйича сирқиб оқиши-
ни ҳисобга олиш керак. Булар ўлчовни бир мунча қийин-
лаштиради. Шунинг учун аввал уларнинг тажрибага кўрсат-
таётган таъсири камайтирилиб, сўнгра ўлчанади (1.1-расм).

а. Сиғим токи. Намуна ички қаршилиги r_i бўлган ток
манбаи ва қаршилиги R_A бўлган ток ўлчайдиган асбоб —
амперметр (A) кетма-кет уланган, намунадаги кучланиш-
нинг тушувини ўлчаш учун эса вольтметр (V) уланган.
 $R_V \gg R_A + R$ да V дан оқаётган токни ҳисобга олмаймиз.
Ток манбаини улаш пайтида намунадан оқаётган ток ўтка-
зувчанлик ва силжиш токларининг йиғиндисидан иборат
бўлади. Шунинг учун мос равишда ток зичлиги:

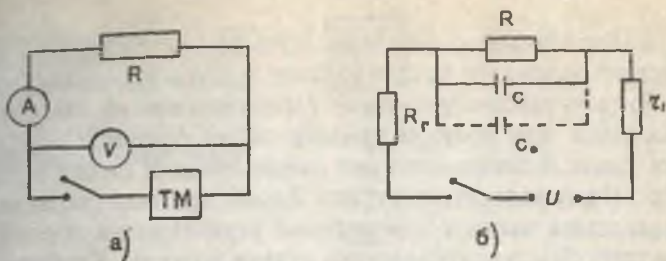
$$j = \frac{E}{\rho} + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (1.3)$$

Бу ерда: E — намунадаги электр майдон кучланганлиги,
 ϵ — намунанинг диэлектрик сингдирувчанлиги, t — вақт.
 $E = \frac{U}{l}$ бўлишини ҳисобга олиб, (1.3) дан тўла ток ифода-
сини топамиз:

$$I = \frac{U}{R} + C \frac{dU}{dt}. \quad (1.4)$$

Бу ерда, $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{l}$ — намуна сиғими (1.1-расм). Силжиш

токи намунани эквивалент схемада сиғим пайдо бўли-
шига олиб келади. Бунга параллел уланган монтажлар



1.1-расм. Намуна тўла қаршилигини ўлчаш схемаси (а) ва унинг эквивалент схемаси (б): А — амперметр, V — вольтметр, К — калит, R — намуна қаршилиги, ТМ — ток манбаи, R_A — амперметр қаршилиги, r_i — ток манбаининг ички қаршилиги.

сиғими (паразит) C_0 намуна сиғимидан анча кўп бўлиши мумкин. C_0 ва C зарядлангунча амперметрдан ўтказувчанлик токи билан бирга сиғимни зарядлаш токи оқади. Амперметрдан оқаяётган токни вақтга боғлиқлиги қуйидаги формула билан аниқланади:

$$I(t) = \frac{U_0}{R_A + R + r_i} \left(1 + \frac{R}{R_A + r_i} e^{-\frac{t}{R(C+C_0)}} \right) \quad (1.5)$$

$$R' = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_A + r_i} \right)^{-1}. \quad (1.6)$$

$t \gg R'(C + C_0)$ да (1.5) формула қуйидаги кўринишга келади

$$I = \frac{U_0}{R_A + R + r_i} = \frac{U}{R}. \quad (1.7)$$

Сиғим токи солиштирма қаршиликни аниқлашда хатоликка олиб келиши мумкин. (1.5) ва (1.7) формуладан кўринадикки, бу билан боғлиқ бўлган хатоликни йўқотиш учун токни $t \gg R'(C_0 + C)$ тенгсизликни қаноатлантирувчи вақтда ўлчаш керак. Агар намунада қутбланиш ҳодисаси кузатилмаса, бу усул билан ρ ни ўлчаш ҳеч қандай қийинчилик туғдирмайди.

б. Қутбланиш ҳодисалари. Қутбланиш ҳодисалари контактлар орасидаги кучланишнинг тушуви ўзгармас бўлганда ўтказувчанлик токининг ўзгаришига олиб келади. Бу намунада ион дрейфи ҳажмий заряд соҳасида электрон ёки кавак инъекциясининг пайдо бўлиши билан боғлиқдир. Намуналарнинг турига қараб токнинг характерли релаксация вақти τ_p секунднинг улушларидан тортиб, то соатлар, баъзан суткаларгача етиши мумкин. Қутбланишнинг аниқланаётган солиштирма қаршиликка таъсирини камайтириш учун ўлчовни (1.7) ва $t \gg \tau_p$ (1.9) тенгсизликларни қаноатлантирадиган вақтда ўтказиш керак. Бу тенгсизликлар бажарилиши учун

$$R'(C + C_0) \ll \tau_p \quad (1.8)$$

бўлиши керак.

Қутбланиш ҳодисаси мавжуд бўлганда, солиштирма қаршиликни аниқлаш $\nu \ll \frac{1}{\tau_p}$ частотада намунанинг адмитансини (z^{-1}) ўлчаш масаласига келади: z^{-1} актив ва реактив қаршиликларнинг тескари қиймати йиғиндиси. Бу ҳолда қутбланиш ҳодисаларининг инерционлиги туфайли, намунадан ток оқишига таъсир кўрсатмайди ва адмитанс қуйидаги кўринишни олади:

$$z^{-1} = \frac{1}{R} + i\omega(C + C_0). \quad (1.9)$$

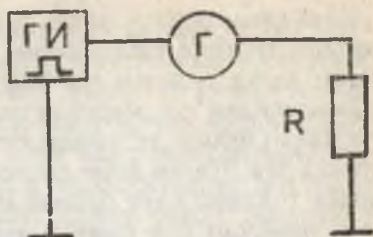
Бу формула R ва $C + C_0$ ни алоҳида топишга имкон беради. Бу ерда: $i = \sqrt{-1}$. z^{-1} ни ўлчашда ўзгарувчан ток кўприклари ишлатилади.

Қутбланиш ҳодисалари мавжуд бўлганда солиштирма қаршиликни ўлчашда импульс ток манбаларидан фойдаланиш ҳам мумкин (1.2-расм). Қутбланиш эффектининг таъсирини йўқотиш учун тўғри бурчакли импульснинг давомийлиги, импульс такрорлангунча бўлган вақт (T)

$$\tau_u \ll \tau_p \ll T$$

тенгсизликни қаноатлантириши керак. 1.2-расмда кўрсатилган схемада гальванометр билан занжирдан оқаётган

1.2-рasm. Намуна қаршилиги-
ни тўғри бурчақли импульс
кучланиши усули билан ўлчаш
схемаси. ГИ — импульсли
кучланиш генератори, Г —
гальванометр R — намуна қар-
шилиги.



ўртача ток ўлчанади. Импульс таъсир қилаётган вақтда намуна сиғими ва унга параллел уланган ўтказгичлар мон-тажи сиғими гальванометр орқали зарядланади, импульс тугаши билан улар ўлчанаётган ўртача токка ҳеч қандай ҳисса қўшмайди. Намунадан импульс кучланиши ўтаёт-ганда токнинг ўртача қиймати

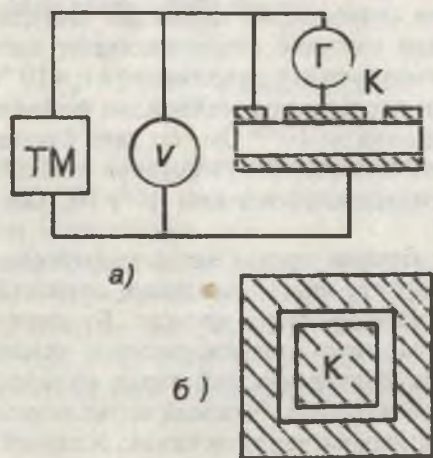
$$\bar{I} = I_u \frac{\tau_p}{T} \quad (1.10)$$

ифода билан топилади. Бу ерда: I_u — импульс кучланиши таъсир этаётган вақтдаги ўтказувчанлик токи. (1.10) фор-мула орқали I_u ни топиб, импульс кучланиши U_u ни бил-ган ҳолда тўла қаршилиқ $R = U_u / I_u$ ҳисобланади ва (1.2) формула бўйича солиштирма қаршилиқ аниқланади.

Бу усул билан импульс кучланишининг амплитудаси $U_u = (1 \div 2)$ кВ, импульснинг давомийлиги $\tau_p = 10^{-6}$ с $T/\tau = 10$ нисбатда бўлган импульс ток манбаидан фойдаланиб, со-лиштирма қаршилиқни 10^{+10} Ом · см гача ўлчаш мумкин. Саноатда ишлаб чиқарилган ўзгарувчан ток кўприклари билан солиштирма қаршилиқни $10^6 \div 10^7$ Ом · см гача ўлчаш мумкин.

в. Сиртнинг сирқиш токи. Одатда яримўтказгичли на-муналарнинг сиртига яқин соҳасидаги солиштирма қар-шилиги ҳажмидагидан фарқ қилади. Бу сирт соҳасида заряд ташувчиларнинг концентрацияси ҳажмидагидан катта ёки кичик бўлган ҳажмий заряд соҳасининг мав-жудлиги билан боғлиқдир. Ҳажмий заряд соҳасида заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги кичик. Ҳажмий заряд со-ҳасининг қалинлиги намуна кўндаланг кесимининг чи-зиқли ўлчовларининг улушларини ташкил этиб, экран-лаш узунлиги тартибида бўлади. Агар бу соҳада концент-

рация ҳажмдагидан катта фарқ қилмаса, сирт соҳасидаги қаршиликнинг ўзгаришини ҳисобга олмаслик мумкин. Агар заряд ташувчилар концентрацияси сирт соҳасида ҳажмдагидан кўп марта ортиқ (юқори Ом ли намуналарда пайдо бўлиш эҳтимоли катта) бўлса, яхши ўтказувчанликка эга бўлган сирт соҳасидан токнинг кўп оқишига, яъни токнинг сирт бўйлаб оқишига олиб келади. Сиртдан оқаётган ток намуна қаршилигини камайтиради ва солиштирма қаршиликнинг кичиклашишига олиб келади, шунинг учун ўлчов пайтида сирт бўйлаб оқаётган ток таъсирини йўқотиш керак. Модомики сиртдан ва ҳажмдан оқаётган тоқлар нисбати намунанинг шаклига, ўлчовига боғлиқ экан, унинг узунлигини камайтириб, кўндаланг кесимини орттириб, сирқиш токининг кичик бўлишига эришиш мумкин. Бундай йўл билан фақат катта намуналарда эришиш мумкин. Сирт сирқиш токининг солиштирма қаршиликка таъсирини камайтирувчи бошқа усули ҳам бор бўлиб, бунда намунада бир-биридан (изоляцияланган) ажралган икки контакт олинади, яъни кўндаланг кесимининг четига яқин ҳимоя ҳалқасидан иборат 0-контакт ва марказига туташ К контакт олинади (1.3-расм). Бу контактлар орасидаги масофа намуна



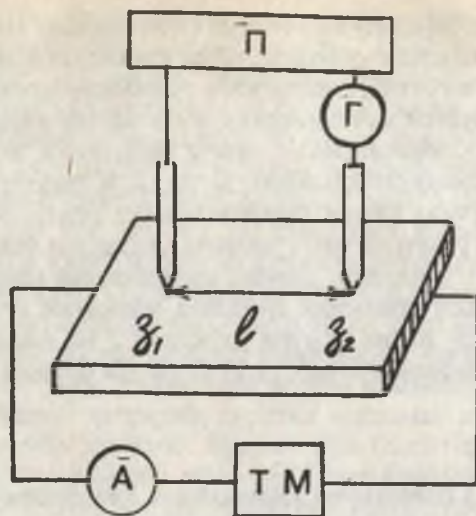
1.3-расм. Солиштирма қаршиликни ҳимоя ҳалқаси билан ўлчаш схемаси (а), намуна устки кўндаланг кесимининг кўриниши (б).

узунлигидан жуда кичик. Иккинчи кўндаланг кесим юзидан яхлит контакт олинади. Ток ўлчайдиган асбобнинг қаршилиги кичик бўлганда, унга тушаётган кучланиш намунага қўйилган кучланишдан жуда кичик бўлади. Шунинг учун K контактнинг ҳимоя ҳалқасини эквипотенциал контактлар деб ҳисоблаш мумкин. Қўрилаётган ҳолда сирт токи фақат ҳимоя ҳалқаси орқали оқади. Марказий контактдан ўтаётган ток у намуна ҳажмидан ўтади ва у G асбоб билан ўлчанади. Демак, солиштирма қаршилиқни ҳимоя ҳалқаси ёрдамида аниқлаш марказий туташ контакт юзаси S_x ни ва намуна узунлиги L ни билган ҳолда ток ва кучланишни ўлчаб, (1.2) формула орқали ҳисобланади.

1.2-§. Солиштирма қаршилиқни ўлчашнинг бир ва икки зондли усуллари

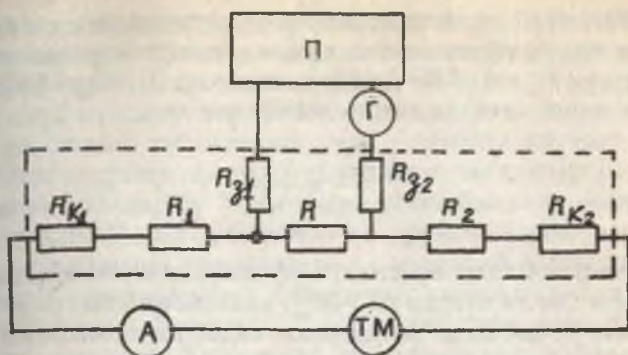
а. Икки зондли усул билан ρ ни аниқлаш.

Солиштирма қаршилиқни юқорида қўрилган тўла қаршилиқ бўйича аниқлаш усулида Ом контактнинг олиними кераклигини кўрган эдик. Контакт қаршилиқлари катта бўлганда бу усул солиштирма қаршилиқни ҳақиқий қийматига нисбатан орттириб беради. Бу камчилиқни зонд усуллари билан ўлчашда йўқотиш мумкин. Солиштирма қаршилиқни ўлчашнинг икки зондли усулининг чизмаси 1.4-расмда келтирилган. Унда намунанинг кўндаланг кесими юзасига K_1 ва K_2 Ом контактлари ўтказилган ва унинг сиртига бир-биридан l масофада бўлган иккита Z_1 ва Z_2 нуқтавий зондлар ўрнатилган. Зондлар сифатида ўткир учли қаттиқ металл (вольфрам, осмий, молибден) симлар ёки қотишмалардан ясалган симлар, карбид, вольфрам ва ВК ишлатилади. Солиштирма қаршилиқнинг қиймати қуйидагича аниқланади. Намунадан ток манбаи (ТМ) орқали I ток ўтказилади ва у A — амперметр билан ўлчанади, зондлар орасидаги кучланиш потенциометрда компенсация усулида ўлчанади ва унда гальванометрдан оқаётган токнинг таъсирини йўқотишга эришилади. Бу ҳолатда потенциометрдаги кучланиш U_n икки зонд орасидаги намуна бўлагига тушган кучланиш U га тенг бўла-



1.4-расм. Солиштирма қаршиликни икки зондли усул билан ўлчаш схемаси. П — потенциометр, Г — гальванометр.

ди. Икки зондли усулда ҳам ρ (1.2) формуладан фойдаланиб аниқланади. Бу ифодага кирган катталиклар R — намунанинг икки зонд орасидаги қисмининг қаршилиги, S — намуна кўндаланг кесимининг юзаси, l — зондлар орасидаги масофа. Икки зондли усул билан U компенсация усулида ўлчанганда, контакт қаршилигининг ўлчови натижаларига таъсири тўла йўқотилади дейилган фикрни қандай ҳолатда ўринли бўлишини аниқлайлик. Икки зондли усул билан ўлчашда намунанинг эквивалент чизмасини кўрайлик (1.5-расм). Чизмада R_{x1} , R_{x2} , K_1 ва K_2 контактлар қаршилиги, R_{z1} ва R_{z2} — зондлар қаршилиги, R_1 — зонд Z_1 ва K_1 контакт орасидаги намуна қисмининг қаршилиги, R_2 зонд Z_2 билан K_2 контакт орасидаги намуна қисмининг қаршилиги. R_{x1} , R_{x2} , R_{z1} ва R_{z2} — қаршиликлар металл-яримўтказгич чегарасида оксид қатламини ва потенциал тўсиқ қатламини ҳосил бўлиши билан пайдо бўлиши мумкин. Кичик юзали металл зонд билан яримўтказгич контактлашганда, қаршилиги катта бўлмаган қатлам ҳосил бўлмаса ҳам контакт қаршилиги катта бўлади. Зонд-



1.5-расм. Икки зондли усул билан солиштирма қаршиликни ўлчашда намунанинг эквивалент схемаси.

лар занжирида Кирхгоф қондасига кўра қуйидаги ифода-ни ёзамиз:

$$IR = i_r(R_{з1} + R_{з2} + R + R_r) + U_{\pi} \quad (1.11)$$

Бу ерда: R_r — гальванометрнинг ички қаршилиги, i_r — ундан оқаётган ток. (1.11) формуладан кўринадики, потенциометрдаги кучланиш ва намунанинг зондлар қисмига тушаётган кучланиш (IR) дан $R_{з1}$, $R_{з2}$, R , R_r — қаршиликларда i_r — ток ҳосил қилган кучланиш йиғиндиси билан фарқланади. $i_r = 0$ бўлганда улардаги кучланиш нолга тенг бўлиб, (1.10) формулада инобатга олинмайди. Шундай қилиб, зондлар қаршилигининг солиштирма қаршиликка таъсири кучланишни компенсация усули билан ўлчаганда йўқотилади, чунки ўлчов пайтида зондлардан оқаётган ток нолга келтирилади: бу идеал ҳолатга тўғри келади. Ҳар қандай асбоб занжирда токнинг йўқлигини қандайдир хатолик билан кўрсатади. Қайд қилиниши мумкин бўлган кичик ток $i_{r,\min}$ га тенг. Зондлар занжирдан оқаётган ток $i_r < i_{r,\min}$ бўлади, тасодифан $i_r = 0$ бўлиши ҳам мумкин. (1.15) формула билан аниқланаётган солиштирма қаршиликнинг хатолиги:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{i_{r,\min}(R_{з1} + R_{з2} + R + R_r)}{IR} \quad (1.12)$$

Зондлар қаршилиги солиштира қаршилиқ натижа-
рига таъсир кўрсатмаслиги учун уларнинг қаршилиги йи-
ғиндиси $R_{31} + R_{32} \ll R + R_0$ бўлиши керак. $R_{31} + R_{32} \ll R$ бўлган-
да нисбий хатолик минимум бўлади ва:

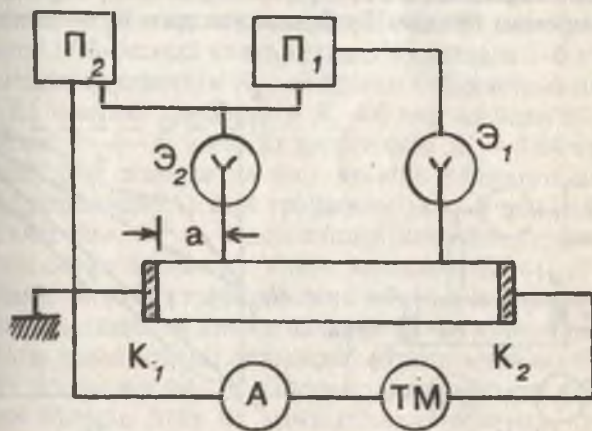
$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{i_{r, \min}}{I}$$

Агар зондлар орасидаги кучланиш ички қаршилиги
юқори Ом ли бўлган ($R_V > 10^{10}_{\text{ом}}$) вольтметр-электромтрлар
билан ўлчанганда зондлардан оқаётган тоқларнинг ки-
чик бўлиш шартини, яъни зондлар қаршилигига тушаёт-
ган кучланишни эътиборга олмаса бўладиган шароитни
таъминлаш мумкин. Бу ҳолда вольтметр билан

$$U_V = \frac{IR}{1 + \frac{(R_{31} + R_{32} + R)}{R_V}} \quad (1.13)$$

кучланиш ўлчанади. Бу ерда: R_V — вольтметрнинг ички
қаршилиги. $R_{31} + R_{32} + R \ll R_V$ бўлганда $U_V = IR$ бўлади. Бун-
дан (1.2) формула орқали солиштира қаршилиқ ҳисоб-
ланади. Агар кучланишни ўлчашда уни автоматик ком-
пенсацияланмаса, вольтметр билан кучланишни ўлча-
ш тез бўлади. Одатда юқори Ом ли намуналарда солиштир-
ма қаршилиқни ўлчашда электромтрлар ишлатилади. По-
тенциомтр ишлатилганда у ноль асбоби сифатида қўлла-
нилади. K_1 ва K_2 контактларнинг ρ ни аниқлашга таъсири
тўғрисида шуни айтиш мумкинки, агар бу контактлар
қаршилиги нольга тенг бўлмаса, намунанинг умумий қар-
шилиги ошади ва натижада тоқ камаяди. Лекин тоқ ампер-
метр билан ўлчангани учун у ҳеч қандай таъсир кўрсат-
майди. Юқорида кўрсатилганидек, агар бу контактлар-
дан тоқ ўтганда контакт соҳасида заряд ташувчилар
концентрациясини инжекция, эксклюзия, экстракция, ак-
кумуляция туфайли ўзгаришга олиб келса, солиштира
қаршилиқ ўзгариши мумкин. Концентрация ўзгарадиган
соҳа кенглиги заряд ташувчиларнинг икки, уч диффузи-
он узунлигига тенг бўлади, одатда ρ кичик электр майдон
кучланганлигида ўлчанади.

Зондларни K_1 ва K_2 контактлардан ($a_1 \geq 3L$) шу масофадан каттароқ бўлган масофада жойлаштириб, хатолик пайдо бўлишидан қутулиш мумкин. Бу ҳолда диффузион узунликни камайтириш мумкин. Концентрациянинг ўзгариш таъсирини сусайтириш учун намунада контакт соҳасининг сиртига йирик кукунсимон моддалар билан ишлов берилади, бу билан сирт рекомбинация тезлиги оширилади. Ўлчов асбоблари ва қурилмаларни электр билан таъминлаш тармоғидаги ва уни ўраб олган атроф фазодаги электромагнит майдонлар қурилмада ўзгарувчан қўшимча (кераксиз) — (паразит) сигналлар пайдо қилиши мумкин. Ўзгарувчан электромагнит майдонлар ўзгарувчан сигнал ҳосил қилади. Бундан ўзгарувчан сигналнинг ўзгариш даври ўлчов асбобларини қайд қилиш вақтидан жуда кичик бўлганда, катта частотали сигнални қайд қилмаслиги, ўлчов асбобларининг инерционлиги тўғайли эса юқори частотали сигналларни қайд қилмаслиги келиб чиқади. Лекин бу ундай эмас. Агар металл-яримўтказгич контакти чизикли бўлмаган вольт ампер характеристикасига эга бўлса, ундан оқаяётган ўзгарувчан токнинг доимий ташкил этувчиси вужудга келади. Уни ўлчов асбоблари қайд қилади ва ўлчашни қийинлаштиради. Ўлчанаётган фойдали сигнал кичик бўлгани сари, фойдасиз

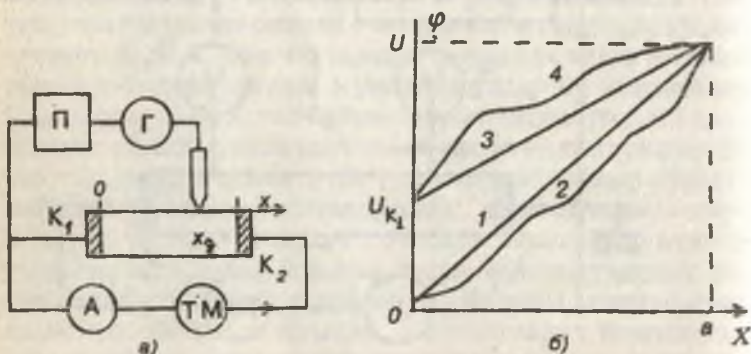


1.6-расм. Икки электрометр (потенциометр) билан солиштирма қаршилиқни ўлчаш схемаси.

сигнални йўқотиш қийинлашади. Симларни экранлаштириш ва тажриба қурилмасини ерга улаш билан фойдасиз сигналларни камайтириш мумкин. Икки зондли усул билан ρ ни ўлчашда фойдасиз сигналларни камайтиришнинг самарали усулидан бири 1.6-расмда келтирилган. Бу схемани 1.4-расмда келтирилган схемадан фарқи шундаки, бунда иккита потенциометр ва иккита нуль индикатор бор. Нуль индикатор сифатида электрометр ишлатилади. Π_1 ва Π_2 потенциометрларда кучланишни ўзгартириб, икки электрометр $\mathcal{E}_1$ ва $\mathcal{E}_2$ да нульга эришилади. Бундай ҳолатда Π_1 кучланиш зондлар орасидаги кучланишга тенг бўлади. Мана шуларни билган ҳолдагина ρ аниқланади. Потенциометр Π_2 нинг вазифаси шундаки, жуда катта бўлмаган ички қаршилиги орқали зондлар орасидаги кучланишни ўлчайдиган занжирни ерга улайди. Унинг ёрдамида намуна ва монтаж симларини экрансиз ҳолатда солиштирма қаршиликни 10^{12} Ом. см гача ўлчаш мумкин. У яримўтказгичли намуналарнинг хоссаларини текширишда кенг қўлланилади.

6. Бир зондли усул.

Бир зондли усул билан солиштирма қаршиликни ўлчаш усули икки зондли усулнинг бир кўринишидир (1.7а-расм). Бунда потенциометрнинг бир учи ток ўтказувчи контактлардан бири, масалан, K_1 билан уланади, сиртдаги зонд кўзгалувчан бўлади. Бу билан зонддан K_1 — контактга



1.7-расм. Бир зондли усул билан солиштирма қаршиликни ўлчашнинг схемаси (а), намуна бўйлаб потенциалнинг тақсимланиш турлари (б).

бўлган масофани ўзгартириш мумкин бўлади. Масофанинг икки қийматида зонд билан K_1 — контакт орасидаги кучланиш ўлчаниб, солиштирма қаршилик (1.2) га кўра қуйидаги формула билан аниқланади:

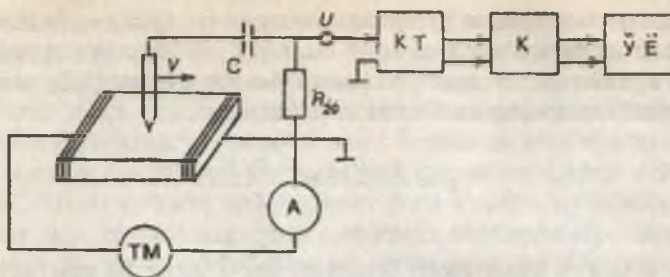
$$\rho = \frac{S}{l} \cdot \frac{U(X_{s1}) - U(X_{s2})}{X_{s1} - X_{s2}} \quad (1.14)$$

$U(x)$ — намунадан ўтаётган ток I нинг K_1 контактдан зондгача бўлган қисмида ҳосил қилган кучланиши. Бунда контактнинг солиштирма қаршилик натижасига таъсири икки зондли усул каби бўлади. Бу усул намуналарни бир жинслиликка текширишда, бир жинсли бўлмаган намуналарда солиштирма қаршиликни намуна узунлиги x бўйича тақсимотини аниқлашда, контактларни Ом контактига текширишда, ток ўтувчи контактларнинг қаршилигини топишда қўлланиши мумкин.

$U(x)$ ни дифференциаллаб қуйидагини топамиз:

$$\rho(x) = \frac{S}{l} \frac{dU(x)}{dx} \quad (1.15)$$

Намунанинг берилган нуқтасидаги солиштирма қаршилик $U(x)$ графикнинг x нуқтасига ўтказилган уринманинг тангенсига пропорционал. $U(x)$ ни масофага боғлиқлиги 1.76-расмда келтирилган. Чизмадаги 1-боғланиш K_1 контакт қаршилиги $R_{K_1} = 0$ бўлган бир жинсли намунага; 2- K_1 контакт қаршилиги $R_{K_1} = 0$ бир жинсли бўлмаган намунага; 3—4— K_1 контакт қаршилиги $R_{K_1} \neq 0$ бўлган мос равишда бир жинсли ва бир жинсли бўлмаган намуналарга тегишлидир. 3 ва 4 графикларда $x=0$ да кучланишнинг сакраши U_{K_1} — кучланишни контакт қаршилигига тушиши билан боғланган. Унинг катталиги $R_{K_1} = U_{K_1}/I$ билан топилади. Контакт қаршилигини вужудга келтирувчи қатламнинг қалинлиги кичик ва зонд билан қаршиликни бу соҳадаги тақсимотини текшириб кўриш мумкин бўлмайди. Бу боғланишлар K_2 контакт Ом контакти бўлганда ўринли бўлади. Агар бу контакт омик бўлмаса, $x=a$ да кучланишнинг сакраши кузатилиши керак. Одатда контактларнинг хусусияти вольт-ампер характеристикасини ўрганиш орқали аниқланади.



1.8-расм. Бир зондли усул билан $\rho(x)$ ни автоматик ўлчаш схемаси:
 V — зонд тезлиги, KT — катод такрорлагич, K — кучайтиргич,
 $\bar{Y}\bar{E}$ — ўзи ёзгич.

Бир зондли усулни яримўтказгич монокристалларининг кичик соҳаларидаги нуқсонларини ўрганишга қўлашда зонд V — тезлик билан сирт бўйлаб ҳаракатланади. Зонд билан контактлардан бири орасида пайдо бўлган кучланишни дифференциалловчи RC занжирга берилади. Шу сабабли конденсатордан ўтаётган ток унга тушаётган кучланишнинг ҳосиласига пропорционал:

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt} \quad (1.16)$$

Дифференциалловчи занжирнинг доимий вақти, $\tau = RC$ етарли кичик бўлганда R — қаршиликка тушган кучланиш

$$U_R = i_c R = RC \frac{dU_c}{dt} = CR \frac{dU_c}{dx} = R \cdot c \cdot V \frac{dU_c}{dx} = R \cdot C \cdot V \frac{1}{S} \rho(x) \quad (1.17)$$

ифода билан аниқланади. Ўзиёзар асбоб билан қайд қилинган R қаршиликдаги кучланиш солиштирма қаршиликка пропорционал бўлиб, τ нинг намуна бўйича тақсироти қўрсатади. Усулнинг нобиржинслиликни қайд қилиш қобилияти қўзғалувчи зонд диаметрига, уни қўзғалиш тезлигига, V га, асбобларнинг сезгирлигига ҳамда RC — занжир параметрига боғлиқ. Бир зондли усулда ўртача солиштирма қаршилик зонд билан намуна кон-

тактлашиш юзасига мос келади, бундан кўринадики, бир жинсли бўлмаганликнинг энг кичик кўлами зонднинг контактлашиш диаметри d дан ошмайди. Ўлчаш чизмасининг инерционлиги икки доимий вақтнинг энг каттаси билан аниқланади: занжирнинг доимий вақти $RC=\tau$ ёки қайд қилувчи асбобларнинг доимий вақти τ_1 дир. Бу катталиклар зонднинг сўрилиш тезлигини чегаралайди. Ҳар бир доимий вақт $RC=\tau$ ёки τ_1 d — масофанинг зонд ўтиш вақтидан кичик бўлиши керак:

$$\frac{d}{V} > RC \quad \text{ва} \quad \frac{d}{V} > \tau_1 \quad (1.18)$$

Бундай ҳолда, яримўтказгичнинг контакт қаршилиги кичик ва зонд ҳаракатланганда ўзгармайди деб фараз қилинган. Ҳақиқатда, агар контакт қаршилиги фақат контактнинг тарқалган қаршилиги билан аниқланса (1.8-§ га қаранг), у ҳолда радиуси ~ 10 мкм бўлган контакт учун солиштирма қаршилиги 100 Ом. см бўлган намунада контакт қаршилиги 20 кОм га етади. Зонд намуна бўйлаб ҳаракатланганда кўчиш қаршилиги, зонд билан яримўтказгичнинг ҳар бир нуқтада контактлашиш юзасининг ўзгариши туфайли кучли ўзгариши мумкин. Бунда чизма бир вақтда солиштирма қаршилиқнинг намуна бўйича тақсимланишини ва контакт қаршилигининг тебранишини қайд қилади, натижалар эса қайтарилмайди. Контакт қаршилигини тўғри ўлчашнинг зарурий шарти

$$R_{\text{ксп}} \gg R_x + \Delta R$$

бўлади. $R_{\text{ксп}}$ — қайд қилувчи қурилманинг тўла кириш қаршилиги, ΔR — контакт қаршилигининг ўзгариши. Шунини таъкидлаш керакки, бир зондли усул билан ўзгармас ва ўзгарувчан тоқларда солиштирма қаршилиқни ўлчаш мумкин. Ўзгарувчан тоқ билан ўлчашда зонддан кучланишни олдин ажратувчи конденсатор орқали катодли такрорлаш қурилмасига берилади (бунда катта қаршилиқли кириш сигналини кичик қаршилиқли чиқиш сигнаliga амплитудасини ўзгартирмай айлантириб беради), сўнг сигнал тўғриланади ва дифференциалловчи занжирга берилади. Бу усул билан намуналарда солиштирма

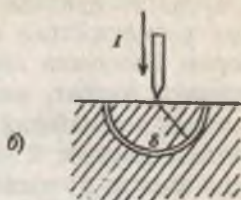
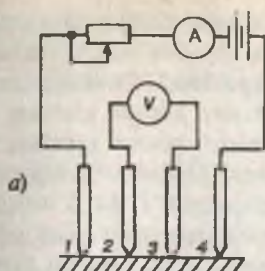
қаршилиқ 250 Ом. см гача бўлган оралиқда ўлчанганда, хатолик 5% дан ошмайди. Солиштира қаршилиги катта бўлган намуналарни ўлчашда контакт қаршилиги ошиши билан боғлиқ хатолик пайдо бўлади.

Бу усул билан солиштира қаршилиқни ўлчашнинг қуйи чегараси унинг қизиши билан чекланган ва 0,005 Ом. см тартибидадир. Кўзгалувчан зонд сифатида қаттиқ материаллар (масалан, карбид-кремний) симлари ҳамда диаметри 2 мм ли думалайдиган пўлат шардан ясалган зонд манипулятори ишлатилади.

1.3-§ Тўрт зондли усул

Яримўтказгичли намуналарнинг солиштира қаршилиқларини ўлчаш усулларида бир қанча афзалликларга эга бўлган 4-зондли усул кенг қўлланилади. Бунга ўлчаш (метерологик) кўрсаткичининг юқорилигини, ўлчаш учун намуналарга Ом контактларини олиш талаб этилмаслигини, бир томони ясси текисликдан иборат шакли ва ўлчамлари ҳар хил бўлган ҳажмий яримўтказгич намуналарини ҳамда қўп қаватли структураларда эпитаксиал, диффузион қатлам солиштира қаршилиқларини ўлчаш мумкинлигини кўрсатиш мумкин. Бу усул билан ҳажмий монокристалларда, пластинка (тахтасимон) намуналарида солиштира қаршилиқни $10^{-4} + 10^3$ Ом · см оралиқда, эпитаксиал, диффузион сирт қаршилигини $1 + 5 \cdot 10^5$ Ом оралиқда ўлчаш мумкин.

Тўрт зондли усулнинг бир кўриниши 1.9-расмда кўрсатилган. Бир томони ясси текис сирт билан чегараланган ярим чексиз намунанинг сиртига бир чизикда жойлашган тўртта учи ингичкалаштирилган металл электродлар (зондлар) жойлаштирилган. Икки четки зонддан ток ўтказилади ва икки ўрта зондлардан кучланиш (зондлар орасидаги потенциаллар айирмаси) ўлчанади. Бу икки катталик — ток ва кучланиш орқали солиштира қаршилиқ аниқланади. Усул назарияси Вальдес томонидан 1954 йилда яратилган бўлиб, яримўтказгич ва зондни кичик юзаси билан контактлашган нуқтасидан токнинг яримўтказгичда тарқалишига асосланган.



1.9-расм. Яримчексиз намуналарда солиштирма қаршилиқни тўрт зондли усул билан ўлчаш схемаси (а), нуқтавий зонд модели (б).

Солиштирма қаршилиқ ρ ни ток (1) ва кучланиш (U) билан боғланган ифодасини топиш учун ярим чексиз (ўлчамлари зондлар орасидаги масофа S дан жуда катта, ($a, b, d \gg S$) намунанинг ясси сирти билан контактлашган алоҳида олинган нуқтавий зонд чегарасидан ярим-ўтказгичга ток тарқалиш масаласини ечиш керак (1.9б-расм). Ярим чексиз намуналарда нуқтавий контактлашган зонд билан яримўтказгич чегарасидан тарқалаётган ток, потенциал тақсимооти сферик симметрияга эга бўлади. Бу ҳол учун Ом қонуни

$$j = \sigma E = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\varphi}{dr} \quad (1.19)$$

ва ток зичлигининг

$$j(r) = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1.20)$$

ифодаларидан фойдаланиб, намунада потенциал тақсимланишини топамиз:

$$\varphi(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} + A \quad (1.21)$$

бу ерда, A -ўзгармас катталиқ.

Потенциал ишораси ток йўналиши билан аниқланади, исталган нуқтадаги потенциал ҳар бир ток зондларининг ҳосил қилган потенциалларининг йиғиндисидан иборат. Намунага кираётган токнинг ҳосил қилган потенциали мусбат, чиқаётган токнинг ҳосил қилган потенциали эса манфий бўлади. Демак, ўлчов зондларининг контактларидаги 2 ва 3 потенциаллари 1 ва 4 зондлар ҳосил қилган потенциаллар йиғиндисига тенг. Ток йўналишини, яъни 1 ва 4 ток манбалари ҳосил қилган потенциаллар ишораларини назарда тутганда 2 ва 3 нуқталардаги потенциаллар ифодаси (1.21) га кўра қуйидаги кўринишни олади:

$$\varphi_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right] + A \quad (1.22)$$

$$\varphi_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_3} \right] + A$$

Икки ички (2 ва 3) зондлардаги потенциаллар айирмасининг кучланиш тушуви U_{23} қуйидагича бўлади:

$$U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} \right] \quad (1.23)$$

Зондлар орасидаги масофалар бир-бирига тенг ($S_1 = S_2 = S_3 = S$) бўлганда (1.23) дан солиштирма қаршилик ифодаси қуйидаги кўринишни олади:

$$\rho = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot 2\pi S \quad (1.24)$$

Тўрт зондли усул билан солиштирма қаршиликни аниқлашда зондларнинг исталган иккитасидан ток ўтказиб, қолган иккитасидан кучланишни ўлчаш мумкин. Бу ҳолда (1.24) ни

$$\rho = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot SF_1^* \quad (1.25)$$

қуринишда ифодалаймиз. Бунда F^* зондларнинг чизмага уланишига қараб, ҳар хил қийматларни қабул қилади (1.1- жадвалга қаранг)

1.1. жадвал

Зондларнинг чизмага уланиши	Ток ўтадиган зондлар	Кучланиш ўлчанадиган зондлар	F_1^* $a, b, d \gg S$	F_2^* $a, b \gg S,$ $d \ll S$
1	1—4	2—3	2π	4,532
2	2—3	1—4	2π	4,532
3	1—3	2—4	3π	15,5
4	2—4	1—3	3π	15,5
5	1—2	3—4	6π	21,84
6	3—4	1—2	6π	21,84

F_1^* — ярим чексиз қалин намуналар учун,
 F_2^* — ярим чексиз юпқа намуналар учун тузатиш коэффициентлари. Жадвал таҳлилидан зондларни чизмага уланишида 1- ва 2-усулларнинг афзаллигини кўрамиз, чунки бундай ҳолларда ўлчанаётган кучланиш энг катта қийматга эришади. Умумий тарзда ярим чексиз намуналарда потенциалнинг тақсимооти, яъни потенциалнинг (r) масофага боғлиқлиги сферик координата системасида ифодаланган Лаплас тенгламаси ечимидан топилади. Биз кўраётган масалада потенциал сферик симметрия бўйича тарқалганлигини ҳисобга олиб, Лаплас тенгламасининг фақат (r) га боғлиқ ҳади кўрилади:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = 0 \quad (1.26)$$

Лаплас тенгламаси (1.26) ни $r = 0$ нуқтада мусбат, масофанинг жуда катта қийматида нольга интилувчи, яъни $r = 0$ да $\varphi(r) > 0$ ва $r \rightarrow \infty$ да $\varphi(r) \rightarrow 0$ чегаравий шартни қаноатлантирувчи ечими

$$\varphi(r) = -\frac{C_1}{r} + A \quad (1.27)$$

бўлади. Интеграллаш доимийси (C_1) $r = r_0$ да майдон кучланганлигини $E(r_0)$ га тенглик шартидан топилади:

$$E(r_0) = j\rho = \frac{I\rho}{2\pi r_0^2} \quad (1.28)$$

Юқорида айтилганидек, $j = \frac{I}{2\pi r_0^2}$, радиуси r_0 га тенг бўлган яримшар сиртидан оқаётган ток зичлигидир. Иккинчи томондан, $\vec{E}(r_0)$ ни (1.27) дан фойдаланган ҳолда қуйидагича ёзиш мумкин:

$$E(r_0) = -\left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=r_0} = \frac{C_1}{r_0^2} \quad (1.29)$$

Бу икки (1.28) ва (1.29) ифодалардан интеграллаш доимийси (C_1)

$$C_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (1.30)$$

бўлади. Интеграллаш доимийси (C_1) ни (1.27) га қўйсақ, худди (1.28) га ўхшаш ифодани оламиз.

Солиштирма қаршилиқни тўрт зондли усул билан ўлчаш шартларини таъкидлаб ўтиш зарурдир.

1. Ўлчов бир жинсли намунанинг ясси текис сиртида бажарилиши керак.

2. Контакт орқали асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг инжекцияси бўлмаслиги керак. Бу сирт рекомбинация тезлиги катта бўлган намуналарда кузатилади, бу сиртта маълум ишлов бериш билан эришилади.

3. Токнинг сирт бўйича сирқиши (оқиши) бўлмаслиги керак.

4. Зондлар намуна сирти билан нуқтада контактлашган бўлиши ва бир чизикда ётиши керак.

5. Ток ўтказувчи зондлар билан яримўтказгич намуна сирти чегарасида зондлар кичик радиусли яримшар кўри-нишида бўлиши керак.

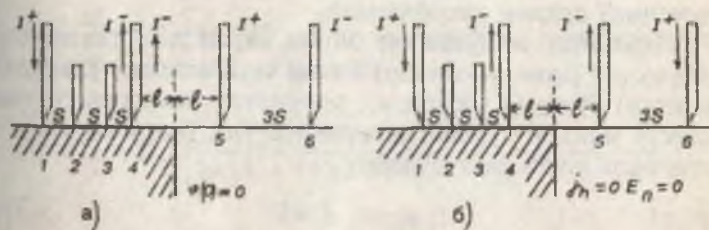
6. Зондларни намуна сирти билан контактлашган юза-сининг диаметри зондлар орасидаги масофадан жуда ки-чик бўлиши керак ($D_z \ll S$).

Шуни эслатиб ўтиш керакки, кўп ҳолларда яримўт-казгич намуналари аниқ геометрик ўлчамларга эга бўла-ди ва зондлар билан намуна қирраси орасидаги масофа l зондлар орасидаги масофа тартиби билан бир қаторда бўлади, бу ток зичлигининг потенциал тақсимотида сфе-рик симметрия қонунининг бузилишига олиб келади. Натижада (1.24) формула билан аниқланган солиштирма қаршилиқнинг қиймати ҳақиқий қийматдан фарқли бўла-ди, яъни хатоликка олиб келади. Шунинг учун умумий ҳолда ρ нинг ҳақиқий қийматини топиш учун яримчек-сиз намуналар учун ўринли бўлган (1.28) формулага на-муна ўлчовларига ва зондларнинг намуна сиртида жой-ланишига боғлиқ бўлган тузатиш функцияси (F) кирити-лади ва (1.24) қуйидагича ифодаланади.

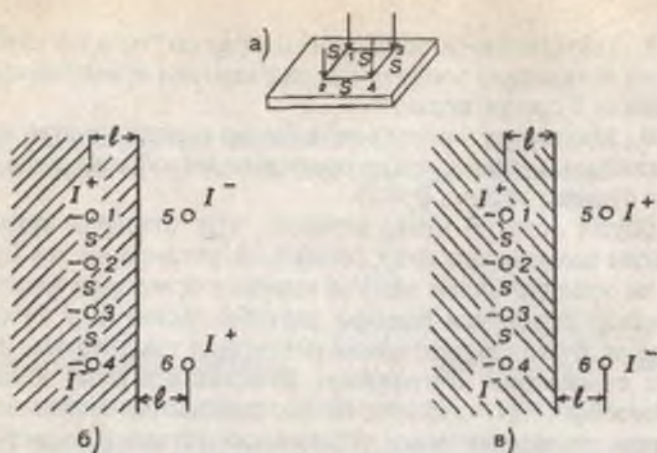
$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi S F(l/S) \quad (1.31)$$

Баъзи бир ҳоллар учун тузатиш функциясини кўриб чиқайлик.

1. Ярмчексиз, яъни геометрик ўлчамлари бир чизиқ-да жойлашган зондлар орасидаги масофадан жуда катта



1.10-расм. Ярмчексиз намунанинг электр ўтказувчан (а), изолятор (б) муҳит билан чегараланган томонига зондлар чизиги тик бўлганда тузатиш функциясини ҳисоблаш модели чизмаси.



1.11-расм. Зондлар чизиғи яримчексиз намунанинг ўтказувчан (б) изолятор (в) муҳит билан чегараланган томонига параллель бўлганда тузатиш функциясини ҳисоблаш модели чизмаси. Солиштирма қаршилиқни тўрт зондли (квадрат) усул билан ҳисоблаш (а).

бўлган намунада ($a, b, d \gg S$) зондлар ётган текислик намунанинг ўтказувчан (металл қатлам — Ом контакти) ёки ток ўтказмайдиган муҳит (масалан, ҳаво) изолятор билан контактлашган чегарасига тик ва параллел бўлсин. Биринчи ҳолда зондларнинг четки зонди, иккинчи ҳолда зондлар текислиги намуна чегарасидан l масофада жойлашган (1.10 ва 1.11-расм).

Тузатиш функцияларини электростатикада кенг қўлланиладиган кўзгуда тасвир усули (метод зеркального изображения) орқали ҳисобланади.

Маълумки, намунанинг бирон сирти ток ўтказмайдиган муҳит (ҳаво, изолятор) билан чегараланган (контактлашган) бўлса (1.10б-расм), шу сиртда ток зичлигининг, электр майдон кучланганлигининг тик (нормал) ташкил этувчиси нолга тенг бўлади.

$$\varphi_n = 0; E_n = 0 \quad (1.31a)$$

Агар намуна сирти ўтказувчан муҳит (Ом контакти) билан чегараланган бўлса, шу сиртда унинг потенциали нолга тенг бўлади (1.11а-расм):

$$\varphi(0)=0$$

$$(1.316)$$

Кўзгуда тасвир усули билан тузатиш функцияларининг аналитик ифодасини аниқлаш учун намуна сирти қандай муҳит билан контактлашганлигига қараб (1.31а) ёки (1.316) шартларни бажарилишини таъминловчи симметрик жойлаштирилган мавҳум нуқтавий ток манбалари жойлаштирилади ва потенциал зондлар контактлашган нуқталаридаги натижавий потенциалларини ҳамда икки зонд орасидаги потенциаллар айирмаси (потенциал тушуви)ни топиш керак бўлади. Мисол учун энг содда ҳолни кўрайлик. Зондлар бир чизикда жойлашган бўлиб, улар орасидаги масофага тенг бўлсин ($S_1=S_2=S_3=S$). Зондлар (ётган текислик) чизиги ток ўтказмайдиган муҳит билан чегараланган қиррасига тик бўлиб, четки зонди чегарадан l масофада жойлашсин. Намунанинг қолган томонлари S дан жуда катта масофада бўлиб, потенциал тақсимотига таъсир кўрсатмайди (1.10-расм). Бу ҳолда қаралаётган ён сиртидан l — масофага симметрик жойлаштирилган бир хил ишорали мавҳум нуқтавий (5 ва 6) ток манбалари (1.31а) шартни бажарилишини таъминлайди. Потенциал 2 ва 3 зондларда тўртта (1, 4, 5, 6) нуқтавий ток манбалари ҳосил қилган натижавий потенциаллари

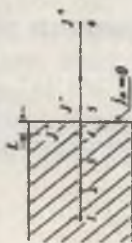
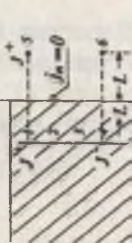
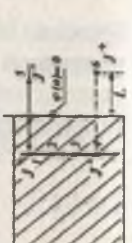
$$\varphi_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{2S} - \frac{1}{2S+2l} + \frac{1}{5S+2l} \right) + A \quad (1.32)$$

$$\varphi_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2S} - \frac{1}{S} - \frac{1}{S+2l} + \frac{1}{4S+2l} \right) + A \quad (1.33)$$

бўлади. Икки ички (2 ва 3) зондлардаги потенциаллар айирмаси — кучланиш тушуви

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I\rho}{2\pi S} \left(1 + \frac{1}{1+2l/S} - \frac{1}{2+2l/S} + \frac{1}{5+2l/S} \right) \quad (1.34)$$

кўринишни олади. (1.34) дан солиштирма қаршилиқни (1.30) кўринишда ифодаласак, тузатиш функцияси

№	Зондларнинг жойланиши	Бир чизиқда жойлаштирилган 4 зондди усулнинг тузатиш функциялари
1		$F_1 = \left(1 + \frac{1}{1 + 2l/S} - \frac{1}{2 + 2l/S} - \frac{1}{4 + 2l/S} + \frac{1}{5 + 2l/S} \right)^{-1} \quad (1.35)$
2		$F_2(l/S) = \left(1 + \frac{1}{2 + 2l/S} - \frac{1}{4 + 2l/S} - \frac{1}{1 + 2l/S} - \frac{1}{5 + 2l/S} \right)^{-1} \quad (1.36)$
3		$F_3(l/S) = \left[1 + \frac{2}{\sqrt{1 + (2l/S)^2}} + (1 + (l/S)^2)^{-\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (1.37)$
4		$F_4(l/S) = \left[1 - 2 \cdot (1 + (2l/S)^2)^{-\frac{1}{2}} + (1 + (l/S)^2)^{-\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (1.38)$

$$F_1(l/S) = \left(1 + \frac{1}{1+2l/S} - \frac{1}{2+2l/S} + \frac{1}{4+2l/S} + \frac{1}{5+2l/S} \right)^{-1} \quad (1.35)$$

бўлишлигини кўрамиз. Юқорида қайд этилган бошқа ҳолатлар учун тузатиш функциялари, мавҳум нуқтавий ток манбаларининг жойланиши 1.2а-жадвалда, уларнинг ҳар хил l/S учун қийматлари 1.2-жадвалда келтирилган.

1.2б-жадвал

l/S	$F_1(l/S)$	$F_2(l/S)$	$F_3(l/S)$	$F_4(l/S)$
0	1,82	0,62	0,5	∞
0,2	1,365	0,79	0,533	8,07
0,5	1,182	0,882	0,658	2,08
1	1,06	0,947	0,842	1,232
2,0	1,01	0,992	0,965	1,038
5,0	1,004	0,996	0,997	1,003
10,0	1,005	0,9995	0,9996	1,004

Жадвал таҳлилидан кўринадики, $l \geq 3S$ бўлганда ҳамма кўрилган ҳолатлар учун тузатиш функциялари бирга яқин. Шунинг учун уни инобатга олиш шарт бўлмайди. Намуналарда солиштирма қаршиликни аниқлашда зондларнинг томони S бўлган квадрат учига жойлаштирилган усул билан ҳам аниқлаш мумкин (1.11а-рasm). Бу усул билан солиштирма қаршиликни аниқлашда 1 ва 2 зондлардан 1 ток ўтказилиб, 3 ва 4 зондлар орқали потенциаллар айирмаси аниқланади. Яримчексиз намуналар учун ($a, b, d \gg S$), яъни, намуна ўлчамлари зондлар орасидаги масофадан жуда катта бўлганда солиштирма қаршилик

$$\rho = \frac{U_{34}}{I_{12}} \cdot \frac{2\pi S}{2 - \sqrt{2}} \quad (1.39)$$

формула билан ҳисобланади.

Зондлар яримчексиз намунанинг бирор томонига зондлар орасидаги масофа тартибида жойлашган бўлса, ρ нинг тузатиш функцияси ҳисобга олинадиган

$$\rho = \frac{U_n}{I_{14}} \cdot \frac{2\pi S}{2 - \sqrt{2}} F_s(l/S) \quad (1.40)$$

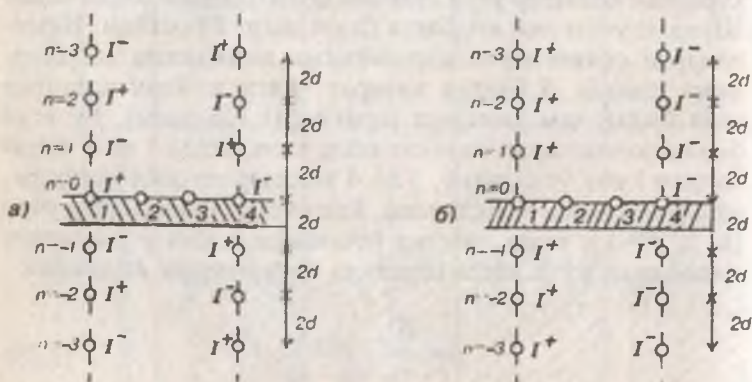
ифода билан аниқланади.

Тузатиш функцияси $F_s(l/S)$ нинг ҳар хил ҳолатлар учун аналитик ифодаси 1.3а-жадвалда келтирилган. Бу функцияларни ҳисоблашлардан кўринадики, бирорта изоляцияланган ёки ўтказувчан қиррадан l — масофада ток зондлари перпендикуляр ёки параллел жойлашганда қирранинг таъсирини ҳисобга оладиган тузатиш функциялари $l/S \geq 3$ да бирга яқин.

Намуна ўлчамлари (эни, бўйи, диаметри) чексиз катта ($a, b \gg S$), лекин қалинлиги зондлар орасидаги масофа тартибидаги пластина кўринишида бўлсин.

Бу намуналарда солиштирма қаршиликни аниқлаш яримчексиз намуналар каби тузатиш функциясини топшига келтирилади. Аммо бу ҳолда ҳам остки, ҳам устки сиртларидаги шартлар бир вақтда бажарилиши керак.

Агар намуна остки сатҳи ток ўтказувчан муҳит (Ом контакти) билан чегараланган бўлса, (1.12а-расм) юқори



1.12-расм. Остки сирти ўтказувчан (а), диэлектрик (б) муҳит билан чегараланган пластинкаларда мавҳум ток манбаларининг жойланиш тартиби.

№	Зондларнинг жойланиши	Квадрат учларига жойлаштирилган 4-зондли усулнинг тузатиш функциялари
1		$F_{S1}(l/S) = (2 - \sqrt{2}) \left(2 - \sqrt{2} + \frac{2}{(1 + 2l/S)} - \frac{2}{\sqrt{1 + (1 + 2l/S)^2}} \right)^{-1} \quad (1.41)$
2		$F_{S2}(l/S) = (2 - \sqrt{2}) \left(2 - \sqrt{2} - \frac{2}{(1 + 2l/S)} + \frac{2}{\sqrt{1 + (1 + 2l/S)^2}} \right)^{-1} \quad (1.42)$
3		$F_{S3}(l/S) = (2 - \sqrt{2}) \left(2 - \sqrt{2} + \frac{1}{(1 + 2l/S)^2} - \frac{2}{\sqrt{1 + (1 + 2l/S)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + (2 + 2l/S)^2}} \right)^{-1} \quad (1.43)$
4		$F_{S4}(l/S) = (2 - \sqrt{2}) \left(2 - \sqrt{2} - \frac{1}{(1 + 2l/S)^2} + \frac{2}{\sqrt{1 + (2 + 2l/S)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (2 + 2l/S)^2}} \right)^{-1} \quad (1.44)$

сиртида $j_z=0$, $E_z=0$, остки сиртида $\varphi=0$ шартлари, агар остки сатҳи ток ўтказмайдиган изолятор муҳит (масалан, ҳаво) билан чегараланган бўлса. 1.126-расм икки сиртида $j_z=0$, $E_z=0$ шартлари бажарилиши керак.

Намунанинг остки сирти ўтказувчан муҳит билан чегараланган ҳолни кўрайлик (1.12а-расм). Бу ҳолда остки сиртида $\varphi=0$ шарт бажарилиши учун ($n=-1$) да намунадан пастда d масофада (I^-) ва (I^+) мавҳум ток манбаларини жойлаштирамиз, лекин устки сиртида $j_z=0$, $E_z=0$ ток зичлигининг нормал ташкил этувчисининг нолга тенглик шарти бузилади, унинг бажарилиши учун (пластина) намуна устки сиртидан ($n=+1$) да $2d$ масофага ($+I$) ва ($-I$) ток манбалари жойлаштирилади, бу билан остки сиртида $\varphi=0$ шарти бузилади, буни қаноатлантириши учун яна $n=2$ да $2d$ масофада ток манбалари киритамиз, бу ток манбаларини жойлаштириш чексиз кўп марта такрорланганда (1.12-расм) намунанинг остки ва устки сиртларида (1.31а, б) шартлар бажарилади. Агар намуна остки сирти изоляцияланган муҳит билан чегараланган бўлса, икки сиртида (1.31а) шарт бажарилиши худди юқоридагига ўхшаш кетма-кетликда мусбат ($+I$) ток манбаи томонида мусбат мавҳум ток манбаларини, манфий ($-I$) ток манбаи томонида манфий мавҳум ток манбаларини чексиз кўп марта такрорлаб жойлаштириш керак (1.126-расм). Аввалдан айтилганидек, 2 ва 3 нуқталардаги потенциаллар чексиз кўп ток манбалари ҳосил қилган потенциаллар йиғиндисига тенг. Ток манбаларининг ишорасини ҳисобга олган ҳолда U_2 ва U_3 лар остки сирти ўтказувчан муҳит билан чегараланган намуна учун (1.2) га кўра

$$U_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n \left\{ [S^2 + (2dn)^2]^{-\frac{1}{2}} - [(2S)^2 + (2dn)^2]^{-\frac{1}{2}} \right\} + A \quad (1.45)$$

$$U_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ [(2S)^2 + (2dn)^2]^{-\frac{1}{2}} - [S^2 + (2dn)^2]^{-\frac{1}{2}} \right\} + A \quad (1.46)$$

ифодаalar билан аниқланади.

Бу икки тенгламадан $U_{23}=U_2-U_3$ ни топиб солиштирма қаршилиқни

$$\rho = \frac{U_{23}}{I} 2\pi S g_1\left(\frac{d}{S}\right) \quad (1.47)$$

кўринишда ифодалаймиз. Тузатиш функцияси қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$g_1\left(\frac{d}{S}\right) = \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left[\left(1 + 4n^2 \frac{d^2}{S^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - \left(4 + 4n^2 \frac{d^2}{S^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \right\}^{-1} \quad (1.48)$$

Юқоридаги усул билан ҳисоблаш икки томонидан ток ўтказмайдиган муҳит (изолятор) билан чегараланган қалинлиги d — бўлган намуна учун тузатиш функцияси

$$g_2\left(\frac{d}{S}\right) = \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 + 4n^2 \frac{d^2}{S^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - \left(4 + 4n^2 \frac{d^2}{S^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \right\}^{-1} \quad (1.49)$$

бўлишини кўрсатади. $g_1(d/S)$ ва $g_2(d/S)$ функцияларни (d/S) нинг ҳар хил қийматларидаги натижалари 1.36-жадвалда келтирилган.

1.36-жадвал

d/S	0,1	0,2	0,5	1	2	3,333	5	10
$g_1(d/S)$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$3,42 \cdot 10^{-1}$	0,228	0,683	0,983	0,988	0,9948	0,9993
$g_2(d/S)$	13,86	6,139	2,78	1,504	1,094	1,0228	1,007	1,00045

Жадвал натижалари таҳлилидан кўринадикки, $g_1(d/S)$ ва $g_2(d/S)$ ларнинг қийматлари $d/S \geq 4$ бўлганда бирга инти-

лади. Лекин $g_2(d/S)$ функция (d/S) нинг 0 дан 0,4 гача бўлган оралиғида (d/S) билан тўғри чизиқли боғланган бўлиб, $(2\ln 2)^{-1} d/S$ га пропорционал бўлади:

$$g_2(d/S) = (2\ln 2)^{-1} d/S \quad (1.50)$$

Шунинг учун $0 \leq d/S \leq 0,4$ оралиғида икки томони ток ўтказмайдиган муҳит билан чегараланганда намунанинг солиштира қаршилиги зондлар орасидаги масофага боғлиқ бўлмайди ва (1.47) га кўра

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I} = 4,53d \frac{U}{I} \quad (1.51)$$

формула билан аниқланади.

1.4-§. Юпқа қатламларда солиштира қаршиликни тўрт зондли усул билан аниқлаш

Агар намунанинг қалинлиги d зондлар орасидаги масофадан жуда кичик ($d \ll S$) ва унинг чегаралари чексизликка узоклаштирилган ($a, b \gg S$) бўлса, 1 ва 4 зондлар соҳасида қалинлик бўйича кучланиш тушувини ҳисобга олмаслик мумкин. Бундай ҳолда токнинг ва потенциалнинг тақсимотини икки ўлчамли деб қараш мумкин. Потенциалнинг цилиндрик симметрия бўйича тақсимланишини ҳисобга олсак, икки ўлчамли Лаплас тенгламасининг (азимут бурчаги θ ни ҳисобга олмаймиз).

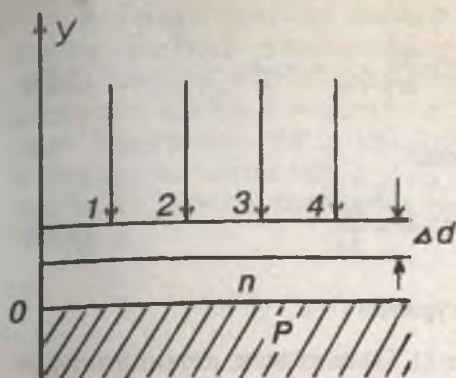
$$\Delta\varphi = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\varphi}{dr} \right) = 0 \quad (1.52)$$

ечимидан потенциал ифодаси

$$\varphi(r) = C_1 \ln r + A \quad (1.53)$$

кўринишни олади C_1 — интеграллаш доимийси, у электр майдон кучланганлигининг $r=r_0$ да $E(r_0)$ га тенг бўлишидан аниқланади. Агар заряд ташувчиларнинг концентра-

1.13-расм. Бир жинсли бўлмаган юпка намуналарда солиштирма қаршиликни қалинлик бўйича тақсимотини улчаш.



цияси ва ҳаракатчанлиги қатлам қалинлиги бўйича y координатасига боғлиқ бўлса (1.13-расм) радиуси r , баландлиги d бўлган цилиндр сиртидан оқётган тула ток ифодаси

$$I = \int_0^d 2\pi r \cdot \vec{E} en(y) \mu(y) dy = 2\pi r \vec{E} \sigma_n = 2\pi r \frac{\vec{E}}{\rho_n} \quad (1.54)$$

бўлади. Бу ерда:

$$\sigma_n = \frac{1}{\rho_n} = \int_0^d en(y) \cdot \mu(y) dy \quad (1.55)$$

сирт солиштирма ўтказувчанлиги, $\rho_n = \sigma_n^{-1}$ эса сирт солиштирма қаршилиги деб юритилади.

Бир жинсли намуналарнинг ҳажмий солиштирма қаршилиги, солиштирма ўтказувчанлиги

$$\rho = \rho_n d; \quad \sigma = \sigma_n / d \quad (1.56)$$

билан аниқланади. Бу формула билан аниқланган катталик солиштирма ўтказувчанликнинг қалинлик бўйича ўрталашган қийматини беради. (1.53) ифодадаги C_1 интеграллаш доимийси (1.54) дан $r=r_0$ да аниқланган

$$E(r_0) = \frac{I \rho_n}{2\pi r_0} \quad (1.58)$$

ва

$$E(r_0) = -\left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=r_0} = -\frac{C_1}{r_0} \quad (1.59)$$

ифодаларнинг тенглигидан

$$C_1 = -\frac{I_{p_n}}{2\pi} \quad (1.60)$$

билан аниқланишини кўрамиз

Шундай қилиб, (1.60) ни (1.53) га қўйсак, потенциал ифодаси

$$\varphi(r) = -\frac{I_{p_n}}{2\pi} \ln r + A \quad (1.61)$$

булади. Бу ерда r ток зондлари, 1 ва 4 дан r_1 ва r_4 масофада жойлашган нуқта координаталари 1 ва 4 зондлардан ўтаётган мусбат ва манфий тоқлар ҳосил қилган 2 ва 3 зондлардаги потенциалларни (1.61) билан ҳисоблаб, $U_{23} = U_2 - U_3$ дан сирт солиштирма қаршилиги ифодаси

$$\rho_n = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}} \approx 4,532 \frac{U_{23}}{I_{14}} \quad (1.62)$$

кўринишда бўлишлигини топамиз. Бир жинсли юпқа қатламларнинг солиштирма қаршилигини умумий ҳолда

$$\rho = \rho_n d = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}} = \frac{U}{I} \cdot d \cdot F_2^* \quad (1.63)$$

кўринишда ифодалаш мумкин. Агар намунадан ҳар хил комбинацияда уланган зондлар орқали ток ўтказилса, (1.63) формуладаги F_2^* коэффициент ҳар хил қийматлар қабул қилиши мумкин (1.1-жадвал). Масалан, 1 ва 2 ёки 3 ва 4 зондлардан ток ўтказиб, 3 ва 4 ёки 1 ва 2 зондлардан потенциаллар айирмаси ўлчанса, $F_2^* = 21,84$ бўлиши аниқланган.

Бир жинсли бўлмаган намуналарда сирт $\rho_n(Y)$ ва ҳажм бўйича солиштира қаршиликлар $\rho(y)$ ни юпқа қатламларда қалинлик бўйича тақсимотини топиш учун қатлам қалинлиги ҳар бир ўлчовдан сўнг Δd га камайтириб борилади. Бир-биридан Δd га камайтириб ўлчанган сирт солиштира қаршиликлари ρ_{n1} , ρ_{n2} орқали Δd га камайтирилган қатламнинг сирт солиштира қаршилигини ва у орқали ρ

$$\rho_n = \rho_{n1} \rho_{n2} / (\rho_{n2} - \rho_{n1}); \quad \rho = \rho_n \Delta d \quad (1.64)$$

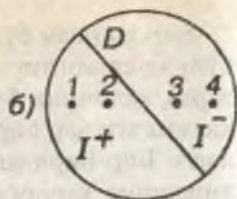
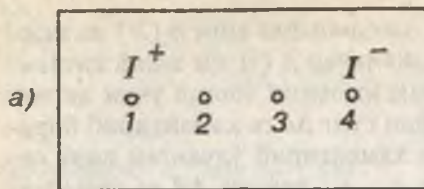
ифодалар билан ҳисобланади.

Юқорида қўрилган ҳолатда юпқа қатламнинг икки сирти изоляцияланган, яъни ток ўтказмайдиган тагликдаги юпқа қатлам деб фарз қилинган. Қалинлиги зондлар орасидаги масофалар тартибида, лекин зондлар жойлашган сирт ўлчамлар чексиз катта ($a, b \gg S$ ёки $D \gg S$) қатламларнинг, яъни пластинка (диск) шаклидаги намуналарнинг солиштира қаршилигини аниқлашда (1.62) формулага қалинликнинг таъсирини ҳисобга оладиган тузатиш функцияси киритилади ва у

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}} f(d/S) \quad (1.65)$$

формула орқали ҳисобланади.

Тузатиш функцияси $f(d/S)$ нинг қиймати жуда юпқа қатламларда, яъни $d/S \leq 0,4$ да бирга яқин (унинг $d/S \geq 0,4$ даги қийматлари 1.4-жадвалда келтирилган). Амалиётда кўп ҳолларда геометрик ўлчамлари чекланган юпқа қатламларда (доира ва пластина кўринишидаги намуналар) солиштира қаршиликни аниқлашга тўғри келади. Бу ҳолда кўзгуда тасвир усулини қўллаб, тузатиш функцияларининг ифодаси топилади. Тузатиш функцияси энг содда ҳоллар — тўғри тўртбурчак шаклидаги пластина, диск кўринишидаги шакллар учун ҳисобланган (1.14-расм). Томонлари a ва b бўлган тўғри тўртбурчакли юпқа ($d \ll S$) намунада зондлар катта томони (a)га параллел чизикда жойлашган бўлса, солиштира сирт қаршилиги



1.14-расм. Геометрик ўлчамлари чекланган юпқа ($d < S$) тўғри тўртбурчак (а), доира — диск (б) шаклидаги намуналарда зондларнинг жойланиши.

$$\rho_n = \frac{U_{23}}{I} \cdot f\left(\frac{a}{b} \cdot \frac{b}{S}\right) \quad (1.66)$$

диаметри D бўлган диск шаклидаги юпқа намунада эса (1.146-расм)

$$\rho_n = \frac{U_{23}}{I} \cdot f\left(\frac{D}{S}\right) \quad (1.67)$$

формулалар билан ҳисобланади.

Тузатиш функцияси $f(D/S)$ зондлар диск марказидан ўтган чизиқда ётса, қуйидаги кўринишга эга бўлади

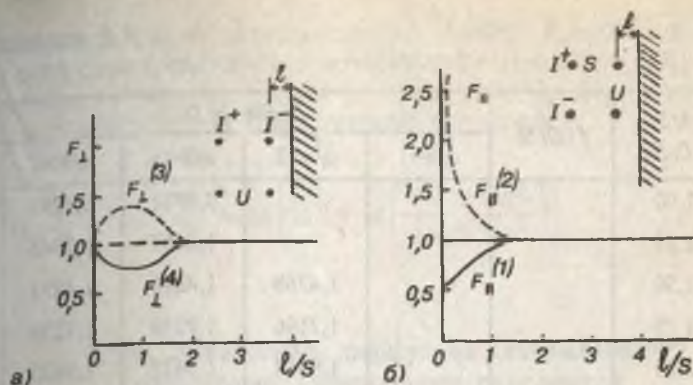
$$f(D/S) = \frac{\pi}{\ln 2 + \ln[(1 + 3(S/D)^2)/(1 - 3S^2/D^2)]} \quad (1.68)$$

Тузатиш функцияси $f(a/b, b/S)$ (b/S) нинг кичик қийматларида

$$f(a/b, b/S) \cdot \frac{S}{b} \approx f(a/b) \approx 1 \quad (1.69)$$

Шунинг учун (1.66) ни қуйидагича ифодалаймиз:

$$\rho_n = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot \frac{b}{S} \cdot f(a/b) \approx \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot \frac{b}{S} \quad (1.70)$$



1.15-расм. Квадрат учларига жойлаштирилган тўрт зондли усули билан ρ -ни аниқлашни ток ўтказмайдиган муҳит билан чегараланган намуналарда ток зондларини туташтирувчи чизиқ параллель (б) ва перпендикуляр (а) бўлган ҳол учун тузатиш функциялари чизмаси.

Бундан солиштирма сирт қаршилигининг тақрибий қийматини аниқлаш мумкин. Тузатиш функцияларининг $f(a/b, b/S)$, $f(D/S)$, $f(a/b)$ сон қийматлари 1.5-жадвалда келтирилган. Агар намунанинг ўлчамлари (эни, бўйи, қалинлиги тўғри тўртбурчак шаклидаги ва қалинлиги d , диаметри D диск шаклидаги намуналарда) зондлар орасидаги масофа тартибида бўлса, унда икки тузатиш функцияларини $f(d/S)$ ва $f(a/b, b/S)$ ёки $f(D/S)$ ҳисобга олган ҳолда ρ аниқланади. Намуна тўртбурчак шаклида бўлганда эса

$$\rho = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot f\left(\frac{d}{S}\right) \cdot f\left(\frac{a}{b}, b/S\right) \quad (1.71)$$

кўринишни олади.

1.4-жадвал

d/S	0,4	0,5	0,714	1	1,25	1,4286	1,666	2
$f(d/S)$	0,9995	0,9974	0,9798	0,9214	0,849	0,7538	0,7225	0,6636

$\frac{b/S}{D/S}$	$f(D/S)$	$f(a/b, b/S)$			
		$a/b=1$	$a/b=2$	$a/b=3$	$a/b \geq 4$
1,00				0,9988	0,9994
1,25				1,2467	1,2248
1,50			1,4788	1,4893	1,4893
1,75			1,7196	1,7238	1,7238
2,00			1,9454	1,9475	1,9475
2,50			2,3532	2,3541	2,3541
3,00	2,265	2,457	2,7000	2,7005	2,7005
4,00	2,929	3,114	3,2246	3,2248	3,2248
5,00	3,362	3,510	3,5750	3,5750	3,5750
2,50	3,927	4,0095	4,0361	4,0362	4,0362
10,00	4,172	4,2209	4,2357	4,2357	4,2357
15,00	4,365	4,3882	4,2947	4,3947	4,3947
20,00	4,436	4,516	4,4553	4,4553	4,4553
40,00	4,508	4,5120	4,5129	4,5129	4,5129
	4,532	4,5324	4,5324	4,5325	4,5325

Намуна диск кўринишида бўлганда

$$\rho = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot \frac{\pi d}{\ln 2} f\left(\frac{d}{S}\right) \cdot f\left(\frac{D}{S}\right) \quad (1.72)$$

бўлади. Квадрат учларига жойлаштирилган тўрт зондли усул билан ўлчанган юпқа қатламларнинг солиштирма қаршилиги

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{2\pi}{\ln 2} d = R_s d = G_s^* \frac{U}{I} d \quad (1.73)$$

формула билан аниқланади. Бу ердаги $R_s = \rho/d$ қатламнинг сирт қаршилиги деб номланади. Диаметри D бўлган доиравий намунада ρ ни ўлчашда зондлар доира марказида жойлашган бўлса, тузатиш функцияси:

$$G_s^* = 2\pi \left[\ln 2 + \ln \left(\frac{1 + 2S^2/D^2}{1 + 4S^2/D^2} \right) \right]^{-1} \quad (1.74)$$

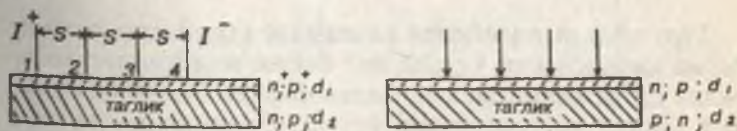
1.5-§. Эпитаксиал, диффузион қатламларнинг солиштирма қаршилигини тўрт зондли усул билан аниқлаш

Икки қатламли структураларда, масалан, таглик сиртида диффузия йўли билан олинган қатламни ёки тагликдан ўтказувчанлигининг катталиги ва тури билан фарқланган эпитаксиал қатламларнинг солиштирма қаршиликларини, уларнинг қалинлик бўйича тақсимотини аниқлашда тўрт зондли усул қўлланилиши мумкин (1.16-расм).

Чегаралари чексизликка силжиган юпқа икки қатламли структура ($S > d_1, d_2$) ток зондларига нисбатан параллел уланган занжир ҳосил қилади. Демак, 1 ва 4 зондлардан ўтаётган токнинг бир қисми I_1 биринчи қатламдан, I_2 қисми иккинчи қатламдан ўтади, яъни

$$I = I_1 + I_2 \quad (1.75)$$

$$U = I_1 \rho n_1 \frac{\ln 2}{\pi} = I_2 \rho n_2 \frac{\ln 2}{\pi} \quad (1.76)$$



1.16-расм. Солиштирма қаршилиқни тўрт зондли усул билан ўлчаш мумкин бўлган эпитаксиал структура турлари.

Бу ерда: ρ_{n1}, ρ_{n2} — солиштирма сирт қаршилиги. Иккинчи ифода параллел уланган занжирдаги кучланишни, 2 ва 3 зондлардаги потенциаллар айирмасини беради. Бу икки формуладан $\rho_1 = \rho_{n2} d_1, \rho_2 = \rho_{n2} d_2$ эканлиги ҳисобга олинганда

$$(\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)^{-1} = (d_1/\rho_1 + d_2/\rho_2)^{-1} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I} \quad (1.77)$$

тенгликни топамиз. Агар қатламлардан бирини ўтказувчанлиги жуда катта, масалан, биринчи юпқа қатламники $d_1 \sigma_1 \gg d_2 \sigma_2$ бўлса, иккинчи қатлам структурада токнинг ўтишига таъсир этмайди. Бундай ҳолда ўлчанган солиштирма қаршилиқ биринчи қатламга тегишли бўлиб, (1.51) орқали аниқланади:

$$\rho_1 = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi d_1}{\ln 2} \quad (1.78)$$

Юпқа эпитаксиал қатлам ва таглик икки хил тур ўтказувчанликка эга бўлса, чегарада ҳосил бўлган p - n ўтиш токнинг остки қатлам орқали ўтишига тўсқинлик қилади. Демак, тўрт зондли усул $p+p$, $n+n$ структураларда, яъни тагликнинг солиштирма қаршилиги эпитаксиал қатламникидан камида юз марта катта бўлган ҳолларда p - n , n - p туридаги структураларда солиштирма қаршилиқни аниқлашда қўлланилиши мумкин ва юқорида кўрилган икки қатламли структураларда диффузион, эпитаксиал қатламнинг солиштирма қаршилиқлари юпқа намуналар учун ўринли бўлган формула билан ҳисобланади.

1.6-§. Солиштирма қаршилиқни тўрт зондли усул билан ўлчашдаги хатоликлар

Тўрт зондли усул билан ўлчашдаги хатоликлар солиштирма қаршилиқни ўлчашнинг физик моделининг назарияда қабул қилинган моделидан фарқли бўлиши формулага кирган катталикларни ўлчаш, ўлчаш шарти ва тартибига боғлиқ бўлган тасодифий, мунтазам хатоликлар орқали аниқланади. Бу хатоликлар манбаини гўриб чиқайлик.

1. Зонд контакти юзасининг киритган хатолиги

Маълумки, солиштирма қаршилиқни тўрт зондли усул билан ўлчашнинг физик асоси-назарияси қўрилган вақтда яримўтказгич билан зонд нуқтавий контакт ҳосил қилади, деб қабул қилинган эди. Амалиётда бу шарт ҳеч вақт бажарилмайди, чунки контактнинг маълум юзачага эга бўлиши ўлчов натижасига мунтазам хатолик киритади. Ток ёки потенциал зондлари яримўтказгич билан контактлашганда радиуси r бўлган доирача ҳосил қилса, унинг киритган хатолиги $(r/S)^2$ билан аниқланади. Хатоликнинг ишораси ва катталиги зондлардан қайси бирида контактнинг нуқтавий бўлиш шarti бажарилмаслиги билан аниқланади. Зондлар бир чизикда ётган ҳолда зонд контакт юзачаси потенциал зондлардан бирида пайдо бўлса, нисбий хатолик

$$\delta = \frac{\Delta\varphi}{\rho} = \left(-\frac{1}{2}\ln 2\right) \ln \left[\left(2 + \frac{r^2}{S^2}\right) / \left(2 - \frac{r^2}{S^2}\right) \right] \quad (1.79)$$

формула билан аниқланади. Агар ток зондларидан бирида контактни нуқтавий бўлиш шarti бажарилмаса, нисбий хатолик

$$\delta = \left(\frac{1}{2}\ln 2\right) \cdot \ln \left[\left(6 - \frac{r^2}{S^2}\right) / \left(6 - \frac{2r^2}{S^2}\right) \right] \quad (1.80)$$

ифода билан аниқланади. Зондлар томони S бўлган квадрат учларига жойлашган ҳолда потенциал ёки ток зондларидан бирида контакт юзачага эга бўлса, мунтазам хатолик қуйидагича аниқланади:

$$\delta = \left(-\frac{1}{2}\ln 2\right) \cdot \ln \left[2\left(1 + \frac{r^4}{S^4}\right) / \left(1 + \left(1 - \frac{r^2}{S^2}\right)^2\right) \right] \quad (1.81)$$

Тўртта зонднинг ҳаммасида контакт нуқтавий бўлмаса, умумий хатолик юқоридаги формулалар орқали аниқланган хатоликлар йиғиндиси билан ифодаланади.

2. Зондлар орасидаги масофанинг такрорланмаслиги билан боғлиқ хатолик

Зондлар орасидаги масофанинг такрорланмаслиги солиштирма қаршилиқни аниқлашда мунтазам хатоликлар киритади. Ҳар бир зондлар ҳолати яримўтказгичда бири-бирига боғланмаган ҳолда ўртача квадратик хатолик билан ΔS га сиқжиса, қаршилиқни ўлчашдаги тасодиқий хатолик зондлар орасидаги масофалар тенг ва ишончлиқ эҳтимоли 0,95 бўлган ҳолда ҳажмий намуналар учун

$$\delta \approx \frac{\Delta \varphi}{\rho} = 2,06 \left(2 \frac{\Delta S}{S} \right) \quad (1.82)$$

бўлади. Солиштирма қаршилиқ юпқа қатламларда ўлчанганда зондлар орасидаги масофанинг ўзгариши билан боғлиқ тасодиқий хатолик

$$\delta \approx \frac{\Delta \varphi}{\rho} = \frac{\sqrt{5}}{2 \ln 2} \left(2 \frac{\Delta S}{S} \right) \quad (1.83)$$

формула орқали аниқланади.

3. Кучланишни ўлчашдаги хатолик

Тўрт зондли усул билан солиштирма қаршилиқни аниқлашда кучланишни ўлчашдаги асосий хатолик потенциал зондларининг контакт қаршилиғи билан боғлиқдир. Контакт қаршилиғи германий ва кремнийларда потенциал зондлар орасидаги намуна қаршилиғидан $10^3 \div 10^4$ марта катта бўлиши мумкин. Потенциал зондларнинг контакт қаршилиғига тушадиган кучланишни йўқотиш учун 2 ва 3 потенциал зондлар орқали ўтадиган токни йўқотиш керак. Бунинг учун кириш (ички) қаршилиғи катта бўлган вольтметрлар (электромметрлар) қўлланилади ёки компенсация усули билан кучланиш ўлчанади.

4. Токнинг киритган хатолиғи

Намунадан ток ўтганда у қизийди. Бу эса солиштирма қаршилиқнинг ўзгаришига олиб келади. Қаршилиқнинг температура коэффиценти кремнийда 0,009 К гача ети-

ши мумкин. Ток зондларининг контакт қаршиликлари натижасида намунада зондлар чизиғи бўйича температура градиенти ва потенциал зондларда қўшимча потенциаллар айирмаси (термик электр юритувчи куч) пайдо бўлиши мумкин. Бу хатолик манбаини йўқотиш учун солиштира қаршиликни аниқлашда токнинг кичик қийматларида ва токнинг икки йўналишида ўлчаш ўтказилади. Бу икки ўлчов натижаларининг ўртачаси олинади. Яримўтказгич намуналарида солиштира қаршилик аниқланаётганда, унинг қизимаслиги учун солиштира қаршиликнинг катталигига қараб токнинг маълум бир қийматида (оптимал ток қийматларида) ўлчаш тавсия қилинади. 1.6-жадвалда кремний намуналарининг солиштира қаршиликларини ўлчашда қўлланилаётган ток қийматлари келтирилган. Шунини айтиб ўтиш керакки, баъзан юқори Ом ли кремний намуналарида ($1000 \div 10000$ Ом. см) токнинг кичик соҳасида ($I > 0,3$ мА) солиштира қаршиликнинг токка боғлиқлиги кузатилган. Буни кичик ток соҳасида намунада киришмалар текис тарқалмаганлиги — флуктуацияси натижасида пайдо бўлган ички майдоннинг ташқи майдондан катталиги билан тушунтирилади. Шунинг учун юқори Ом ли намуналарда ток $1 \text{ мА} > 1 > 0,3 \text{ мА}$ оралиғида ўлчанади, бу билан намунанинг қизиши камайтирилади.

1.6-жадвал

ρ , Ом·см	0,012	0,008 $\div$ 0,6	0,4 $\div$ 60	40 $\div$ 1260	800
I , мА	100	10	1	0,1	0,01

5. Контакт қаршилиги билан боғлиқ хатолик

Зонд билан яримўтказгич орасидаги контакт қаршилиги тўрт зондли усулнинг қўлланилишини чегараловчи энг асосий омиллардан биридир. Тақиқланган зона кенглиги катта бўлган A_2B_6 ва A_3B_5 турдаги яримўтказгичларда сиқиб қўйиладиган зондлар ҳосил қилган контакт қаршилиги шундай катта бўлиши мумкинки, бунда тўрт зондли усул ишламайди.

Баъзи бир ҳолларда бу қийинчиликни енгишда зарядланган сиғимни зонд-яримўтказгич орқали зарядсизлаш қўлланилади, бу билан контактга ишлов берилади. Натижада контакт қаршилиги камайтиради, металл-яримўтказгич орасидаги потенциал тўсиқ йўқотилади. Контакт қаршилиги билан металл-яримўтказгич орасидаги потенциал тўсиқ билан боғлиқ бўлган хатоликни камайтириш учун металл зондга ишлатиладиган материалнинг қаттиқлиги яримўтказгичникидан катта бўлиши керак.

Зонд материаллари сифатида диаметри $D=0,05\pm 0,5$ мм бўлган вольфрам, карбид вольфрам симлари ишлатилади. Зондларнинг учлари одатда 45° дан 150° гача бурчак билан чархланади. С2080 маркали зондлар қурилмасида ҳар бир зондга қўйилган куч $1,75\pm 0,25$ Н га тўғри келади, зондлар орасидаги масофа $1,3\pm 0,01$ мм. С2171, зондлар қурилмасида зондлар орасидаги масофа $0,75\pm 0,008$ мм, ҳар бир зондга қўйилган ўртача сиқиш кучи $0,7\pm 0,07$ Н. Бу қурилмалар билан сирт қаршилигини 0,1 дан 10^5 Ом оралиқда $\pm 4,5\%$ хатолик билан ўлчаш мумкин.

6. Солиштира қаршилиқнинг температурага боғлиқлиги

Солиштира қаршилиқнинг температурага боғлиқлиги билан боғланган мунтазам хатоликларни йўқотиш учун ўлчов вақтида температура назорат қилиб борилади. T — температурада солиштира қаршилиқ $\rho(T)$ ни билган ҳолда шартли белгиланган T_0 — температурага мос келадиган қийматга

$$\rho(T_0)=\rho(T)[1-C_A(T-T_0)] \quad (1.84)$$

формула орқали келтирилади. Бу ерда: C_T — солиштира қаршилиқнинг температура (термик) коэффиценти бўлиб, у яримўтказгичларнинг турига, киришмаларнинг табиати ва концентрацияларига боғлиқ. $n-p$ — тур кремнийнинг термик коэффицентининг солиштира қаршилиқка боғлиқлиги (291—288 К температура оралиғида) 1,7-жадвалда келтирилган.

ρ , Ом·см	0,006	0,01	0,1	1	10	100	1000
C_T (n-тип)	0,002	-0,00022	0,0486	0,00736	0,00813	0,0083	0,0083
C_T (p-тип)	0,0016	0,0031	0,0372	0,00707	0,00825	0,00862	0,009

7. Икки қатламли структураларда ρ ни ўлчашда учрайдиган хатоликлар

Эпитаксиал қатламларнинг солиштирма қаршилиги-ни аниқлашда уларнинг хусусияти билан боғлиқ бир қанча хатоликлар пайдо бўлиши мумкин. Эпитаксиал қатламда солиштирма қаршилик ўлчанаётганда p - n ва n - p структураларда p - n ўтишнинг ҳажмий заряд соҳаси кенгайди. Эпитаксиал қатламнинг солиштирма қаршилиги таглик-никидан катта бўлганда ҳажмий заряд соҳасининг кенгайиши эпитаксиал қатлам томонга бўлади. Бу ҳодисани ҳисобга олмай (1.62) ва (1.63) формулалар билан солиш-тирма қаршилик ҳисобланганда, унинг қиймати ортти-риб ўлчанган бўлади. Юқори Ом ли, юпқа эпитаксиал қатламларни ўлчашда бу хатолик 10÷20% га етиши мум-кин.

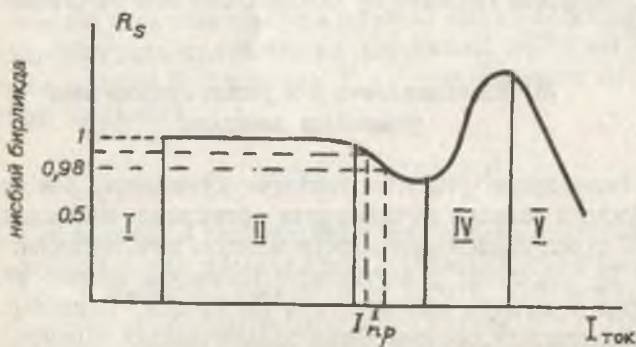
8. Изоляцияловчи p - n ўтиш орқали ток ўтишдаги хатолик

Зондлардан ўтаётган токнинг кўпайиши p - n ўтишга қўйилган тескари кучланишни орттиради, натижада ҳаж-мий заряд соҳасидаги электр майдон кучланганлиги ўса-ди. Бу шароитда p - n ўтишини изоляция қилиш хоссаси токнинг маълум қийматигача сақланади. Токнинг катта қийматларида ҳажмий заряд соҳаси орқали тагликдан ток ўта бошлайди. Аниқланишича, солиштирма қаршилиги 0,1÷2 Ом·см, қалинлиги 0,9÷4 мкм n -тип эпитаксиал

қатлам, солиштирма қаршилиги $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ρ — типли тагликка ўтказилган бўлса, унда эпитаксиал қатламнинг қаршилиги ўлчанаётганда ρ - n ўтиш орқали шунтланмаслиги учун сирт қаршилигининг 5% ўзгариш соҳасида потенциал зондлардаги кучланиш 100 мВ, сирт қаршилигининг 2% ўзгариш соҳасида 50 мВ бўлиши керак.

9. Зондларга қўйилган босим кучининг киритган хатолиги

Юпқа эпитаксиал қатламларнинг солиштирма қаршилигини ўлчашда металл зонд билан эпитаксиал қатламнинг тешилиши ва тагликда шунтланиш кучайиши мумкин. Бу ҳодиса содир бўлмаслиги учун зондга қўйилган кучни кичик қилиб танлаш керак. Зондга қўйилган ўртача кучланиш $0,3 \div 0,03 \text{ Н}$ бўлиши тавсия этилади. Зондга қўйилган кучни бундан кам бўлиши зонд контакт қаршилигини оширади, бу эса ўлчов асбобларининг кириш қаршилигини оширишни талаб қилади. Эпитаксиал қатламларда юқорида кўрилган омиллар унинг сирт қаршилигини тоққа боғлиқ бўлишига олиб келади (1.17-расм). Бу боғланиш графигини бешта соҳага ажратиш мумкин. 1-соҳада ток ортиши билан сирт қаршилигининг камайиши, зонд яримўтказгич орасидаги потенциал тўсиқнинг камайиши ва потенциал контактлари қаршилигининг

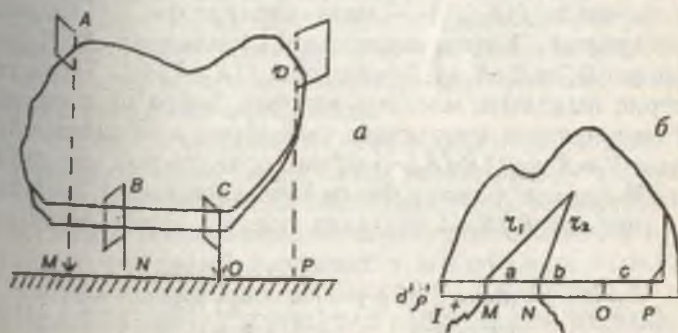


1.17-расм. Эпитаксиал қатламларда сирт қаршилигини зондлардан оқаётган токка боғлиқлиги.

ошиши билан тушунтирилади. Агар $R_{\text{кпр}} \gg R_{\text{к1}} + R_{\text{к2}}$ тенгсизлик бажарилмаса $R_{\text{к1}}$ ва $R_{\text{к2}}$ ларнинг токка боғлиқлиги 1-соҳани пайдо қилади. Агар зондлардаги босим орттирилса, 1-соҳа йўқолиши мумкин. 2-соҳада R_s — сирт қаршилиги токка боғлиқ эмас. Бу соҳада $R_{\text{кпр}} \gg R_{\text{к1}} + R_{\text{к2}}$ бўлганда энг катта аниқлик билан солиштирма қаршилиқ ўлчанади. Бу тенгсизлик бажарилмаса, 2-соҳада мунтазам равишда хатолик пайдо бўлиб, у $R_{\text{к1}} + R_{\text{к2}}/R_{\text{кпр}}$ катталик билан аниқланади. 3-соҳанинг пайдо бўлиши изоляцияловчи p - n ўтиш орқали ток сирқиши билан боғлиқ. Сирт қаршилигининг ошиши 4-соҳада p - n ўтишнинг ҳажмий заряд соҳаси кенгайиши билан боғлиқ. 5-соҳада R_s нинг тез камайиши ток (бир қисми)нинг таглик орқали ўтиши шунгланиси билан боғлиқдир.

1.7-§. Ван-дер-Пау усули билан солиштирма қаршилиқни ўлчаш

Исталган геометрик шаклга эга бўлган пластина кўринишидаги яримўтказгичли намуналарнинг солиштирма қаршилигини тўрт зондли усулнинг бир кўриниши бўлган Ван-дер-Пау усули билан ўлчаш мумкин (1.18-расм). Бу усулнинг қулайлиги шундан иборатки, ясси намуна ён



1.18-расм. Ван-дер-Пау усули билан солиштирма қаршилиқни ўлчашда чизикли А, В, С, Д контактларни (оригиналда) асл нусхада (а), ясси яримчексиз пластинада (аксида) М, N, О, Р контактларнинг жойланиши (б).

сиртига тўртта A, B, C, D нуқтавий (ёки чизиқли) контакт олиниб, A ва B контактлардан ток ўтказилади, C ва D контактлар орасидаги потенциаллар айирмаси ўлчанади. Сўнг эса A ва D контактлардан ток ўтказилади. B ва C контактлар орасидаги кучланиш ўлчаниб

$$R_1 = \frac{U_{CD}}{I_{AB}} = R_{ABCD} \text{ ва } R_2 = \frac{U_{BC}}{I_{AD}} = R_{ADBC}$$

қаршиликлар ҳисобланади. R_1 ва R_2 қаршиликларни билган ҳолда солиштирма қаршилик

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot f(R_1/R_2) \quad (1.85)$$

формула билан аниқланади. Бу ерда: $f(R_1/R_2)$ — қаршиликлар нисбатига боғлиқ бўлган тузатиш функцияси, d — намунанинг қалинлиги. Тузатиш функцияси

$$\operatorname{ch} \left[\frac{R_1/R_2}{R/R_2 + 1} \cdot \frac{\ln 2}{f(R_1/R_2)} \right] = \frac{1}{2} \exp \left(\frac{\ln 2}{f(R_1/R_2)} \right) \quad (1.86)$$

тенгламани қаноатлантиради, (R_1/R_2) — нинг ҳар хил қийматларидаги $f(R_1/R_2)$ — нинг натижалари 1.9-жадвалда келтирилган. Жадвал таҳлилидан кўринадики, R_1/R_2 нисбатнинг $0,7 \leq R_1/R_2 \leq 1,5$ оралиғида $f(R_1/R_2) \approx 1$. Тўғри геометрик шаклдаги, масалан, квадрат, доира кўринишидаги намуналарда контактлар симметрик жойлаштирилган ҳолда $R_1 = R_2$ ва $f(R_1/R_2) = 1$ бўлиб, солиштирма қаршиликни 2% дан кам хатолик билан ўлчаш мумкин. Қаршиликлар нисбати $R_1/R_2 \approx 1$ бўлганда тузатиш функциясини

$$f(R_1/R_2) = 1 + \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \frac{\ln 2}{2} - \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^4 \left[\left(\frac{\ln 2}{2} - \frac{\ln 2}{12} \right)^3 \right] \quad (1.87)$$

билан ҳисоблаш мумкин. Ван-дер-Пау усулининг назарияси конформ акслантириш назариясига асосланган.

Конформ акслантириш назариясига кўра, исталган шаклдаги бир аргумент билан боғланган (односвязанную) ёпиқ D -соҳани яримчексиз ясси текислик D' — соҳага алмаштириш мумкин. Бунда асл намунанинг (оригиналнинг) A, B, C, D контактларига уларнинг акси бўлган M, N, O, P контактлар мос келади (1.18-расм). Бундай алмаштиришда асл нусхадаги ва намуна акси бўлган яримчексиз ясси пластина контактлари орасидаги кучланиш бир хил бўлади, яъни

$$U = (E \cdot r) = \frac{\rho I r}{2\pi r} = \frac{\rho' I' r}{2\pi d' r} \quad (1.88)$$

Бу ерда: E электр майдон кучланганлиги

$$E = j\rho = \frac{I}{2\pi r d} = \frac{I'}{2\pi r d'} = -\frac{d\rho}{dr} \quad (1.88a)$$

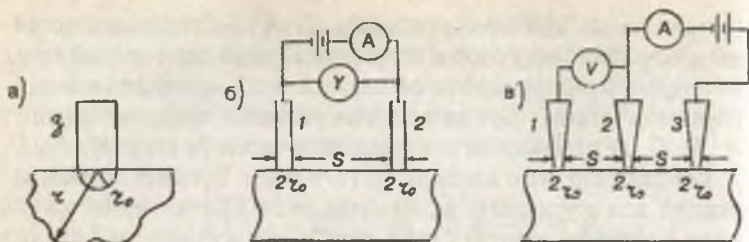
Бу ифода (1.88) дан

$$R_{ABCD} \cdot \frac{d}{\rho} = R_{MNOP} \frac{d'}{\rho'}; \quad R_{ADBC} \cdot \frac{d}{\rho} = R_{NOMP} \frac{d'}{\rho'} \quad (1.89)$$

тенгликларни олиш мумкин. ρ, d — ўлчанаётган намунанинг солиштирма қаршилиги ва қалинлиги. ρ', d' — тасвирнинг солиштирма қаршилиги ва қалинлиги. (1.89) даги тенгликлар конформ алмаштиришга нисбатан инвариантлик хоссасини ифодалайди.

Тасвирни яримчексиз ясси текислик (пластина) кўринишида бўлиши, чизиқли ток манбаларининг ҳосил қилган потенциаллари ва токи цилиндрик симметрия қонуни билан тақсимланишига олиб келади. Шунинг учун чизиқли ток манбаларининг Γ масофадаги потенциали майдон кучланганлигининг (1.88a) ифодасини интеграллашдан тасвирда жойлашган Γ масофадаги нуқтанинг потенциали топилади

$$\varphi'(r) = -\frac{I\rho'}{2\pi d'} \ln r + A \quad (1.90)$$



1.19-расм. Радиуси r_0 бўлган яримсферик зонд орқали намунадан ток ўтганда потенциал тақсимотни ҳисоблашга чизма (а), намунада тарқалган қаршилиқни ўлчашнинг икки (а) ва уч (б) зондли усуллари схемалари.

Биринчи I^+ ток манбаидан r_1 , иккинчи I^- ток манбаидан r_2 масофада бўлган нуқтанинг потенциали (1.18-расм) ток манбаларининг ишораларини ҳисобга олганда (1.90)

$$\begin{aligned}\varphi'(r) &= \varphi(r_1) + \varphi(r_2) = -\frac{I\rho'}{\pi d'} \ln r_1 + \frac{I\rho'}{\pi d'} \ln r_2 + A = \\ &= \frac{I\rho'}{\pi d'} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + A\end{aligned}\quad (1.91)$$

бўлишлигини кўрамыз. Демак, яримчексиз текисликда исталган нуқтадаги потенциални топиш икки ток манбаидан иборат бўлган тизимда потенциални аниқлаш масаласига боғлиқ экан. (1.91) формуладан фойдаланиб, M ва N контактларидан ток ўтганда O ва P контактларда ҳосил қилинган φ_p , φ_p потенциалларни ва улар асосида O ва P контактлар орасидаги потенциаллар айирмасининг

$$U_{op} = \varphi_p - \varphi_o = -\frac{I'_{MN}\rho'_n}{\pi d'} \ln \left(\frac{(b+c+a)d}{(a+b)(b+c)} \right) \quad (1.92)$$

ва ундан R_{MNOP} қаршилиқнинг

$$R_{MNOP} = \frac{U_{OP}}{I'_{MN}} = -\frac{\rho'}{\pi d'} \ln \left(\frac{b(a+b+c)}{(a+b)(b+c)} \right) \quad (1.93)$$

ифодасини топамиз. A ва D контактлар акси (тасвири) бўлган M ва P контактлардан ток ўтказиб, N ва O контактлардаги потенциаллар (φ_N, φ_O) ни, улар орқали эса O ва N контактлар орасидаги потенциаллар айирмасини

$$U_{ON} = \varphi_O - \varphi_N = -\frac{I'_{MP}\rho'}{\pi d'} \ln\left(\frac{ac}{(a+b)(b+c)}\right) \quad (1.94)$$

ва ундан R_{MPN} қаршиликни аниқлаймиз

$$R_{MPNO} = \frac{U_{ON}}{I'_{MP}} = -\frac{\rho'}{\pi d'} \ln\left(\frac{ac}{(a+b)(b+c)}\right) \quad (1.95)$$

(1.93) ва (1.95) формулалардаги логарифм остидаги ҳадлар йиғиндиси бирга тенг бўлишлигини, яъни

$$I \frac{-\pi d'}{\rho} R_{MNOP} + I \frac{-\pi d'}{\rho} R_{MPNO} = 1 \quad (1.96)$$

ифода билан аниқланишини кўрамиз. Инвариантлик хос-саси (1.89) га кўра тасвирдан оригиналга ўтсак, (1.96) қуйидагича бўлади:

$$I \frac{-\pi d}{\rho} R_1 + I \frac{-\pi d}{\rho} R_2 = 1 \quad (1.97)$$

(1.97) да R_1 ва R_2 ларнинг ўрнига

$$R_1 = \frac{1}{2}[(R_1 + R_2) + (R_1 - R_2)] \quad (1.98)$$

$$R_2 = \frac{1}{2}[(R_1 + R_2) - (R_1 - R_2)]$$

қўйилса,

$$ch\left[\frac{\pi d}{\rho} \cdot \frac{R_1 - R_2}{2}\right] = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{\pi d}{\rho} \cdot \frac{R_1 + R_2}{2}\right) \quad (1.99)$$

кўринишга келади. Бунда

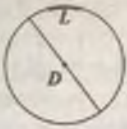
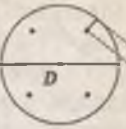
$$\frac{\pi d}{\rho} \frac{R_1 + R_2}{2} = \frac{\ln 2}{f(R_1/R_2)} \quad (1.100)$$

белгилаш билан (1.99) формулани (1.86) кўринишда бўлган тузатиш функцияси f нинг тенгламасини оламиз. Бу ерда, $f(R_1/R_2)$ қаршиликлар нисбати R_1/R_2 га боғлиқ бўлган (юқорида келтирилган) тузатиш функцияси. (1.100) ифодадан юқорида келтирилган солиштирма қаршиликни Ван-дер-Пау усули билан ҳисоблаш формуласи келиб чиқади. Бу усул билан солиштирма қаршиликни ўлчашда одатда намунанинг ён сиртида Ом контактлари манипуляторга ўрнатилган тўртта йўналтирувчи учларига ўрнатилган қирраси чархланган тантал, карбид вольфрамнинг пластинкалари контактлаштириб олинади. Ҳар бир зонд намунанинг ён қиррасига пружина билан сиқилади, шу билан бирга, сиқиш кучини бошқариш мумкин. Солиштирма қаршиликни Ван-дер-Пау усули билан ўлчашдаги хатолик контакт юзасини катталашиши билан ортиб боради. Диск шаклидаги пластинкаларда контактнинг жойланишига ва ўлчовига боғлиқ хатолик назарий ҳисобланган. Баъзи бир ҳоллар учун хатолик 1.8-жадвалда келтирилган.

Шуни таъкидлаш керакки, бу усулни автоматлаштириш қулайдир. Бу усулга асосланган доира, квадрат, тўғри тўртбурчак шаклидаги қалинлиги $d=80 \div 1000$ мкм, солиштирма қаршилиги $\rho=10^{-2} \div 100$ Ом·см оралиқда бўлган пластинкаларнинг солиштирма қаршилигини ўлчайдиган автоматик қурилма ясалган, намуналарни ρ бўйича 4% хатолик билан 10 та гуруҳга ажратади, солиштирма қаршилиги эталондан $\pm 20\%$ га фарқ қилганларини яроқсиз намунага чиқаради.

Энди ρ -ни ўлчашнинг икки комбинацияли тўрт зондли усулини кўрайлик. Кўп ҳолларда яримўтказгич намуналарнинг физик хоссаларини аниқ ўлчаш зарурияти туғилади. Бунга бир жинсли яримўтказгич қатламларда сирт қаршилигини юза бўйича тақсимотини тадқиқот қилишни кўрсатиш мумкин. Баъзан ўлчашнинг тасодикий хатолиги сирт қаршилигининг ўзгаришига тенг бўлиб қолиши мумкин ва текшириладиган намунанинг бир жинслилиги тўғрисида мавжуд бўлган маълумотларни олиш мумкин бўлмай қолади.

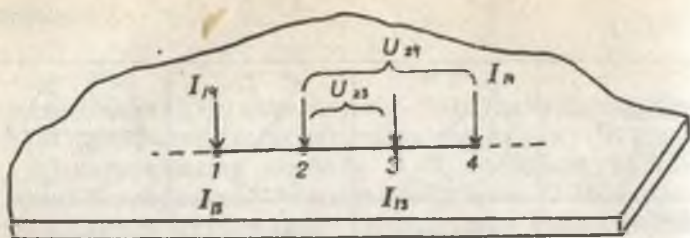
1.8-жадвал

Контакт шакли			
Нисбий хатолик	$0,77(l/D)^2$	$3,09(l/D)^2$	$8,14(l/D)^2$

1.9-жадвал

R_1/R_2	$f(R_1/R_2)$	R_1/R_2	$f(R_1/R_2)$	R_1/R_2	$f(R_1/R_2)$
1	1	4	0,882	12	0,7
1,2	0,995	4,5	0,865	14	0,675
1,4	0,990	5,0	0,847	16	0,650
1,6	0,985	5,5	0,830	18	0,625
1,8	0,975	6,0	0,815	20	0,610
2,0	0,970	7,0	0,800	25	0,57
2,2	0,963	8,0	0,790	30	
2,4	0,955	8,5	0,765	35	
2,6	0,945	9,0	0,757		
2,8	0,935	9,5	0,747		
3,0	0,925	10	0,730		

Тўрт зондли усулларда зондлар орасидаги масофанинг такрорланмаслигини йўқотиш қийин бўлган тасодифий хатолик манбаларидан бири бу намуна ўлчовларини зондлар жойланишининг таъсирини ҳисобга олган тузатиш функциясининг сон қийматларини аниқлаш билан боғлиқ бўлган хатоликдир. ρ -ни ўлчашда икки комбинацияли тўрт зондли усул кўрсатилган хатоликларни чеклайди.



1.20-расм. Бир чизикда жойлашган ўзаро масофалари тенг бўлган тўртта a зонд билан ρ ни ўлчаш.

Бу усулнинг моҳияти шундан иборатки, бир чизикда жойлашган, зондлар орасидаги масофалари тенг бўлган тўртта зонд билан икки марта ўлчов ўтказилади.

1 ва 4 зондлардан ток ўтказиб, 2 ва 3 зондларда кучланиш ўлчанади. Иккинчи галда 1 ва 3 зондлардан ток ўтказиб, 2 ва 4 зондларда кучланиш ўлчанади (1.20-расм) ва уларга мос келган қаршилик ҳисобланади:

$$R_1 = \frac{U_{23}}{I_{14}}; \quad R_2 = \frac{U_{24}}{I_{13}}$$

Юқорида аниқланганидек, пластина кўринишидаги юпқа намуналарнинг сирт солиштирма қаршилиги (1.62) формула каби

$$\rho_s = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot R_1 \quad (1.101)$$

орқали аниқланади. Агар намуна ўлчамлари чекли ва намуна тўғри геометрик шаклда бўлса, (1.101) га тузатиш функцияси киритилиши лозим бўлади, яъни

$$\rho_s = \frac{\pi}{\ln 2} R_1 G^* \quad (1.102)$$

G^* — тузатиш функцияси. G^* — намунанинг геометрик ўлчамларига, зондлар чизигининг намуна симметрия

ўқларига нисбатан қандай жойланишига, ток ва потенциал зондларининг қандай уланишига боғлиқ бўлган тузатиш функцияси. Пластина шаклидаги намуналарни бир чизикда жойлашган тўртта зонд икки қисмга бўлади. Бу намуналарнинг ҳар бирини Ван-дер-Пау усули билан ρ ни ўлчашда намунани (оригинални) конформ акслантирилгани деб қараш мумкин (1.18-расм). Шунинг учун бу ерда ҳам (1.100) ифода ўринли бўлади. Тўртта зонд бир чизикда жойлашган доира кўринишидаги пластинкаларда (1.97) га ўхшаш

$$\exp\left(-\frac{2\pi d}{\rho} R_1\right) + \exp\left(-\frac{2\pi d}{\rho} R_2\right) = 1 \quad (1.103)$$

ифодани оламиз. R_1 ва R_2 ларни

$$R_1 = \frac{R_1}{2} \left[\frac{R_1/R_2 + 1}{R_1/R_2} + \frac{R_1/R_2 - 1}{R_1/R_2} \right] \quad (1.104)$$

$$R_2 = \frac{R_2}{2} \left[\frac{R_1/R_2 + 1}{R_1/R_2} - \frac{R_1/R_2 - 1}{R_1/R_2} \right]$$

кўринишда ифодалаб (1.103) га қўйсак,

$$\exp\left[-\frac{\pi d}{\rho} R_1 \left(\frac{R_1/R_2 + 1}{R_1/R_2}\right)\right] \operatorname{ch}\left[\frac{\pi d}{\rho} R_1 \left(\frac{R_1/R_2 - 1}{R_1/R_2}\right)\right] = \frac{1}{2} \quad (1.105)$$

формулани оламиз. Агар (1.105) формулага қуйидаги белгилашни киритсак,

$$\frac{\pi d}{\rho} \cdot \frac{R_1/R_2 + 1}{R_1/R_2} \cdot R_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln 2}{f(R_1/R_2)} \quad (1.106)$$

(1.105) ифода қуйидаги кўринишга келади:

$$\frac{1}{2} \exp\left[\frac{\ln 2}{f(R_1/R_2)}\right] = \operatorname{ch}\left[\frac{\ln 2}{f(R_1/R_2)} \cdot \frac{R_1/R_2 - 1}{R_1/R_2}\right] \quad (1.107)$$

(1.106) ифодадан солиштирма сирт қаршилигини топамиз,

$$\rho_n = R_1 \cdot \frac{\pi}{\ln 2} \left(1 + \frac{1}{R_1/R_2} \right) \cdot f \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (1.108)$$

Шундай қилиб, (1.102) даги

$$G^* = f(R_1/R_2) \left(1 + \frac{1}{R_1/R_2} \right) \quad (1.109)$$

кўринишдаги купайтма намунанинг геометрик шаклига боғлиқ бўлган тузатиш функциясидир. Тузатиш функциясини шундай кўринишда олишнинг ютуғи шундаки, тузатиш функцияси зондлар орасидаги масофага боғлиқ бўлмайди, бу билан зондлар орасидаги масофанинг такрорланмаслиги билан боғлиқ бўлган тузатиш функциясини ҳисоблашдаги хатоликлар йўқотилади. Тузатиш функцияси $f(R_1/R_2)$ ни 0,05% дан катта бўлмаган хатолик билан $1,2 < R_1/R_2 < 1,32$ оралиқда иккинчи даражали полином кўринишида ифодалаш мумкин:

$$f \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{-1} \right] = 14,696 + 25,173 \left(\frac{R_1}{R_2} \right) - 7,872 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \quad (1.110)$$

R_1/R_2 ни ўзгариш соҳаси тўрт зондли усул билан аниқланидиган

$$R_1/R_2 = \ln 4 / \ln 3 = 1,262$$

қийматга яқин соҳада олинган. Шунини таъкидлаш керакки, агар зондлар чизиғи ёки четки зонд пластина четидан қандайдир масофада жойлашган бўлса, (1.110) ифода зонд чизикларининг исталган йўналишида қўлланилиши мумкин. Пластина четидан (5S) масофада зондлар жойлашган бўлса, сирт қаршилигини ҳисоблаганда хатолик 0,1% дан ошмайди. Шу усул асосида автоматлашган, сирт бўйича қадамлаб силжийдиган зондлар қурилмаси ясалган.

1.8-§. Солиштирма қаршилиқни нуқтавий контактнинг тарқалган (ёйилган) қаршилиқ усули билан аниқлаш

1. Усул назарияси.

Бу усул яримўтказгич ва унинг (ясси) текис сиртига тик жойлашган зонддан иборат бўлган структура қаршилигини ўлчашга асосланган. Агар металл зонд яримўтказгичнинг ясси сирти билан кичик юзачали Ом контакти ҳосил қилса, шу контактдан ток ўтказиб ўлчанган қаршилиқ тарқалган (ёйилган) қаршилиқ деб аталади. Яримўтказгичда контакт қаршилиғи кичик бўлган катта юзали $S_0 \gg \pi r_0^2$ иккинчи контакт ҳам бор ва у металл зонддан узокда $l \gg r_0$ катта масофада жойлашган деб фараз қилинади. Бу усул кенг тарқалган бўлиб, бир жинсли яримўтказгичларда, эпитаксиал структураларнинг ҳамма тўрида, диффузион қатламларда солиштирма қаршилиқни $10^{-3} \div 10^2$ Ом · см оралиқда ва қаршилиқни қалинлик бўйича тақсимотини аниқлашда қўлланилади, унинг афзалликларига яна намунанинг муайян нуқтасидаги кичик ҳажмда қаршилиқни ўлчашни кўрсатиш мумкин. Тарқалган қаршилиқ усулининг назарияси яримчексиз яримўтказгич намуналаридан нуқтавий зонд контакти орқали ток ўтганда ҳосил қилган потенциалнинг тақсимланишига асосланган (1.13а-расм). Маълумки, бундай ҳол учун потенциал тақсимои (1.21) формула билан аниқланади. Равшанки, зонднинг яримўтказгич билан ҳосил қилган контактининг диаметри $2r_0$ яримшар кўринишида бўлган ҳолида ҳам потенциал тақсимои (1.21) га ўхшаш бўлади. Контакт радиуси r_0 бўлганда намунадаги икки зонд орасидаги кучланиш тушуви зонднинг электр потенциалига тенг бўлади.

$$U = \varphi(r_0) - \varphi(l) = \left(\frac{I\rho}{2\pi r} \right)_{r=r_0} - \left(\frac{I\rho}{2\pi r} \right)_{r \gg r_0} \approx \frac{I\rho}{2\pi r_0} \approx \varphi(r_0) \quad (1.111)$$

Агар $r = 10r_0$ бўлса, контакт соҳасида қалинлиги $r - r_0$ бўлган қатламнинг кучланиши

$$U = \varphi(r_0) - \varphi(10r_0) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{10r_0} \right) = 0,9 \frac{I\rho}{2\pi r_0} \quad (1.112)$$

бўлади. У намунага тушган тўла кучланишдан 10% кам. Бундан кўринадики, зонддан оқаётган токнинг қиймати-ни асосан контакт соҳасининг қаршилиги аниқлар экан, унинг қўлами контакт радиуси қанча кичик бўлса, у ҳам шунча кичик бўлади. Яримчексиз намуналарда электр потенциалининг тарқалиши қонунидан, тарқалган қаршилиқни (1.111) га кўра

$$R_r = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (1.113)$$

билан аниқлаш келиб чиқади. Яримўтказгич сиртидаги оксид қатлами ва сирт ўтказувчанлигининг структура қаршилигига таъсири кичик бўлса, уни тарқалган қаршилиқ қиймати сифатида олиш мумкин. Маълумки, зонд ва яримўтказгичларнинг деформацияланишлари туфайли, зонд билан яримўтказгич орасидаги контактнинг ҳақиқий шакли ва ўлчамини аниқлаш жуда қийин. Шу билан бирга, у зонд контакти радиусига материалларнинг механик хоссаларига, зондга қўйилган кучга боғлиқ.

Кўрилатган усулнинг тўрт зондли усулдан фарқи шундаки, бунда контакт шакли қандайдир r_0 — радиусга эга бўлган ясси айланадан иборат. Икки материалнинг Юнг модулларини ва зондга қўйилган кучни билган ҳолда контактнинг радиусини ҳисоблаш мумкин. Радиуси r_0 бўлган ясси контактнинг яримчексиз намуналарда электр потенциалининг тақсимланиши Лаплас тенгламаси орқали аниқланади. Бундай структура (тузилма)нинг тарқалган қаршилиги

$$R_r = \frac{\rho}{4r_0} \quad (1.114)$$

формула билан топилади.

Тажрибада тарқалган қаршилиқ одатда икки, уч зондли чизмалар билан ўлчанади (1.206, в-расм). Агар намунада потенциалнинг тақсимланиши маълум бўлса, у ҳолда

$$R_r = \frac{U(r_0)}{I_{12}} = \frac{U_{12}}{2I_{12}} - \frac{U(S)}{I_{12}}$$

бўлади. Бу ерда: S — зондлар орасидаги масофа, $U(r_0)$ — зонддаги потенциаллар. $S \gg r_0$ бўлганда $U(S) \rightarrow 0$, $R_p = U_{12}/2I_{12}$ ўлчанган структура қаршилиги

$$R_{\text{яв}} = \frac{U_{12}}{I_{12}} = 2R_p = \frac{\rho}{2r_0} \quad (1.115)$$

бўлади. Бу ерда, $U(S)/I_{12}$ — барьер қаршилиги.

Уч зондли усул билан ўлчанганда 2 ва 3 зондлардан ток ўтказиб, 1 ва 2 зондлардан кириш қаршилиги катта бўлган вольтметрда кучланиш ўлчанади. Бу билан 3 зонд контактига тушган кучланиш йўқотилади ва ўртадаги 2 контактнинг тарқалган қаршилиги ўлчанади:

$$R_p = \frac{U_{21}}{I_{23}} + \frac{U(S)}{I_{23}} + \frac{U(2S)}{I_{23}} \quad (1.116)$$

Уч зондли чизма билан ўлчанганда зондларнинг бир хил бўлиши талаб этилмайди, лекин бир қанча сабаблар борки, металл-яримўтказгич структураларидаги қаршиликни идеал структуралардаги тарқалган қаршиликдан фарқли бўлишига олиб келади.

Металл-яримўтказгич орасида потенциал тўсиқ пайдо бўлса, яъни уларнинг чиқиш ишлари ҳар хил бўлган A_v/A_n ҳолда заряд ташувчилар билан бойиган ёки камбағаллашган қатлам ҳосил қилади. Омик бўлмаган контактдан ток ўтганда, кучланишнинг тескари йўналишида потенциал тўсиқ соҳаси қатламининг қаршилиги ортади, кучланишнинг тўғри йўналишида инъекция туфайли контакт қаршилиги камаяди. Булар билан бир қаторда контактдан ток ўтганда контакт соҳасининг қизиши, термо Э Ю К ҳосил бўлиши қаршиликнинг ўзгаришига олиб келади. Қаршиликнинг ўзгаришига олиб келадиган сабаблардан яна бирини кўрсатиш мумкин. Контактнинг кичик юзачага эга бўлиши ва контакт соҳасида электр майдони кучланганлигини катта бўлишлиги ҳаракатчанликнинг камайишига, яъни қаршиликнинг ўзгаришига олиб келиши мумкин. Бу кўрилган ҳодисалар тарқалган қаршиликни ҳисоблашда қабул қилинган яримўтказгичнинг бир жинсли ва Ом контактли бўлсин деб қабул қилинган фаразлар-

нинг бузилишига олиб келади. Шунинг учун структуранинг тарқалган қаршилиги ҳақиқий қиймати (1.115) га мос тушади деб кутиш қийин.

Тарқалган қаршилиқни кичик тоқларда ($10^{-7} \div 10^{-2} \text{ A}$), кичик кучланишларда ($U = kT/e$) ўлчаш билан юқорида қайд этилган баъзи бир ҳодисаларнинг таъсирини камайтириш-минимумга келтириш мумкин. Ҳисоблашларнинг кўрсатишича, кремний намуналарида зонд контакти радиуси 4 мкм, кучланиш $U \leq 15 \text{ мВ}$ бўлганда контакт соҳаси температурасининг ўзгариши $0,1^\circ \text{C}$ дан ортмайди, электр майдон кучланганлиги заряд ташувчилар ҳаракатчанлигининг майдонга боғлиқлик соҳасидан кичик ($E < 10^3 \div 10^4 \text{ В/см}$) бўлади. Юпқа, қаршилиги катта намуналарда сирт ҳолатлари ҳосил қилган сирт ўтказувчанликнинг тарқалган қаршилиқка таъсири қўйилган кучланишни камайтиргани билан йўқолмайди, шунинг учун ўлчанган структура қаршилиги (1.115) дан фарқ қилади. У ҳолда эмперик коэффициент $K(\rho)$ орқали ўлчанган структура қаршилиги қуйидагича ифодаланади:

$$R_{\text{эм}} = K(\rho) \frac{\rho}{4r_0} \quad (1.116,6)$$

Бу ҳодисалар контакт радиусининг ҳақиқий қийматини тўғридан-тўғри аниқлаш мумкин эмаслиги, тарқалган қаршилиқни солиштирма қаршилиги аниқ бўлган (эталон) намуналардан фойдаланиб даражалаш заруриятини туғдиради, яъни, $R_{\text{эм}} = f(\rho)$ боғланишни топиш керак бўлади. Ўлчов натижалари аниқ ва тақрорланувчан бўлиши учун солиштирма қаршилиги ўлчанаётган ва эталон намуналарнинг сирти бир хил ишловдан ўтиши ва унинг сифати сирт ишловининг маълум стандарт талабига жавоб бериши керак. Зонд манипулятори тузилиши ва зонд ўлчами контакт юзасининг ҳар доим бирдай бўлишини таъминлаши керак. Кўп ҳолларда зондлар сифатида учига осмийдан яримшар кўринишида қопланган қаттиқ материаллар, рутений қотишмаларининг симлари ишлатилади. Зондлар учигаги яримшар кўринишидаги осмийдан иборат пойнак (учлик)нинг радиуси 25 мкм чамасида бўлганда, контакт радиуси тахминан 4 мкм ни ташкил этади. Пойнакка юқори аниқликда ишлов берилади. Кон-

такт хоссаларининг тақрорланиши учун зондларга қўйилган кучланиш, яъни юза бирлигига қўйилган куч $10^2 + 10^4$ Н/см² оралиқда ўзгаради. Бунда зондга қўйилган юк бир хил сақланиши ва зондларни оҳиста тик кўтарилишига эришиш керак. Юқорида келтирилган босим зондлар намуна сиртидаги оксид қатламни тешишга етарли бўлган қониқарли Ом контакти ҳосил қилади. Бу усул билан ажратилган муайян жойдаги, асосан қалинлиги бир неча контакт радиуси (r_0) га тенг бўлган қатламнинг тарқалган қаршилигини, яъни солиштирма қаршилиқни ўлчаш мумкин. Фазовий ажратиш қобилияти тахминан контакт диаметри (10 мкм)га тенг. Солиштирма қаршилиқ ўлчанаятган соҳанинг ҳажми $10^{-10} + 10^{-11}$ см⁻³ тартибда бўлсин. Бу ҳолат кремнийда ва бошқа яримўтказгич намуналарида солиштирма қаршилиқнинг сирт ва қалинлик бўйича флукутациясини ўрганишга имкон беради. Солиштирма қаршилиқни ўлчашдаги хатоликлар яримўтказгич билан зонд орасидаги масофани контакт ўлчамини ҳар хил бўлишидан, оксидланган қатламнинг (парданинг) қатнашишидан, контакт соҳасининг қизишидан, ҳаракатчанликнинг кучли электр майдонида камайиши билан содир бўлиши мумкин. Солиштирма қаршилиги катта намуналарда сирт соҳасида бўладиган ҳажмий заряд соҳасининг ва вақт бўйича сирт потенциалининг ўзгариши кучли таъсир кўрсатиши мумкин. Ҳар хил яримўтказгичлар учун уларнинг сиртига ишлов бериш, намунани даражалашга тайёрлаш ва ўлчашдаги шарт-шароитларнинг тақлифлари ишлаб чиқилган. Кремний намуналарини ўлчашга ва (ко-либровка) даражалашга тайёрлаш учун қуйидаги ишлов ўтказилиши тавсия этилади. Кремний намуналарини кесгандан сўнг калий ишқорида (КОН) 100°С да 10 минут қайнатиб, икки томонидан тахминан 15 мкм қатлам едириб юборилади, сўнг унга механик кимёвий сайқал бериб 25—35 мкм чамасида қатлам олиб ташланади, сўнг пероксид-аммиак эритмасида ювилиб, ҳавода 150°С да 15 минут ушланади. Шу усул билан ишловдан ўтган намуналарда ишонч эҳтимоллиги 0,95 бўлгани ҳолда қаршилиқни ўлчашдаги хатолик 3,5% дан ошмайди. Бундан ташқари, кремний намуналарида яхши натижаларга эришиш учун кетма-кет икки технологик босқични ўз ичига олган ишлов қўлланилади: олмос пастаси АП—2 билан силлиқ-

орқали ҳисобга олинади. Бир жинсли бўлмаган намуналарнинг бир қатламли моделини қўрамиз. Энг содда қуринишдаги қатламда қалинлик бўйича солиштирма қаршилик ҳар хил бўлса, берилган қалинликда у бир жинсли қатлам, структура эса икки қатламли структура деб қаралади. Қалинлиги d , солиштирма ўтказувчанлиги σ_1 қатламда радиуси r_0 бўлган Ом контакти жойлашган (1.22-расм). Иккинчи қатлам тагликнинг юқори қатлами билан бир хил типдаги ўтказувчанликка эга бўлсин. Унинг ўтказувчанлиги σ_2 қалинлиги етарлича катта бўлсин, у ҳолда тагликни ярим чексиз намуна деб ҳисоблаш мумкин бўлади. Юқори қатламдаги электр потенциали φ_1 тагликдаги φ_2 Лаплас тенгламасини қаноатлантиради. Бунда чегаравий шартни қуйидагича таърифлаш мумкин.

Металл-яримўтказгич контактида потенциал ўзгармас, қатламнинг юқори сиртида токнинг нормал ташкил этувчиси нолга тенг, қатлам билан таглик чегарасида ток ва потенциал узлуксиз бўлади. Бу шартлар қатлам ва таглик бир жинсли ва чегарада ҳажмий заряд йўқ деган фаразга тўғри келади. Бир жинсли бўлмаган намунанинг бир қатламли модели бўйича Лаплас тенгламасини ечиш билан қатламдаги ҳамда тагликдаги электр потенциаллар (φ_1 , φ_2) тақсимотини топиш ва улар асосида контактнинг тарқалган қаршилигини тузатиш функцияси орқали ҳисоблаш мумкин. 1.226-расмда тузатиш функциясининг

$$f(K_1 d/r_0) = U r_0 \sigma_1 R_{\text{yT}}$$

$K = \sigma_1 - \sigma_2 / \sigma_1 + \sigma_2$ параметрининг ҳар хил қийматларида d/r_0 нисбатга боғланиши келтирилган. Бу ерда: σ_1 — ўлчаниши керак бўлган қатламнинг солиштирма ўтказувчанлиги, σ_2 — қиймати аниқ бўлган тагликнинг солиштирма ўтказувчанлиги. $\sigma_1 = \sigma_2$ бўлганда $K=0$, намуна эса бир жинсли ярим чексиз ҳажмга эга бўлади. Шунинг учун

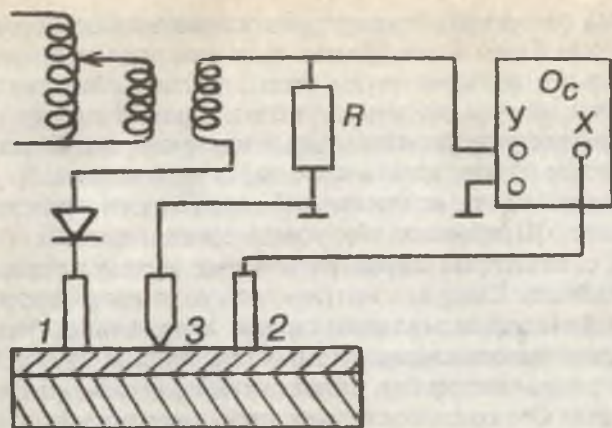
$$f(0, d/r_0) = 1$$

бўлади. Агар $r_0 > d$ бўлса, қатламнинг ва тагликнинг солиштирма ўтказувчанликлари бир-биридан катта фарқланса, тузатиш функциялари бирдан жуда кўп фарқ қилади. Агар контакт радиуси қалинликдан кичик бўлса ($r_0 < d$),

тузатиш функцияси ўтказувчанликларнинг исталган қийматларида бирга яқин бўлади. Солиштирма қаршилиқни тарқалган қаршилиқ усули билан ўлчашда бир жинсли бўлмаган намуналар учун тузатиш функциясини кириштириш ва электрон ҳисоблаш машиналарида ҳисоблаш билан боғлиқ бўлган қийинчиликларга қарамасдан, бу усул қалинлик бўйича солиштирма қаршилиқни аниқлашда қулайдир. Шунингдек, бу усулда қатлам қалинлиги ва унинг солиштирма қаршилигига оид муҳим чеклашлар мавжуд эмас. Юқорида келтирилган солиштирма қаршилиқни ўлчашдаги мулоҳазалардан кўринадикки, уларни ўлчашдаги хатоликларнинг энг катта ташкил этувчилари контакт юзасини ҳар бир ўлчашда такрорланмаслиги, контактларни Ом контакти бўлмаслиги, сирт ишловига боғлиқлиги, ҳажмий заряднинг таъсири билан боғлангандир.

1.9-§. Солиштирма қаршилиқни металл-яримўтказгич нуқтавий контактининг тешилиш кучланиши бўйича ўлчаш усули

Солиштирма қаршилиги ρ тағликидан катта бўлган эпитаксиал қатламларда (nn^+ , pp^+ — структураларда) солиштирма қаршилиқ металл-яримўтказгич нуқтавий контактининг (диоднинг) тешилиш кучланиши орқали аниқланиши мумкин. Усулни бир жинсли намуналарга, pp^+ , p^+p , $p-n$ эпитаксиал структураларга ҳам қўллаш мумкин. Лекин уни метрологик кўрсаткичлари бошқа усулларга нисбатан пастроқ бўлгани учун сўнгги туркум намуналарда ρ — ни ўлчашга кенг қўлланилмайди. Кўрилатган усул билан ρ — ни аниқлашда намуна сиртига учта зонд жойлаштирилади (1.23-расм). Зонд материалининг шакли шундай танланиши керакки, бунда 1 ва 2-зондлар контактлари Ом контактига яқин бўлиб, контакт қаршилиги кичик бўлсин, 3-зонд эса контакти яримўтказгич билан нуқтавий диод ҳосил қилсин. 1 ва 3-зондларга кутбланиши диоднинг тескари йўналишига мос келадиган пульсацияланувчан кучланиш берилади, 2 ва 3-зондлардан кучланиш, R — қаршилиқ ёрдамида диоддан ўтаётган ток ўлчанади. Диоднинг вольт-ампер характеристика (тавсифи)си кириш қаршилиги катта бўлган осциллографда кўрилади ва те-



1.23-расм. Металл-яримўтказгичли структураларда нуқтавий контактнинг тешилиш кучланиши бўйича солиштира қаршиликни ўлчаш схемаси (а), ВАХни тескари кучланиш соҳаси (б).

шилиш кучланиши соҳасидаги бурилиш нуқтаси қайд қилинади ($U_{\text{теш}}$). 3-зондни қўллаш билан 1 зонд контакт қаршилигининг таъсири йўқотилади.

Амалий тадқиқотлар нуқтавий диоднинг тешилиш кучланиши кўп омилларга, масалан, тешилиш кучланишининг ўтказувчанлик типига, зондга қўйилган кучланишга (босим кучига), контакт юзасига, сирт ишловига боғлиқлигини кўрсатади. Бу боғланишларни мукамал ёритган нуқтавий диод назарияси ва тешилиш кучланишини солиштира қаршилик билан боғлаган аналитик ифодаси йўқ. Демак, кўрилатган усул билан ρ ни тўғридан-тўғри ўлчов ўтказиш орқали аниқлаб бўлмайди. Шу сабабли ρ ни аниқлашда солиштира қаршиликлари маълум бўлган (эталон) намуналар ёрдамида $U_{\text{теш}} = f(r)$ боғланишни даражалаш графиги олиниб, ундан фойдаланиш тақозо этилади. Яримўтказгичлар солиштира қаршилиги 0,1 дан 10 Ом. см гача бўлган ораликда нуқтавий диодларда тешилиш кучланишининг ρ га боғлиқлик (даражалаш) графиги

$$U_{\text{теш}} = A\rho^b \quad (1.117)$$

кўринишида ифодаланади. Бу ерда: A, b — яримўтказгич, зонд материалларига ва бир қанча юқорида келтирилган омилларга боғлиқ коэффициентлар. Солиштирма қаршилиги $0,08 \leq \rho \leq 4$ Ом. см бўлган n -тип кремний намуналар билан вольфрам зонди ҳосил қилган нуқтавий диодда тешилиш кучланиши қуйидаги кўринишда ҳисобланади:

$$U_{\text{теш}} = 92\rho^{0,57} \quad (1.118)$$

Бу боғланиш 1 ва 2 зондларга диаметри 250 мкм, 3 зондга эса диаметри 60 мкм бўлган вольфрам қўллаш билан олинган. Усулни кремний эпитаксиал структураларига қўллаш бўйича ўтказилган текширишларга кўра эпитаксиал қатламларда ишончли натижалар олиш учун қатламнинг солиштирма қаршилиги $0,1 \leq \rho \leq 1$ Ом. см оралиқда бўлишлиги, қалинлиги 5 мкм дан кам бўлмаслиги мақсадга мувофидир. ρ нинг қуйи чегараси ВАХни тешилиш соҳасидаги кўринишининг ёмонлашиши, яъни тешилиш соҳасида бурилишнинг аниқ намоён бўлмаслиги билан, юқори чегараси катта тескари кучланишда тагликка томон силжиб, қатлам орқали тешилиши билан тушунтирилади. n - n^+ эпитаксиал структураларда n -қатламнинг солиштирма қаршилигини аниқлашда даражалаш графиги

$$U_{\text{теш}} = 68,39 + \rho^{0,536} + 21,23\rho^{0,877} \quad (1.119)$$

кўринишда ифодаланган муносабатдан фойдаланиш тавсия этилади. Зонд материалларининг $U_{\text{теш}} = f(\rho)$ га таъсирини ўрганишда пўлат, вольфрам, осмий қўлланилган. n -тип кремнийда зонд материалларининг таъсири катта эмаслиги аниқланган. Зонддаги босим кучининг тешилиш кучланишининг қийматига таъсири кучлироқдир. Босим кучини 10 г дан 100 г гача ўзгариш эталон монокристалл намуналарда 10%, эпитаксиал қатламларда 20% камайишга олиб келган. Кремний намуналаридаги қоникарли натижалар зондга 50 г куч қўйилганда учининг диаметри 250 мкм бўлган осмий зонд қўллаш билан олинган. Эпитаксиал қатламларда оғиш бурчаги 1° бўлган қия текислик ҳосил қилиб, солиштирма қаршиликнинг қалинлик бўйича тақсимотини ўрганиш мумкин. Икки ҳафта-

гача сақланган намуналарда ўзгармас ток билан ВАХ ни ўлчаш қўлланилганда натижаларнинг такрорланиши 5%, қисқа муддатда сақланган намуналарда 1% га етади. nn^+ , pp^+ — эпитаксиал қатлам солиштирма қаршилигини аниқлашда нуқтавий диод ҳосил қилувчи зондга вольфрам, Ом контактлари ҳосил қилувчи зондларга пўлат лезвия қўлланилган. Зондга босим кучи 1 г дан 10 г гача ўзгарганда даражалаш графиги

$$U_{\text{зонд}} = rE_{\text{max}} + \frac{r}{2\epsilon\epsilon_0\mu\rho_0} \left[2 - \sqrt{r(3\epsilon\epsilon_0\mu\rho_0 E_{\text{max}} + r)^2} \right] \quad (1.120)$$

назарий муносабат билан аниқланиши кузатилган. Бу ерда: $E_{\text{max}} = 210$ кВ/см; $\epsilon = 16$; $r = 13$ мкм; μ — ҳаракатчанлик. Сирти охирги босқичда $5\text{г HF} + 8\text{г HNO}_3 + 15\text{г CH}_3\text{COOH}$ — кислоталар аралашмасида кимёвий сайқалланган, солиштирма қаршилиги тўрт зондли усул билан ўлчанган германий намуналари ёрдамида даражалаш графиги олинган. ρ 15% гача хатолик билан ўлчанган бу усулнинг хатолиги, даражалаш графигини олишдаги хатоликлардан иборатдир. Арсенид галийли nn^+ , pp^+ эпитаксиал структураларда қатламнинг солиштирма қаршилигини, монокристалл намуналар солиштирма қаршилигини ўлчаш учун диаметри 3 мм бўлган карбид вольфрам таёқчадан учи 30° бурчак остида, диаметри 225 мкм гача чархланган зонд ишлатилиб, унга қўйилган босим кучи 200 дина бўлган ҳолда олинган даражалаш графиги намунада заряд ташувчиларнинг концентрацияси $10^{15} \leq n \leq 10^{19}$ см $^{-3}$ гача бўлган ораликда ўзгарганда

$$n \text{ — тип GaAs учун } U_{\text{зонд}} = 100(n/10^{15})^{-0,372}$$

$$p \text{ — тип GaAs учун } U_{\text{зонд}} = 75(p/10^{15})^{-0,338}$$

билан аниқланиши кўрсатилган. Даражалаш графиги 6 тадан Холл контакти олинган ва улар орқали n , p — аниқланган намуналар ёрдамида аниқланган.

Усулнинг хатоликлари тўғрисида қисқача тўхталамиз. Усулнинг асосий хатоликлари икки омил билан тешилиш кучланишини ўлчашдаги ва эталон ҳамда текшириладиган намуналар сиртининг ишлови бир хил бўлмаслигидан ҳосил бўлган хатоликлар билан аниқланади. $U_{\text{зонд}}$ ни аниқ ўлчаш учун ВАХ нинг тешилиш соҳасидаги бу-

рилиши кескин бўлиши керак. Бунга зонд, яримўтказгич материалларини, зондлар шаклини, унга қўйилган босим кучини танлаш билан эришилади. Потенциал тўсиқ ҳосил қилган контактнинг қаршилиги катта бўлиши керак. Зондлар учи диаметри $25 \div 100$ мкм оралиқда бўлади. Зондга қўйилган босим ошиши билан ρ камаяди. Босим кучи ортганда, зонд учларининг эластик ва пластик деформацияланиши туфайли, уларнинг контакт юзаси катталашади ва натижада тешилиш кучланишининг камайишига олиб келади. Зонд контакт юзаларининг тақрорланмаслиги билан боғлиқ тасодифий хатоликларни камайтириш учун потенциал тўсиқ ҳосил қиладиган зонд-қаттиқ металл ёки қаттиқ қотишмалар, масалан, вольфрам, карбид-вольфрам, пўлат, осмий, родийлар ишлатилади.

Ўлчаш ва даражалаш пайтида зондларга қўйилган босим кучлари бир хил қилиб олинади: оқибатда, ўлчов натижаларининг бир-бирига яхши яқинлашиши таъминланади. Ўлчов зондига (нуқтавий диодга) қўйилган *оптимал* кучланиш $0,2 \div 0,4$ Н оралиғида ётади, ёрдамчи контакт қаршилигининг $U_{\text{теш}}$ га таъсирини камайтириш учун уларга қўйилган босим кучи 0,5 дан 1 Н гача орттирилади, ўлчаш пайтида потенциал тўсиқ соҳасида 1 Вт гача қувват ажралиши мумкин ва у контакт соҳасининг кучли қизишига олиб келиши мумкин. Шунинг учун тешилиш кучланишининг қиймати ўлчаш усулига боғлиқ. Контактда ажраладиган қувватни камайтириш учун ўлчовни импульс режимда ўтказиш тавсия этилади. Импульс давомийлигининг камайиши билан U_T ортади. Тасодифий ва мунтазам хатоликлар эталон намуналар билан текшириладиган намуналар сиртининг ишловига боғлиқ. Одатда даражалаш графиги пластина шаклидаги монокристалл намуналарда ўтказилади, шунинг учун уларнинг сирти механик ёки кимёвий усул билан сайқалланади, эпитаксиал қатламда эса сирт ҳеч қандай ишловдан ўтмайди. Эталон намуна сиртини эпитаксиал қатлам сиртига яқинлаштириш учун *НСІ* буғида едириш тавсия этилади, бу билан эталондаги сирт ишлов технология жараёни эпитаксиал қатлам ўстириш жараёнига яқинлаштирилади.

Тажрибада кузатилган даражалаш графигини ифодаловчи (1.117) формулада коэффициент (b) нинг 0,51 дан 0,66

гача ўзгариши ўлчаш натижаларига таъсир қилувчи куп омиллар билан тушунтирилади, шунинг учун усулнинг хатолиги туғридан-туғри ρ ни ўлчаш усулларига нисбатан катта. Купгина муаллифларнинг кўрсатишларича, у 10% дан 70% гача етади. Статистик текширишлардан маълум бўлишича, усулнинг тасодифий хатолиги ишонч эҳтимоллиги 0,95% бўлганда солиштирма қаршилиги $\rho=0,1$ Ом · см намуналарда 54%, $\rho=1,0$ Ом · см учун 40%, $\rho=5$ Ом · см учун эса 70% га тенг.

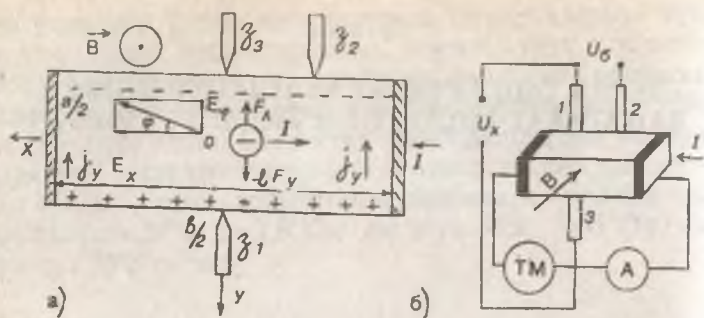
ЗАРЯД ТАШУВЧИЛАР КОНЦЕНТРАЦИЯСИ ВА ҲАРАКАТЧАНЛИГИНИ ЎЛЧАШ УСУЛЛАРИ

Эркин заряд ташувчилар (электронлар, каваклар) концентрацияси (n , p)ни ва ҳаракатчанлик (μ_p , μ_n)ни ўлчашнинг бир қанча усуллари мавжуд. У ёки бу усулнинг қўлланishi уларнинг метрологик характеристикасига, ўлчанаятган параметрларни тушунтириш маълумотларга бойлиги, ўлчаш усулларининг физик асослари, намунанинг электрофизик хоссалари, геометрик шакли ва ўлчамларига боғлиқ. Ўлчаш усулини танлашда булардан ташқари ускуналарнинг техник мураккаблиги, физик катталикларни ўлчашдаги хатоликларни назарда тутиш керак. Заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчаш усуллари ичида кенг тарқалгани Холл эффектига асосланган усулдир. Бу усул билан яримўтказгич намунада n ни ўлчашдан ташқари, электр ўтказувчанлик типини ҳам аниқлаш мумкин. Заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини температурага боғлиқлигини ўлчаб, таққиланган зона кенглигини, киришмаларнинг маҳаллий энергетик сатҳлари, ионизация энергияси, киришма атомларнинг концентрацияси ва заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмларини аниқлаш мумкин.

2.1-§. Холл эффекти ёрдамида заряд ташувчиларнинг концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчаш усуллари

а) Холл электр юритувчи кучи

Холл эффекти яримўтказгич намуналарда уларга электр ва магнит майдонларининг бир вақтдаги таъсиридан вужудга келади. x ўқи йўналишида (намуна бўйи бўйлаб)



2.1-расм. Холл электр юритувчи кучининг пайдо бўлишини тушинтиришга чизма (а) ва Холл эффектини ўлчаш схемаси (б)

оқаётган параллелепипед шаклидаги намунани унга тик z ўқи бўйича йўналган магнит майдонига киритганда, намунада магнит ҳамда ток I йўналишига тик бўлган y ўқи йўналишида кўндаланг электр юритувчи куч (ЭЮ К) ҳосил бўлишига Холл эффекти деб аталади (2.1-расм). Бу эффектнинг моҳиятини қисқача кўриб чиқайлик. Узунлиги a , эни b , қалинлиги d бўлган намуна берилган бўлсин. x ўқи бўйича I_x ток ўтаётган намунани z ўқи бўйича йўналган магнит майдонга тик қилиб ўрнатганда x — ўқи бўйича $V_x = -\mu_n E$ ўртача дрейф тезлик билан ҳаракатланаётган электрон Лоренц кучи

$$F = -e[V \times B] \quad (2.1)$$

таъсирида x ва z ўқларига тик бўлган y — ўқи йўналишига бурилади (оғади). Электрон ва кавакларнинг дрейф тезликларининг йўналиши ва заряд ишоралари ҳар хил бўлгани учун улар намунанинг фақат бир томонида оғади. Шундай қилиб, намунада y — ўқи йўналишида кўндаланг

$$I_y = I_{ny} + I_{py} \quad (2.2)$$

ток пайдо бўлади. Намунанинг y — ўқи йўналишидаги ўлчами чекланган ҳолда I_y — ток намуна устки сиртида (расмда келтирилган ҳол учун) заряд ташувчиларнинг тўпланишига, остки қисмида эса уларнинг ишораларига

тескари ишорали етишмаган зарядлар тўпланишига олиб келади. Натижада намунанинг остки ва устки томонлари қарама-қарши зарядланади ва кўндаланг Холл электр майдонининг ошиб бориши унинг заряд ташувчиларга (электрон ёки кавакка) таъсир кучи ($F=eE$) Лоренц кучига ва кўндаланг I_x — ток нолга тенг бўлгунча давом этади. Натижавий электр майдон кучланганлиги (E_y)х — ўқига нисбатан магнит майдон индукцияси B_z га пропорционал бўлган Холл бурчакка оғади

$$\operatorname{tg} \psi_H = \frac{E_y}{E_x} = \mu_H \cdot B_z \quad (2.3)$$

бу ерда: μ_H — ҳаракатчанлик бирлиги билан ўлчанадиган пропорционаллик коэффициент. У Холл ҳаракатчанлиги деб юритилади. Заряд ташувчиларнинг Холл ҳаракатчанлиги электр ўтказувчанликни ($\sigma = en\mu_n$) аниқловчи микроскопик ҳаракатчанликдан фарқ қилади. Қаттиқ жисмларда кинетик ҳодисаларнинг назариясига кўра бу ҳаракатчанликлар

$$\mu_{nH} = e\langle \tau^2 \rangle / \mu_n \langle \tau \rangle; \quad \mu_n = \frac{e \langle \tau \rangle}{m_n} \quad (2.4)$$

ифодалар билан аниқланади. Бу ерда: τ — заряд ташувчиларнинг релаксация вақти, μ^* — заряд ташувчиларнинг **эффектив массаси**, $\langle \tau \rangle$, $\langle \tau^2 \rangle$ — релаксация вақти ва унинг квадратини заряд ташувчилар энергияси бўйича ўрталаштирилган қиймати. Бу ифодалардан кўринадики, μ_{nH} ва μ_n ҳаракатчанликларни фарқли бўлиши релаксация вақтининг энергия бўйича ҳар хил усул билан ўрталаштирилиши экан. Холл тажрибадан кучсиз магнит майдонда Холл электр майдон кучланганлиги ($E_H = E_y$) ни қуйидаги эмперик формула билан аниқланишини кўрсатди:

$$\vec{E}_y = \vec{E}_H = R_H [\vec{j}_x \vec{B}] \quad (2.5)$$

Бу ерда: j_x — ток зичлиги, R_H — намуна хоссасига боғлиқ Холл доимийси, $\vec{B}$ — магнит майдон индукцияси вектори. (2.3) ва (2.5) формулалардан

$$j_x R_H = \mu_H E_x \quad (2.6)$$

тенгликни оламиз. Намуна n — типли яримўтказгич бўлганда, ток зичлиги ифодаси $j_x = \sigma E = e \mu_n n E_x$ ни (2.6) га қўйиб, Холл доимийсининг

$$R_{nH} = \frac{\mu_{nH}}{en \mu_n} = \frac{r_n}{en} \quad (2.7)$$

кўринишдаги ифодасини оламиз. Худди шунга ўхшаш p — тип ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичларда Холл доимийси қуйидагича бўлади:

$$R_{pH} = \frac{\mu_{pH}}{ep \mu_p} = \frac{r_p}{ep} \quad (2.8)$$

Бу ерда: n, p — мос равишда электрон ва кавак концентрацияси, r_n, r_p мос равишда электрон ва кавакнинг Холл омиллари бўлиб, Холл ҳаракатчанликларининг дрейф ҳаракатчанликларига нисбати $r_n = \frac{\mu_{nH}}{\mu_n}$, $r_p = \frac{\mu_{pH}}{\mu_p}$ билан ифодаланадилар ва улар $\langle \tau^2 \rangle / \langle \tau \rangle^2$ га тенг бўлган катталик билан аниқланади. r нинг қиймати заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмига боғлиқ бўлиб, заряд ташувчиларнинг релаксация вақтини, уларнинг энергияга боғланиш функциясини кўрсатади. Содда зонали айнимаган яримўтказгичларда заряд ташувчилар кристалл панжаранинг иссиқлик тебранишида сочилса, Холл фактори $r = r_n = r_p = 3\pi/8 \approx 1,17$ га, ионлашган киришма атомларида сочилса, $r = 1,93$ га, нейтрал атомларда сочилса, $r = 1$ га тенг бўлади.

Ўтказувчанликка икки хил заряд ташувчилар: электрон ҳамда кавак қатнашса, Холл доимийси қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$R_H = \frac{r_n \mu_n^2 n - r_p \cdot p \cdot \mu_p^2}{(en \mu_n + ep \mu_p)^2} \quad (2.9)$$

Шундай қилиб, заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини аниқлаш учун солиштирма қаршиликни (ёки ўтказувчанликни) ва Холл доимийсини ўлчаш керак. Бу ўлчовни ўтказиш (216-расмда келтирилган ҳол) учун юқори сиртига иккита зонд (1 ва 2), пастки қисмига зондлардан бирининг қаршисига 3-зонд жойлаштирилади. 1 ва 3 зондлар орасидаги потенциаллар айирмаси орқали Холл электр юритувчи кучини, 1 ва 2 зондлар орқали U_6 — намунанинг бир қисмидаги кучланишнинг тушуви ўлчанади. Холл электр майдон кучланганлиги $E_H = U_H/b$ ва ток зичлиги $j_x = I_x/bd$ га тенг бўлганлигини ҳисобга олган ҳолда (2.5) формуладан Холл зондлари орасидаги потенциаллар айирмаси, яъни Холл кучланиши тушуви

$$U_H = R_H I_x B_z / d \quad (2.10)$$

ифода билан аниқланади:

$$R_H = \frac{U_H d}{I_x B_z}; \quad \left[\frac{\text{м}^3}{\text{Кл}} \right] \quad (2.11a)$$

Агар (2.10) га кирган катталиклар кучланиш, ток кучи, узунлик, магнит майдони индукцияси СИ системасида (Вольт, Ампер, Теслада) ўлчанса, Холл доимийси R_H бирлиги $\text{м}^3/\text{Кл}$ бўлади ва (2.11a) формула билан ҳисобланади. Агар магнит индукцияси Гауссда ($1\text{T} = 10^4\text{Гс}$), узунлик сантиметрда ўлчанса, Холл доимийсининг бирлиги $\text{см}^3/\text{Кл}$ бўлади ва у

$$R_H = 10^8 \frac{dU_H}{I_x B}; \quad [\text{см}^3/\text{Кл}] \quad (2.116)$$

билан ҳисобланади. Юқорида кўрилган Холл эффекти узун $a > b$, d намуналарда ўринли. Чунки бунда, физик мулоҳазаларга кўра, намунанинг марказий қисмида ток зичлиги j , ва майдон кучланганлиги x га боғлиқ бўлмайди. j_x ва E_x лар y координатага боғлиқ эмас. Намунанинг узунлик бўйича ўрта қисми бир жинсли бўлади. $y = \pm b/2$ сиртлар-

да тупланган зарядлар намуна кундаланг кесимига ўтказилган Ом контактлари орқали оқа бошлайди. Ток ўтадиган Ом контактлари соҳасига яқин жойда x бўйича бир жинсли бўлмаган электр майдон кучланганлигининг пайдо бўлишига олиб келади. Бу соҳада Лоренц кучи Холл майдони билан тенглаша (мувозанатлаша) олмайди, y ўқи бўйича ташкил этувчиси $j_y \neq 0$ бўлади. Бу соҳанинг кенглиги эса $(1+1,5)b$ га тенг. Ўлчов зондлари шу соҳадан ташқарида бўлганда (2.10) ва (2.11) формулалар ўринли бўлади. Бу уни $a \geq 3b$ бўлган намуналарга қўллаш мумкин деган сўздир. Акс ҳолда E_y ва U_H ларнинг заряд оқиши билан боғлиқ бўлган камайишини ҳисобга олишга тўғри келади. Кичик магнит майдонда $\mu_n B \ll 1$ Холл зондлари 1 ва 3-намунанинг ўртасида ($x=0$ да) жойлашган бўлса, Холл Э Ю К

$$U_H = \frac{a}{b} \Phi \left(\frac{a}{b} \right) R_H \cdot \frac{IB}{d} \quad (2.12)$$

формула билан топилади. Ҳисоблашларнинг кўрсатишича, 0,7% дан кичик хатолик билан ўлчанганда $\Phi(a/b)$ ни қуйидаги формула билан аниқлаш мумкин:

$$\Phi(\alpha) = \Phi \left(\frac{a}{b} \right) = 0,742 \operatorname{th} \left[\frac{\alpha(1 + \alpha/2\pi)}{0,742} \right] \quad (2.13)$$

б) Холл эффекти билан бир вақтда содир бўладиган — (ҳамроҳ) эффектлар

Холл эффектини ўлчашда назорат қилиб бўлмайдиган мунтазам (систематик) ва тасодикий хатоликлар манбаи бўлган, ўлчов натижаларини хатоликка олиб келувчи бир қанча эффектлар (ҳодисалар) пайдо бўлади. Буларга қуйидагиларни кўрсатиш мумкин:

Эттенгаузен эффекти. Намунадан магнит майдон йўналишига тик бўлган йўналишда ток ўтганда уларга тик бўлган йўналишда температура градиентининг пайдо бўлишига Эттенгаузен эффекти деб юритилади. Агар ток x ўқи, магнит майдони z ўқи бўйича йўналган бўлса, y ўқи бўйича пайдо бўлган температура градиенти магнит

майдон индукцияси B га, ток зичлиги j_x га пропорционал:

$$\nabla T_z = \frac{\partial T}{\partial y} = -K_z j_x B_z \quad (2.14)$$

Бу ерда: K_z — Эттенгаузен коэффициенти.

Магнит майдони тезлиги ўртача тезликдан катта “иссиқ” заряд ташувчиларга (электрон ёки кавак) каттароқ куч билан таъсир этади, тезлиги ўртача тезликдан кичик бўлган “совуқ” заряд ташувчиларга эса таъсир кучи кичикроқ бўлади. Маълумки, Холл электр майдонининг электронга (кавакка) таъсир кучи ўртача тезликка эга бўлган электронга (кавакка) магнит майдонининг таъсир кучини, яъни Лоренц кучини компенсациялай олади ва натижада улар оғмасдан x ўқи бўйича ҳаракатланади. Шунинг учун магнит майдон таъсирида заряд ташувчиларнинг тезлик бўйича ажралиши юзага келади. “Иссиқ” заряд ташувчилар (2.1-расм) юқори томонга, “совуқ” заряд ташувчилар пастки томонга оғади. Заряд ташувчилар билан кристалл панжара орасида энергия алмашинуви туфайли, “иссиқ” заряд ташувчилар тўпланган томон кристалл панжаранинг мувозанатдаги ҳолатига нисбатан исийди, “совуқ” заряд ташувчилар тўпланган томони совийди ва намунада кўндаланг температура градиентининг пайдо бўлишига олиб келади. Эттенгаузен эффектининг ишораси ҳам Холл эффекти каби майдон ва ток йўналишига боғлиқ. Кўндаланг температура градиенти ҳосил қилган Зеебек эффекти туфайли вужудга келган Эттенгаузен термоэлектр юритувчи кучи, яъни Эттенгаузен кучланиши ҳар доим Холл кучланишига қўшилади. Уни ток ёки магнит майдон йўналишини ўзгартириш билан ажратиб бўлмайди;

Нернст-Эттенгаузен эффекти x ўқи бўйича температура градиенти бўлган намунани x ўқига тик z ўқи бўйича йўналган магнит майдонига жойлаштирилганда буларга тик бўлган y ўқи бўйича намунада кўндаланг потенциаллар айирмасининг пайдо бўлишига Нернст-Эттенгаузен эффекти дейилади. Температура градиенти натижасида намунада иссиқ томондан совуқ томонга диф-

фузияланувчи заряд ташувчиларга магнит майдонида Лоренц кучи таъсир этиб, уларни бир томонга оғдиради. Бунинг оқибатида магнит майдон индукцияси $\vec{B}$ га ва температура градиенти $\nabla_x T$ га пропорционал бўлган кўндаланг потенциаллар айирмаси — кучланиш пайдо бўлади.

$$U_{N9} = A_{N9} \cdot \nabla_x T \cdot B_z \cdot b \quad (2.15)$$

Бу ерда: A_{N9} — Нернст-Эттенгаузен коэффициенти, b -у ўқи йўналишидаги намуна ўлчами. Нернст-Эттенгаузен эффектининг ишораси магнит майдон йўналиши ўзгариши билан ўзгаради, у ток йўналишига боғлиқ эмас;

Риги-Ледюк эффекти x ўқи бўйича температура градиенти бўлган намунани унга тик магнит майдони $\vec{B}$ га жойлаштирилганда Лоренц кучи таъсирида диффузияланувчи заряд ташувчилардан “иссиқ” заряд ташувчилар бир томонга, “совуқ” заряд ташувчилар иккинчи томонга оғади (бурилади) ва натижада уларнинг кристалл панжара билан энергия алмашинуви туфайли, Эттенгаузен эффектига ўхшаш кўндаланг y — ўқи бўйича температура градиенти пайдо бўлади:

$$\nabla_y T = A_{RZ} \nabla_x T B_z \quad (2.16)$$

Бу намунадаги кўндаланг температура градиенти Холл зондлари орасида қўшимча потенциаллар айирмасини U_{RZ} вужудга келтиради. Бу ҳодиса Риги-Ледюк эффекти деб юритилади. U_{RZ} нинг ишораси магнит майдон йўналишига боғлиқ бўлиб, ундан оқаётган ток йўналишига боғлиқ бўлмайди;

Кўндаланг магнит қаршилик эффекти (магнитосопротивление).

Юқорида кўрдикки, ўртача тезлик билан ҳаракатланётган заряд ташувчиларга Лоренц кучи таъсир этмайди, чунки Холл электр майдони уни компенсациялайди. Шунинг учун уларнинг магнит майдонида *траекторияси* ўзгармайди. Лекин заряд ташувчилардан тезликлари ўртача тезликдан катталари ҳамда кичиклари E_z майдон йўналишига нисбатан икки томонга оғади. Уларнинг ҳаракат

тезлиги электр майдони E_x бўйича камаяди деб қараш намуна қаршилигининг ошиши деб қараш билан бир хил. Бу кўндаланг магнитоқаршилиқ эффекти деб аталади. Магнит майдонида солиштирма қаршилиқнинг нисбий ўзгариши кичик иккинчи тартибли функция билан боғланган бўлиб,

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = (\mu_{\text{н}} B)^2 \quad (2.17)$$

билан аниқланади. Шунинг учун кичик магнит майдонида ($\mu_{\text{н}} B \ll 1$) ўлчанаётган солиштирма қаршилиққа кўндаланг магнитоқаршилиқ эффектнинг таъсирини эътиборга олмаса ҳам бўлади;

Холл зондларининг ноэквивпотенциал сиртларда жойланиши. Холл Э Ю К ига таъсир этадиган яна бир омил сифатида Холл электродларини ноэквивпотенциал сиртга жойлашганда ҳосил бўладиган кучланиш U_0 ни кўрсатиш мумкин. Бу кучланиш 1 ва 3-зондлар силжиган қисмининг қаршилиғига, намунадан ток ўтгандаги кучланишнинг тушувига тенг бўлади. U_0 Холл кучланишига қўшилиши ҳам, айирилиши ҳам мумкин. Унинг ишораси фақат ток йўналишига боғлиқ. Юқорида ёритилганлардан кўринадики, Холл кучланишини аниқ ўлчаш учун кўрилган эффектларни инобатга олиш зарур экан.

2.2-§. Холл Э Ю К ни ўлчаш усуллари

а) Ўзгармас ток ва ўзгармас магнит майдони ёрдамида Холл кучланишини ўлчаш

Бу Холл электр юритувчи кучини ўлчашнинг энг содда ва кенг тарқалган усулидир. Параллелепипед шаклидаги намунаи ўзгармас ток манбаига улаб, ундан ток ўтказилади. Намуна ўзгармас магнит ёки электромагнит қутблари орасига киритилади. Холл эффектини кичик магнит майдонда ўлчаш учун магнит майдон индукцияси 1 Теслагача олинади. Магнит қутблари орасидаги масофани ёки электромагнитда ундан оқаётган токни ўзгарти-

риб, магнит майдон индукциясининг исталган қиймати-ни олиш мумкин. Магнит майдон уланганда, унинг таъсирида қаршилиқнинг ўзгариши намунадан ўтаётган токни ўзгартирмаслиги учун, ток манбаининг чиқиш қаршили-ги катта бўлиши керак. Намунадан оқаётган токни амперметр билан ёки кетма-кет уланган қаршилиқдаги кучланишни ўлчаш орқали аниқлаш мумкин. Холл электр юритувчи кучи намунанинг тегишли томонига жойлаштирилган (қисиб қўювчи) контактлар ёки нуқтавий зондлар билан ўлчанади. Ўлчов натижалари катта ишончга эга бўлиши учун, кўп ҳолларда, кавшарланган (қалайланган) ёки пайвандланган контактлар ишлатилади. Холл контактларининг юзаси катта бўлиб қолиши намунада ток тақсимотининг бузилишига ва намунанинг шунтланишига олиб келиши мумкин. Бу юқори Ом ли намуналарда айниқса муҳимдир. Контактлар қаршилигининг ўлчов натижаларига таъсирини йўқотиш учун зондлар орасидаги кучланиш одатда ички қаршилиги катта бўлган вольтметр-электромметрларда компенсация усули билан ўлчанади. Холл эффекти билан бирга содир бўладиган, юқорида кўрилган ҳодисаларни ҳисобга олганда, Холл электродлари (1 ва 3) да ўлчанган кучланиш Эттенгаузен, Нернст-Эттенгаузен, Риги-Ледюк эффектлари ҳосил қилган кучланишлар ҳамда Холл зондларининг бир-бирига нисбатан силжишидан ҳосил бўлган нозквивипотенциал кучланишлар йиғиндисидан иборат бўлади. Бу натижавий (йиғинди) кучланишдан Холл кучланишини ажратиш учун магнит майдон йўналишини икки марта ўзгартириб, тўрт бора ўлчов ўтказилади. Бунда ўлчанган кучланиш қуйидагича бўлади:

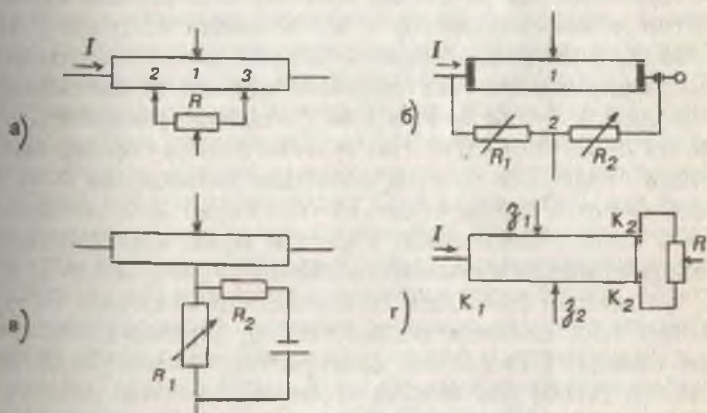
$$\begin{aligned}
 I+; B+ & \quad U_1 = U_H + U_{\text{Э}} + U_{N\text{Э}} + U_{RZ} + U_0 \\
 I-; B+ & \quad U^2 = -U_H - U_{\text{Э}} + U_{N\text{Э}} + U_{RZ} - U_0 \\
 I-; B- & \quad U_3 = U_H + U_{\text{Э}} - U_{N\text{Э}} - U_{RZ} - U_0 \\
 I+; B- & \quad U_4 = -U_H - U_{\text{Э}} - U_{N\text{Э}} - U_{RZ} + U_0
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Бў тўрт ўлчов асосида қуйидаги

$$U_H + U_3 = \frac{(U_1 - U_2) + (U_3 - U_4)}{4} \quad (2.19)$$

ифодани оламиз. Бундан кўринадики, Холл ва Эттенгаузен кучланишларининг ишоралари бир хил бўлгани учун Холл кучланишида қўшимча Эттенгаузен кучланиши сақланади. Қолган эффектларнинг Холл кучланишига таъсирини йўқотиш мумкин экан.

Шуни эслатиб ўтиш керакки, намунадаги бўйлама температура градиенти ишораси ток йўналишига боғлиқ бўлса (масалан, Пельте эффекти ёки барьер туфайли), унда тўртта ўлчов билан фақат Холл электродларининг ноэквивипотенциал кучланишини йўқотиш мумкин. Қолган эффектларни таъсирини йўқотиш учун ўзгарувчан ток, ўзгарувчан магнит майдон усулларидадан фойдаланилади. Юқори Ом ли яримўтказгич намуналарда ноэквивипотенциал кучланишни назарий йўқотиш усули тўрт марта Холл электродларидаги кучланишни ўлчаш каби) ҳамма вақт ҳам натижа беравермайди. Бу туркум намуналарда токнинг ортиши Холл зондлари орасидаги кучланишнинг ўсишига олиб келади, баъзан Холл кучланишидан ҳам катта бўлиб қолиши мумкин. Бундай ҳолларда U_H ни ўлчаш аниқлиги пасайиб, уни ўлчаш мумкин бўлмай



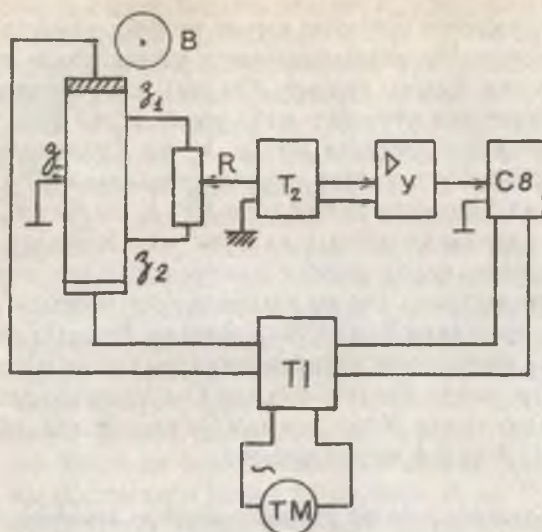
2.2-расм. Холл электродлари (контактлари) потенциалларининг бир хил бўлмаслиги билан боғлиқ кучланишни йўқотиш схемалари.

қолади. Шунинг учун Холл электродларининг аниқ ўрнатилмаганлиги билан боғлиқ бўлган U_R нинг ўлчов натижаларига таъсирини йўқотишда бошқа бир неча усуллар қўлланилади, яъни ноэквипотенциал кучланиш компенсацияланади. 2.2-расмда амалиётда қўллаб келинаётган кучланишни компенсациялаш усули билан ўлчашнинг чизмаси келтирилган. Уч зондли чизма билан U_R ни йўқотишда R потенциометрда (қаршилиқда) 1-зонднинг потенциалига тенг нуқта топилади. Бу қаршилиқ намунани шунтламаслиги учун, яъни ундан ўтадиган токнинг намунадан оқаётган токка нисбатини ҳисобга олмайдиган бўлиши керак. Шунинг учун унинг қаршилигидан катта $R_1 \gg R_2$ бўлиши керак. Ўлчаш чизмасига катта қаршилиқнинг уланиши ўлчашнинг сезгирлигини камайтиради. Уч зондли чизма кўпроқ қаршилиги кичикроқ намуналарда қўлланилади. Кўприк чизмасини (2.2б-расм) қўллаш билан U_H ни ўлчашда 1-зонднинг чап ва ўнг томонидаги намуна қаршилиқлари ҳамда ўзгарувчан R_1 ва R_2 қаршилиқлар кўприкнинг тўртта елкасини ҳосил қилади. Магнит майдон уланмаган ($B=0$) да R_1 ва R_2 қаршилиқларни ўзгартириб, 1 ва 2-нуқталарда ҳар хил потенциалга эришилади. Бу усул билан Холл электродларида Холл электр кучининг ярми ўлчанади, чунки намунадан оқаётган ток икки қисмга бўлинади. Шунинг учун унинг сезгирлигини камчилик деб кўрсатиш мумкин. 2.2в-расмда келтирилган чизма ёрдамида U_0 — кучланишни йўқотиш учун K_2 ва K_3 контактлар орасига уланган қаршилиқ орқали уларда бир-бирига тенг бўлмаган шундай потенциаллар топиладики, бунда $B=0$ да 1 ва 2 зондлар орасидаги кучланиш нолга тенг бўлади ва эквипотенциал сиртлар силжийди. Уларнинг бундай силжиши натижасида 1 ва 2 зондлар битта сиртда ётади. Бу усул билан U_0 ни компенсация қилиш намунанинг узунлиги унинг кенглиги тартибида бўлгандагина амалга оширилади. Акс ҳолда K_2 ва K_3 контактлар орасидаги потенциаллар айирмаси намунанинг ўрта қисмида эквипотенциал сиртларга таъсири кам бўлади. 2.2в-расмда келтирилган чизмада алоҳида олинган ташқи ток манбаи билан U_0 компенсацияланади. Бунда R_1 қаршилиқдан ташқи ток манбаи орқали ток ўтказилганда унга тушган кучланиш билан компенсацияланади. Ўлчов сезгирлигини камайтирмаслик учун чиз-

мада R , қаршилик етарлича кичик қилиб олиниши керак. Заряд ташувчилар концентрацияси кичик, ёмон ўтказувчанликка эга бўлган (юқори Ом ли) намуналарда Холл электр юритувчи кучи бир неча милливольт бўлади. Намуна қаршилиги ортиши билан U_x ни ўлчашдаги хатоликлар ортиб боради. Агар намуна қаршилиги 10^6 Ом тартибида, гальванометр сезгирлиги 10^{29} А/шк бўлса, электр юритувчи кучни ўлчашдаги хатолик ≈ 1 мВ бўлади. Ўлчов чизмаларининг сезгирлигини ошириш учун гальванометр-ни электрометрлар билан алмаштириш мумкин. Лекин ўзгармас ток билан Холл кучланишини ўлчашда электрометр ёки ўзгармас ток кучайтиргичлари билан ишлаш қийинчилиги пайдо бўлади. Юқори Ом ли намуналарда бу қийинчиликларни Холл токини ўлчаш билан йўқотиш мумкин (2.3 ва 2.4 ларни қаранг).

б) Ўзгарувчан ток ва ўзгармас магнит майдони ёрдамида. Холл электр юритувчи кучини ўлчаш

Холл кучланишини ўлчаётганда, намунада ток йўналишида пайдо бўлган температура градиенти ишораси ток йўналишига боғлиқ бўлса, ўзгармас магнит ва ўзгармас ток ёрдамида уларнинг йўналишини ўзгартириш усули билан Нернст, Риги-Ледюк кучланишларини йўқотиш мумкин эмаслигини юқорида эслатиб ўтган эдик. Иссиқлик жараёнларининг инерционлиги сабабли, намунадан юқори частотали ток ўтказиш билан намунадаги температура градиенти ва у билан боғлиқ бўлган Нернст, Риги-Ледюк эффектларининг Холл эффектига таъсирини йўқотиш мумкин. Қизиш ва у билан пайдо бўлган кучланишлар вақт бўйича ўзгармайди, Холл ўлчов асбоблари фақат ўзгарувчан электр сигнални ўлчайди. Намунадан ўзгарувчан ток ўтганда магнит майдонида ўзгарувчан ток частотасига тенг бўлган Холл кучланиши ҳосил бўлади. Одатда ўзгарувчан электр сигнални ўзгармас сигналга нисбатан кучайтириш осон. Ўзгарувчан токни маълум яримўтказгичларга қўллаш билан Холл кучланишини ўлчовчи сезгир қурилмани яратиш мумкин. Бу усул Холл электр юритувчи кучини катта олиш қийин бўлган, ҳаракатчанлиги, солиштира қаршилиги кичик бўлган намуналарда концентрация ва ҳаракатчанликни ўлчашда катта аҳамиятга эга. Ўлчов пайтида намунадан ўтаётган ўзгарувчан ток-



2.3-расм. Холл электр юритувчи кучини ўзгарувчан ток ва ўзгармас магнит ёрдамида ўлчаш схемаси.

нинг Холл электр юритувчи кучи электр занжирда ҳосил қиладиган кераксиз сигналларни (наводокни), шовқинни йўқотиш керак. 2.3-расмда Холл электр юритувчи кучнинг ўзгарувчан ток ва ўзгармас магнит ёрдамида ўлчаш чизмаларидан бири келтирилган. Ўзгарувчан ток манбаидан (ТМ) ажратувчи трансформатор Тр1 орқали намунага кучланиш берилади. Шу трансформатордан яна таянч сигнал синхрон детекторга берилади. Ноэквипотенциал кучланиш $B=0$ да R — қаршилик орқали компенсацияланади. Холл контактларидан олинадиган кучланиш Тр2 — трансформатор орқали кучайтиргичга, сўнг синхрон детекторга берилади ва Холл кучланиши ўлчанади. Синхрон детектор ҳар хил шовқинларни камайтиради ёки тўлиқ йўқотади. Тр2 трансформаторнинг кириш қаршилиги R — қаршиликка ва зондлар орасидаги қаршиликка нисбатан етарлича катта бўлиши керак.

Бу чизмада частотаси $\nu=570$ Гц бўлган ўзгарувчан токни қўллаш билан кичик қаршиликли намуналарда Холл электр юритувчи кучини ўлчашда сезгирлиги 10^{-9} В га ет-

ган. Бу чизма билан магнит майдон индукцияси $B=4600$ Гс да заряд ташувчилар концентрацияси $n=6 \cdot 10^{21}$ см $^{-3}$, ҳаракатчанлиги $\mu_n=2$ см/В. с бўлган намунада Холл эффекти ўлчанган. Шунини таъкидлаш керакки, бу усул билан ўтказувчанликнинг типини ҳам аниқлаш мумкин. Агар Холл кучланиши билан намунадан ўтаётган ток бир фазада бўлса, p -тип намунада $R_H > 0$ бўлади, агар қарама-қарши фазада бўлса, n -тип намунада $R_H < 0$ бўлади.

в) Холл электр юритувчи кучини ўзгарувчан ток ва ўзгарувчан магнит майдони усули билан аниқлаш

Намунадан ўтаётган ток ва унга қўйилган магнит майдони ўзгарувчан бўлиб, уларнинг ўзгариши қуйидаги қонуниятлар бўйича бўлсин:

$$\begin{aligned} B &= B_0 \cos(\omega_1 t + \delta_1) \\ I &= I_0 \cos(\omega_2 t + \delta_2) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Бу ерда: B_0 , I_0 — мос равишда магнит майдон индукцияси ва ток амплитудалари, ω_1 ва ω_2 — уларнинг частоталари, δ_1 ва δ_2 — фазалар силжиши, $\omega_2 > \omega_1$ деб ҳисобланса, (2.24) ни (2.15) га қўйсак, Холл электр юритувчи кучи ифодаси қуйидаги кўринишни олади:

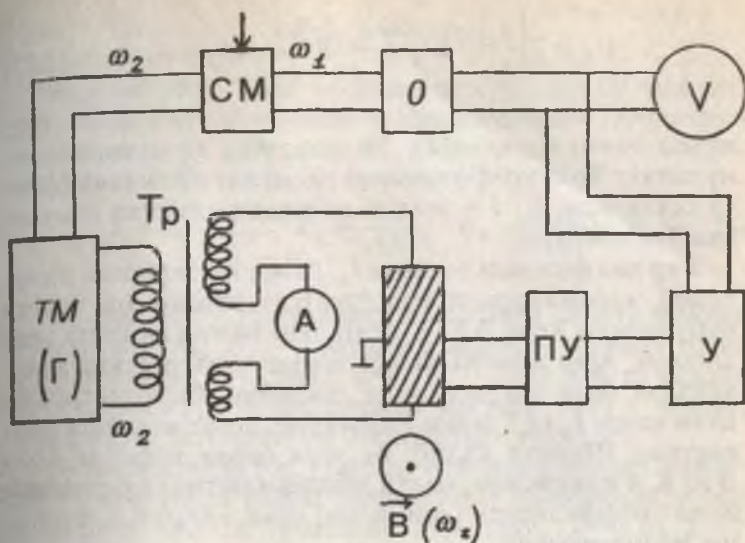
$$\begin{aligned} U_H &= \frac{I_0 B_0}{d} R_H \cdot \cos(\omega_1 t + \delta_1) \cdot \cos(\omega_2 t + \delta_2) = \\ &= \frac{I_0 B_0}{d} R_H \left\{ \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\delta_2 - \delta_1)] + \right. \\ &\quad \left. + \cos[(\omega_2 + \omega_1)t + (\delta_1 + \delta_2)] \right\} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Бундан кўринадики, ўзгарувчан Холл ЭЮК ифодаси частотаси $(\omega_2 - \omega_1)$ ва $(\omega_2 + \omega_1)$ бўлган иккита гармоникани ўз ичига олади. Холл зондлари орасидаги ўзгарувчан кучланишни гармоника частоталаридан бирига $\omega_2 - \omega_1$ ва $\omega_2 + \omega_1$, созланган танловчи кучайтиргичга бериб, Холл ЭЮК ининг амплитудаси ўлчанади ва Холл доимийси

$$R_H = \frac{2U_H}{I_0 B_0} \cdot d \quad (2.22)$$

формула билан аниқланади. Бу билан ҳамма қушимча, иккинчи даражали эффектлар таъсири йўқотилади. Масалан, зондларни носимметрик жойланиши билан боғланган ω_1 частотали кучланишни, магнит майдонининг ҳосил қилган ω_2 частотали ва иссиқлик эффектлари билан боғлиқ кучланишларни кўрсатиш мумкин. Шундай қилиб, қўшимча эффектларнинг катта электр сигнал шовқинида қиймати кичик бўлган Холл электр юритувчи кучини ўлчаш мумкин. Кучли ўзгарувчан магнит майдонини олишдаги қийинчиликларга қарамасдан, тор соҳали (узкополосный) кучайтиргичларнинг қўлланиши қурилманинг сезгирлигини анча оширади. Холл ЭЮК ининг температурага боғлиқлигини ўлчаш ва Холл кучланишининг ўзгаришини узлуксиз ёзиб олишни бу усулнинг афзалликларидан бири сифатида кўрсатиш мумкин. Ўзгарувчан магнит майдони электромагнит чулғамларида ω_2 частотали ток ўтказиш билан ёки механик усул билан ҳосил қилинади.

Частоталар бир-биридан кескин фарқ қилган ҳолда ЭЮК ни ўлчашда шовқин сигнал (наводка) бўлмайди. $\Delta\nu=0,5 \div 1$ Гц бўлган тор соҳали кучайтиргичларнинг қўлланиши ток ва магнит майдон частоталарининг жуда турғун бўлишлигини талаб қилади, акс ҳолда сигналнинг $\omega_2 - \omega_1$ ёки $\omega_2 + \omega_1$ частоталари кучли ўзгаришга учрайди ва $\omega_2 - \omega_1$ ёки $\omega_2 + \omega_1$ частотага созланган кучайтиргичда Холл ЭЮК и кучланишни кескин камайтиради. Одатда магнит чулғами частотаси $\nu=50$ Гц бўлган ўзгарувчан ток тармоғига уланади. Одатда саноатда ток частотасини турғун ушлаб туришга эришиб бўлмайди. Шу сабабли, ω_1 частотанинг ўзгариши билан мос равишда ω_2 частотани ўзгартирадиган шундай қурилма яратилганки, у частоталар фарқини $\omega_2 - \omega_1$ кучсиз ўзгартиради (сақлайди). Ўзгарувчан ток ва ўзгарувчан магнит майдон усули орқали Холл ЭЮК ини ўлчашга ҳалақит берадиган сабаблардан бирига ω_1 ва ω_2 частотали кучланишларнинг аралашishiга олиб келувчи ток контактларида ўзгарувчан токнинг тўғриланишини кўрсатиш мумкин, чунки бунда Холл Э Ю К частотасига тенг частотали тебранишни ҳосил қилувчи шовқин сигнал ҳосил бўлиши мумкин. Шунинг учун Ом контактларини эритиб олиш технологиясини яхшилаш (масалан, $n+n$, $p+p$ контактлар олиш) ҳамда гантель кўринишидаги намуналар



2.4-расм. Холл эффектини ўзгарувчан ток ва ўзгарувчан магнит майдонда ўлчаш схемаси.

қўллаш билан бунинг таъсирини камайтириш мумкин. Шунга мувофиқ контактлар сифатига қўйилган талаб ўзгармас ток усулига нисбатан қаттиқроқ. Бу усул билан Холл ЭЮК ини ўлчашнинг блок чизмаларидан бири 2.4-расмда келтирилган. Чизмада ўзгарувчан ток манбаи сифатида чиқиш қаршилиги кичик бўлган иккита симметрик каналли паст частотали генератор ишлатилади. Кучланиш намунага генератордан ажратувчи трансформатор орқали берилади. Намунадан ўтаётган ток трансформатор Tr нинг иккиламчи чулғами ўртасига уланган амперметр билан, ўзгарувчан Холл ЭЮК $\omega_1 + \omega_2$ ёки $\omega_2 = \omega_1$ частотага созланган танловчи резонанс кучайтиргич билан ўлчанади. Бу усул билан Холл ЭЮК ишорасини аниқлашнинг бир қанча радиотехник чизмалари мавжуд: масалан, намунадаги Холл ЭЮК ни эталон намунадаги Холл ЭЮК га солиштириб аниқлаш мумкин. Бунинг учун ўтказувчанлик типи аниқ бўлган эталон намуна олиб, уни Холл ЭЮК ўлчанаётган намуна Холл ЭЮК ига кетма-кет улаб, улар солиштирилади. Бу ҳолда Холл ЭЮК

$$U_H = 2 \left(\frac{R_{H3}}{d_{3T}} \cdot BI_3 \pm \frac{R_H}{d} BI \right) \cos(\omega_2 - \omega_1)t \quad (2.23)$$

ифода билан аниқланади. Бу ерда: R_{H3} , d_3 — эталон на-
мунанинг Холл коэффициенти ва магнит йўналиши бўйи-
ча қалинлиги, I_3 , I — эталон ва текширилаётган намуна-
дан ўтаётган ток.

Бир хил фазадаги токлари I_3 , I нинг катталигини ўзгар-
тириб, қарама-қарши тип ўтказувчанликка эга бўлган
намуналарда Холл Э Ю К нолга тенг бўлган вазиятга эри-
шилади. Агар намуна билан эталон электр ўтказувчан-
ликлари типини ҳар хил бўлса, токлардан бирининг фаза-
сини ҳамда I_3 ва I ларни ўзгартириб, компенсацияга эри-
шилади. Шундай қилиб, бу усул билан нафақат Холл
Э Ю К и ишорасини, балки текширилаётган намунанинг
Холл коэффициенти (доимийси) нинг абсолют қиймати-
ни топиш мумкин

$$R_H = R_{H3} \frac{d}{d_0} \frac{I_3}{I} \quad (2.24)$$

Бу компенсация усулида магнит майдонининг катта-
лигини билиш шарт эмас. Одатда эталон намуна элект-
ромагнит қутблардан бирига ёпиштириб қўйилади. Холл
ЭЮК ини ўлчайдиган саноат қурилмаларида ток генера-
тори частотаси 70—75 Гц, магнит қутбларининг пойнаги
(учлиги) 40 мм, улар орасидаги масофа 40 мм тартибида
бўлса, 3000 эрстедгача бўлган магнит майдонини ҳосил
қилиш мумкин. Бу усул билан ҳаракатчанликлари $5 \div 10^{-2}$
 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ бўлган намуналарда Холл эффектини ўлчаш
мумкин бўлган. Шуни назарда тутиш керакки, ўзгарув-
чан майдонда яхлит металл қисмлар (криостат), уни уш-
лаб турадиган тутқичлар индукцион ток билан қизиши
мумкин.

2.4-чизмадаги аралаштиргичдан чиқаётган стандарт
фазага кучланиш билан намунадаги кучайтирилган Холл
кучланиши осциллографда ҳосил қилган лиссажу шакл-
ларига қараб Холл ЭЮК и ишорасини, яъни намунада
электр ўтказувчанлик типини аниқлаш мумкин.

2.3-§. Холл токи

Биз юқорида Холл эффектини кўрганда бу эффектнинг назарияси стационар ҳолатда қуйидаги ифодаларга олиб келишини кўрган эдик:

$$\vec{E} = \vec{E}_n + \vec{E}_H; \quad \vec{E}_n = \frac{\vec{j}_n}{\sigma(B)}; \quad \vec{E}_H = \frac{\mu_n}{\sigma(B)} [\vec{j}_n \vec{B}] \quad (2.25)$$

Бу ерда: $\vec{E}$ — намунанинг натижавий электр майдон кучланганлиги, $\vec{E}_n$ — намунадан оқаётган токнинг ҳосил қилган майдон кучланганлиги, $\vec{E}_H$ — Холл электр майдон кучланганлиги, $\vec{j}$ — ток зичлиги вектори, $\sigma(B)$ — магнит майдондаги солиштирма электр ўтказувчанлиги.

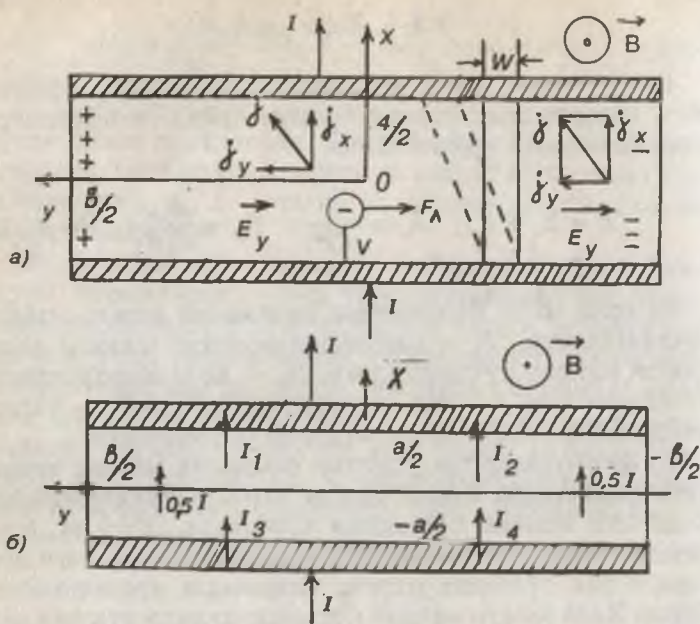
Бу формулалар ток ўтаётган намунани магнит майдонига киритганда пайдо бўлган Холл эффектнинг бир жиҳатини намоён бўлишини кўрсатади, $\vec{B}=0$ да $\vec{E}=\vec{E}_n$ бўлади. Магнит майдони (Лоренц кучи) ток зичлиги векторига тик бўлганда магнит майдонига пропорционал бўлган Холл электр майдон кучланганлигини вужудга келтиради. (2.25) даги ифодаларнинг ток зичлигига нисбатан ечими қуйидаги

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_H + \vec{j}_1; \quad \vec{j}_n = \sigma' \vec{E}; \quad \vec{j}_H = \sigma' \mu_n [\vec{E}_n \vec{B}]$$

$$\vec{j}_1 = \sigma' \mu_n^2 \vec{B} (\vec{B} \vec{E}); \quad \sigma' = \frac{\sigma}{1 + \mu^2 B^2} \quad (2.26)$$

ифодаларга олиб келади. Холл ўлчовлари ўтказилганда одатда $E \perp B$ қилиб олинади, бунда $\vec{j}_1=0$ бўлади. (2.30) ифодалар Холл эффектнинг иккинчи жиҳатини кўрсатади. Холл эффекти магнит майдон индукцияси ҳамда ўтказувчан ток зичлиги векторига тик ва магнит майдонига пропорционал Холл токини ҳосил қилади. Намунада Холл эффекти текширилганда Холл электр майдон кучланганлигини характерловчи тенгламалар тизими (2.25) ёки унга эквивалент (2.26) тенгламалар яна қуйидаги ифодаларни ўз ичига олади:

$$\text{div} \vec{j} = 0; \quad \text{rot} \vec{E} = 0 \quad (2.27)$$



2.5-расм. Холл токининг пайдо бўлишини тушунтиришга чизма (а), Холл токининг контактлар орқали уланиши.

Бунга қуйидаги чегаравий шартлар қўйилади:

1. Намуна сиртининг металл қопланмаган қисмида электр майдон ва токнинг тангенциал (нормал) ташкил этувчиси

$$\vec{E}_t = 0; \quad j_t = 0 \quad (2.28)$$

бўлади. Бунда контактларнинг потенциали ёки ундан оқаётган ток берилиши керак. Маълумки, токли намуна-ни ток йўналишига тик бўлган магнит майдонига кирит-сак, узун, тор намунанинг ўрта қисмида ностационар Холл токидан, зарядларининг тўпланиши сабабли, Холл электр юритувчи кучи (ЭЮК) пайдо бўлади. Калта, юпқа ва кенг ($a \ll b$) намунада Холл эффектини қўрайлик (2.5-расм).

Узун ва тор намунадаги каби Лоренц кучи дрейф ҳара-кати қилаётган заряд ташувчиларни оғдиради, аммо на-

мунанинг қалинлиги кичик ва эни катта шаклда бўлиши туфайли, намуна ўрта қисмининг бирор ерида оған зарядлар тўпланиши кузатилмайди ва натижада Холл электр майдони пайдо бўлишига олиб келмайди, яъни Лоренц кучини мувозанатловчи майдон вужудга келмайди, Оу — ўқи бўйича стационар Холл токи оқади. $y = \pm b/2$ сиртларда тўпланган зарядлар намуна марказидан узоқлашган ва майдон кучланганлигининг E_y ташкил этувчиси пайдо бўлмайди. Бу эффектни миқдорий қарашда, намуна марказидаги катталикларни y га боғлиқ бўлмаслигидан фойдаланамиз. Бу ҳолда (2.28) дан кўринадики, j ва E_y лар x га боғлиқ, эмас, (2.28) га кўра

$$E_y \left(x = \pm \frac{a}{2} \right) = 0$$

бўлади. Марказий қисмида E_y x га боғланмаган бўлгани сабабли, $E_y = 0$. Бу мулоҳазаларни ва (2.26) ифодани қўллаб,

$$j_x = j_n + \tau' E_x; \quad j_y = j_H = \mu_n B j \quad (2.29)$$

формуларни оламиз. Булардан кўринадики, E_x ва j_y x га боғлиқ эмас ва электр майдон бир жинслидир. Магнит майдонида ток зичлиги вектори θ бурчакка бурилади. $y = \text{const}$ текисликдан оқаётган тўла Холл токи

$$I_H = a \cdot d \cdot j_y \quad (2.30)$$

формула билан топилади.

Намуна контактининг бир қисмидан оқаётган ток

$$I_b = dbj \quad (2.31)$$

бўлади. Бу ерда: b — ток ўтаётган контакт соҳасининг кенлиги. (2.35) формуладан фойдаланиб, токнинг (2.30) ва (2.31) ифодаларини қуйидаги кўринишда олиш мумкин:

$$I_H = \mu_n B o d \cdot U; \quad I_b = \sigma' \frac{bd}{a} U \quad (2.31 \text{ а})$$

Кучсиз магнит майдонида $1 \gg B^2 \mu^2$ намунада бир жинсли электр майдон ($\sigma = \sigma'$) бўлгани учун Холл токи

$$I_H = \frac{a}{b} \cdot \mu_n B \cdot I \quad (2.32)$$

қуринишни олади. Эслатиб ўтамизки, $y = \pm b/2$ сиртларда тўпланган зарядлар уларнинг атрофида $E_x \neq 0$ бўлишига олиб келади, ток зичликларини j_x ва j_y марказ яқинидаги қийматлардан фарқли бўлишига олиб келади ва электр майдонининг бир жинслилиги бузилади. Бир жинсли бўлмаган соҳа эса ён сиртлардан ($1 \div 1,5$) а масофагача бўлади. Бунда токнинг контактлар орқали уланиши содир бўлади. (2.31) формулалар намунанинг ўрта қисмида ($a \leq 3b$) соҳасида ўринли ҳисобланади. Акс ҳолда, Холл токи, Холл ЭЮК и каби тузатиш функциялари орқали ҳисобланади. (2.30) ва (2.31) ларга кўра, бўйи кичик ва эни катта намуналарнинг ($b \gg a$) марказий қисмида магнит майдони солиштирма ўтказувчанлик ($\sigma = j_x/E_x$) ни $(1 + \mu^2 B^2)$ марта камайтиради, солиштирма қаршиликни шунча марта оширади. Бу ҳодиса геометрик магнит қаршилик эффекти деб аталади ва у қуйидагича тушунтирилади: Холл токи намунада ток найини узайтиради ва унинг кўндаланг кесимини камайтиради (2.5а-расм). Чизмада $B=0$ да кенглиги $w \ll a$ бўлган контакт соҳасидан оқаётган ток найининг чизиклари узлуксиз чизик билан белгиланган, $B \neq 0$ да узлукли чизик билан кўрсатилган. Бунда ток узунлиги катта бўлган най орқали оқади. Найнинг ўтказувчанлиги ток найининг энига тўғри пропорционал, узунлигига тескари пропорционал, яъни ўтказувчанлик (w/a) га пропорционалдир. $B \neq 0$ да кенглиги $w/(1 + \mu^2 B^2)^{1/2}$ га, узунлиги $a(1 + \mu^2 B^2)^{1/2}$ ва ўтказувчанлиги

$$\sigma' \approx \frac{w}{a} \frac{1}{1 + \mu^2 B^2} \approx \frac{w}{a} \left(1 + \mu^2 B^2\right)^{-1} \quad (2.33)$$

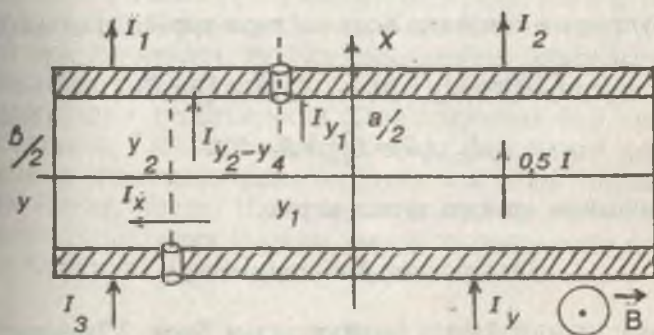
га тенг бўлади. Шундай қилиб, магнит майдони найнинг ўтказувчанлигини камайтиради ва шунга мувофиқ найнинг қаршилигини оширади. Геометрик магнит қаршилик эффекти (кўпроқ) юпқа (ток йўналиши бўйича), эни

кенг намуналарда ҳам, узун намуналарнинг контактлар соҳасига яқин бўлган жойларда ҳам кузатилади. Бошқа шаклдаги намуналарда, масалан, "Корбино" доирасида ҳам кузатилиши мумкин (2.7-§ га қаранг). Узун намуналарнинг марказий қисмида, Холл токи йўқ жойларда бу эффект кузатилмайди.

2.4-§. Холл тоқларини ўлчаш ва у орқали яримўтказгич намуналарда заряд ташувчиларнинг концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчаш

Намуна сиртларидаги омик контактларни қисмларга ажратиш усули.

Биз кўрдикки, намунадан оқаётган Холл токи контактлар орқали уланади. Контактларни бўлақларга бўлиш (ажратиш) Холл токини ташқи занжирга чиқаришга ва ўлчашга имкон беради. Намуна сиртидаги контактлар бири-биридан бир жинсли майдон соҳасида ажратилган бўлсин (2.6-расм). Ўлчов чизмаларига уланган тўртта контактлар орқали $I_1 \div I_4$ тоқлар ўтади. Бу тоқлар ажратилган қисмларда ажратилган контактларнинг эквипотенциаллигини таъминлайди. Стрелка билан кўрсатилган чизиқчалар ток йўналишлари кесиб ўтаётган соҳада кўрсатилган. Ажратилган контактлар орасидаги масофа намуна узунлигидан жуда кичик ва бу майдоннинг бир жинслилигини бузмайди. Контактлар намуна марказида ажратилган ҳол



2.6-расм. Ом контактлари бўлақларга ажратилган намуна.

энг содда ҳолга мос келади, лекин буни ҳамма вақт амалга ошириб бўлмайди, шунинг учун умумий бўлган ҳолда контактларнинг ажратилиш жойи марказга нисбатан силжийди. Координата ўқлари билан намуна тўртта булакка ажратилади. Контактлар намуна ўртасидан ажратилган бўлганда бу тўртта соҳада заряд сақланиш қонуни бажарилишини ҳамда тўла ток

$$I = I_1 + I_2 = I_3 + I_4 \quad (2.34)$$

бўлишлигини назарда тутиб, тўрт соҳа тоқларининг қуйидаги ифодаларини олиш мумкин.

$$I_1 = 0,5I + 0,5I_H \quad I_2 = 0,5I - 0,5I_H \quad (2.35)$$

$$I_3 = 0,5I - 0,5I_H \quad I_4 = 0,5I + 0,5I_H \quad (2.36)$$

Лекин юқоридаги контактнинг чапга силжиши I_1 токнинг камайишига, I_2 нинг ортишига олиб келади. Бу қиймат $y \geq 0$ соҳага кирадиган I_{y1} ва I_{y2} тоқларга тенг, шунинг учун (2.35) ва (2.36) қуйидаги кўринишни олади:

$$I_1 = 0,5I + 0,5I_H - I_{y1} \quad I_2 = 0,5I - 0,5I_H + I_{y1} \quad (2.37)$$

$$I_3 = 0,5I - 0,5I_H - I_{y2} \quad I_4 = 0,5I + 0,5I_H + I_{y2}$$

Бу ифодалардан

$$I_1 - I_2 = I_H - 2I_{y1}; \quad I_1 - I_3 = I_H - I_{y1-y2} \quad (2.38)$$

формулаларни топамиз. Холл тоқлари қаралаётган ҳолда

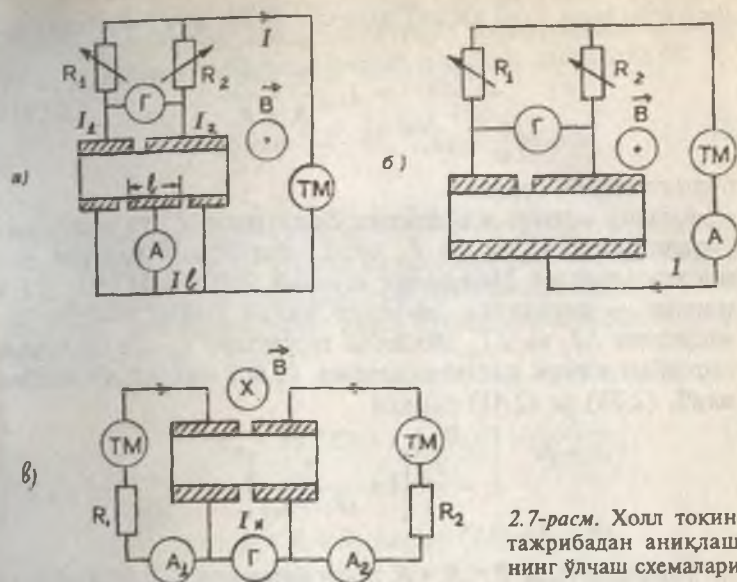
$$I_H(\vec{B}) = -I_H(-B); \quad I_{y1}(B) = I_{y1}(-B) \quad (2.39)$$

$$I_{y2-y1}(B) = I_{y2-y1}(-B)$$

бўлишлигини назарда тутиш керак.

Холл тоқини ўлчаш чизмалари

Холл тоқини ўлчаш чизмаларидан бири 2.7а-расмда келтирилган. Бу намунанинг юқори сиртида бир-биридан ажратилган контакт олинади, Холл тоқини ўлчаш учун



2.7-расм. Холл токини тажрибадан аниқлашнинг ўлчаш схемалари.

унга параллель ички қаршилиги (R_1) $R_1 + R_2$ қаршиликка ва ажратилган контакт орасидаги намуна қаршилигига нисбатан жуда кичик бўлган гальванометр уланади. Ток манбаига, намунага кетма-кет уланган амперметр намунадан ўтаётган токни ўлчайди. Холл токини ўлчаш учун $\vec{B}=0$ да R_1 ва R_2 қаршиликлар орқали гальванометрдан ўтаётган ток нольга ($I_r=0$) келтирилади, сўнг магнит майдон уланади. Магнит майдон уланганда намунада Холл токи вужудга келади. $B \neq 0$ да гальванометр билан магнит майдонида вужудга келган, юқори сиртида ажратилган контактларни туташтирувчи Холл токининг бир қисми аниқланади. Гальванометрнинг ички қаршилиги кичик бўлганда гальванометрдан оқаётган ток Холл токининг ярмига тенг бўлади. Намунанинг юқори қисмида ажратилган контактларга уланган электр занжири учун қуйидаги Кирхгоф қойдаси ўринлидир:

$$I_1 - I_2 = 2I_r \left(1 + \frac{R_r}{R_1 + R_2} \right) + I \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \quad (2.40)$$

$B=0$ бўлганда $I_r=0$ қилиб олинса, (2.38) ва (2.40) лардан

$$-\left. \frac{2I_{y1}}{1} \right|_{B=0} = I_{B=0} \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \quad (2.41)$$

бўлишлигини топамиз.

Кучсиз магнит майдонида Холл токи I_{y1} га нисбатан умумий ток $I=I_1+I_2$ ва I_{y1} ning ўзгаришини назарга олмаслик мумкин. Модомики шундай экан, улар (ΔI_1 , ΔI_{y1}) магнит — қаршилиқ эффекти билан пайдо бўлган. Бу эффектда ΔI_1 ва ΔI_{y2} иккинчи тартибли, I_H эса биринчи тартибли кичик катталиклардир. (2.40) ифодани ҳисобга олиб, (2.38) ва (2.41) лардан

$$I_r = \frac{I_H}{2} \left[1 + \frac{R_r}{(R_1 + R_2)} \right]^{-1} \quad (2.42)$$

ни топамиз. Агар $R_r \ll R_1 + R_2$ шарт бажарилса, $I_r = I_H/2$ бўлади. Юқорида айтилганларга кўра гальванометр Холл токининг ярмини ўлчайди. Бу гальванометрға $0,5 I_H R_r$ га тенг бўлган кучланиш тушувини ва ажратилган контактларда ноэквипотенциалликни ҳосил қилади. Холл токини ўлчашдаги нисбий хатолик

$$\frac{\Delta I_H}{I_H} = \frac{R_r}{R'} \quad (2.43)$$

бўлади. Бу ерда, R' — ажратилган контактлар орасидаги намуна қаршилиги. Маълумки, ток контактларининг ажратилиши намунада электр майдонининг маҳаллий бузилишига олиб келади ва контактлар потенциаллари бир хил бўлганда хатолик

$$\left| \frac{\Delta I_H}{I_H} \right| \approx \frac{\delta}{a} \quad (2.44)$$

бўлади. Бу ерда, δ — ажратилган контактлар орасидаги масофа. Холл токини, намунага қўйилган кучланишни

ва намунадан ўтаётган токни билган ҳолда, кучсиз магнит майдонида заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлиги қуйидаги формулалардан аниқланади:

$$I = \sigma \frac{b \cdot d}{a} \cdot U; \quad I_H = \frac{a}{b} \mu_{nH} B I \quad (2.45)$$

2.7а-расмда келтирилган чизма билан ихтиёрий магнит майдонида Холл токини ўлчаш мумкин. Бунда ток I_1 нинг ўзгаришини ташлаб юбориш мумкин бўлмайди, уни йўқотиш учун магнитнинг икки йўналишида Холл токи ўлчанади, яъни

$$I_H = (I_r(B) - I_r(-B)) \left(1 + \frac{R_r}{R_1 + R_2} \right) \quad (2.46)$$

$$R_r \ll R_1 + R_2 \text{ да } I_H = I_r(B) - I_r(-B) \quad (2.47)$$

Ҳаракатчанлик (2.26) асосида олинган тўла ток

$$I_1 = \sigma' \frac{ld}{a} U; \quad I_H = \mu_{nH} B \sigma' d U \quad (2.48)$$

формулаларидан топилади. Бунинг учун кенглиги l бўлган соҳадан ўтаётган ток ва унга қўйилган кучланишни ўлчаш керак (2.7а-расм). Бу усул билан ўлчашда намунанинг остки Ом контакти икки қисмга ажратилади, яъни юқори Ом ли намуналарнинг солиштирма қаршилигини ўлчаш каби қўриқловчи ҳалқа ишлатилади. Икки контактда эквивипотенциаллик шарти

$$I_1 R_A \ll U \quad (2.49)$$

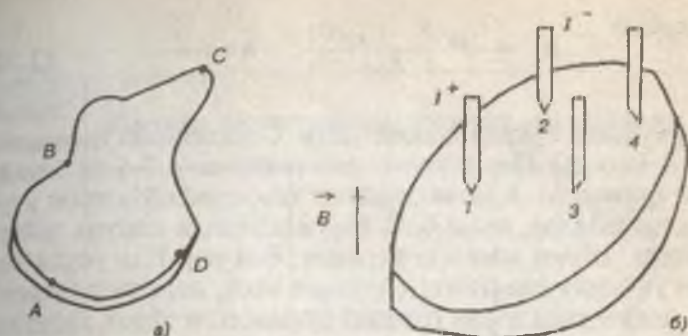
да бажарилади. Бу билан сирт бўйлаб оқаётган сирт ўтказувчанлиги токини ҳамда бир жинсли бўлмаган электр майдон соҳасида оқаётган токларнинг таъсирини йўқотиш мумкин. Холл токини ўлчашга доир яна бир чизма 2.7в-расмда келтирилган. Унга асосан ажратилган контактларда R_1 ва R_2 орқали $B=0$ да эквивипотенциалликка

эришилади. Бунда $R_1, R_2 \gg R$ бўлиши керак. Магнит майдон уланганда гальванометрдан ўтаётган ток I , Холл токи I_H ни кўрсатади. Намунадан оқаётган тўла ток A_1 ва A_2 амперметрлар билан ўлчанади. Чизма кучсиз магнит майдонида Холл ҳаракатчанлигини ўлчашга яроқлидир.

Холл токини ўлчашга асосланган заряд ташувчилар ҳаракатчанлигини ва концентрациясини аниқлаш усули кейинги йилларда ишлаб чиқилган. Текширишларнинг кўрсатишича, бу усул ҳам, Холл ЭЮК ини ўлчашга асосланган усул каби, намуна хоссалари тўғрисидаги маълумотларни беради, маълум шароитда Холл токини ўлчашни амалга ошириш енгилроқ ва қулайдир. Масалан, бу усул билан юқори Ом ли намуналарнинг ҳамда қалинлиги бўйича бир жинсли бўлмаган диффузион қатламларни, эпитаксиал қатламларнинг параметрларини ўлчаш қулайдир. Маълумки, Холл ЭЮК ини юқори Ом ли намуналарда ўлчаш учун ички қаршилиги катта бўлган электрометр-вольтметрлар қўлланилади. Намуна қаршилиги катта бўлганда сирқиш токи пайдо бўлиши мумкин. Бунда вольтметрлар билан ишлаш қийинчилик туғдиради. Холл токини ўлчашда эса ички қаршилиги кичик гальванометр қўлланилади, бу билан ток сирқиши йўқотилади. Кўп қатламли структураларда Холл ЭЮК и қийматига ҳар бир қатламнинг қўшган ҳиссаси мураккаб муносабатлар билан боғланган. Холл токини ўлчаш усулида натижавий Холл токига ҳар бир қатламнинг қўшган ҳиссаси содда боғланган бўлиб, у қўшилиб боради. Анизотропик намуналарда Холл ЭЮК ини ўлчаш билан солиштирма қаршилик тензори, Холл токини ўлчаш билан солиштирма ўтказувчанлик тензорини аниқлаш мумкин.

2.5-§. Ван-дер-Пау ва тўрт зондли усул билан яримўтказгич намуналарда заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчаш

Ихтиёрий шаклдаги пластинкаларда, юпқа қатламларда, эпитаксиал структураларда концентрация ва ҳаракатчанликни ўлчашда энг қулай, хатолиги кичик бўлган Ван-дер-Пау усули қўлланилади. Бунинг учун намуна четидан тўртта контакт олинади. Бу контактларнинг иккита



2.8-расм. Ихтиёрий шаклдаги намуналарда Ван-дер-Пау усули билан Холл доимийсини аниқлашда контактларнинг жойланиши (а), Холл доимийсини аниқлашнинг тўрт зондли усули (б).

қарама-қаршиси орқали ток ўтказилиб (I_{AC}), иккита қарама-қаршисида кучланиш (U_{BD}) ўлчанади. Магнит майдони уланган ва уланмаган ҳолдаги кучланиш тушувлари $U_{BD}(0)$ ва $U_{BD}(\vec{B})$ ўлчаниб, Холл Э Ю К и аниқланади. Кучланиш ўлчанадиган контактлар умумий ҳолда эквивалент потенциал сиртларда ўтмаслиги мумкин (2.8-расм). Магнит майдонига киритилган намунанинг BD контактлари орасидаги кучланишнинг ўзгариши кучсиз магнит майдонда $\mu_0 \vec{B} \ll 1$ Холл Э Ю К ига тенг бўлади, чунки бу ҳолда B ва D контактлар орасидаги қаршилиқнинг магнит майдонда ўзгариши билан боғлиқ кучланиш инобатга олмаслик даражада кичик бўлади

$$U_H = U_{BD}(\vec{B}) - U_{BD}(0) \quad (2.50)$$

Ўлчаш даврида ток қиймати бир хил ушлаб турилса, Холл доимийси R_H (2.11а) га кўра

$$R_H = \frac{U_{BD}(\vec{B}) - U_{BD}(0)}{I \vec{B}} d \quad (2.51)$$

формула билан аниқланади. Заряд ташувчилар ҳаракатчанлиги ва концентрацияси

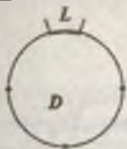
$$\mu_H = \frac{U_{BD}(\vec{B}) - U_{BD}(O)}{I \cdot \vec{B} \cdot \rho}; \quad n = \frac{r}{e \mu_H \rho} \quad (2.52)$$

формулалар орқали ҳисобланади. Солиштирма қаршилик ρ ни Ван-дер-Пау усули билан аниқлаш 1.7-§ да батафсил ёритилган. Контактларнинг таъсирини йўқотиш учун махсус шаклда, яъни беда барги шаклида намуна тайёрланади. Шуни эслатиш керакки, Ван-дер-Пау усули билан ўлчашда пластинка сиртлари ясси, параллел бўлиши ва, лекин унда дарча (тешик) бўлмаслиги керак. Эпитаксиал структураларда n, μ_n -ни ўлчашда қатламнинг солиштирма қаршилиги кичик $n-n^+$, ёки $p-p^+$, ёки $p-n$ типидagi эпитаксиал структуралар бўлиши керак.

Ом контактларини олиш мураккаб ва вақтни қўп оладиган жараёндир, бу эса Холл усулларининг амалиётда қўлланилишига қийинчилик туғдиради. Шунинг учун контакт қаршилигининг таъсири ўлчов билан боғлиқ хатоликларда унчалик муҳим бўлмаган ҳолларда қаршиликлари жуда юқори бўлмаган намуналарни, эпитаксиал структураларни текширишда, Холл доимийсини тез ўлчаш учун квадрат учларига жойлаштирилган тўрт зондли усулни қўллаш мумкин (2.86-расм).

Ван-дер-Пау усули назариясида тўртта нуқтавий контактни намуна четига жойлашган бўлсин деб фараз қилайлик. Мабодо бу контактлардан бири нуқтавий бўлмай, қандайдир ўлчамга эга бўлса ёки намуна четига жойлашган бўлса, ҳисоблаш формулаларига тузатиш функциясини киритиш керак бўлади. Контактларни Ван-дер-Пау усулига киритган хатоликлари доира ва тўғри тўртбurchакли шаклдаги намуналар учун ҳисобланган. Контактлар бир-бирига нисбатан 90° бурчак остида жойлашган доира шаклидаги намуналарда мутлақ бўлмаган (нуқсонни) битта контактнинг киритган хатолиги 2.1-жадвалда келтирилган. 2.86-расмда келтирилган чизма бўйича ўлчанган, қалинлиги зондлар орасидаги масофадан жуда кичик ($d \ll S$) бўлган намуналарнинг икки зонд орасидаги потенциаллар айирмаси

$$U' = U_p + U_n + U_H = \frac{I \rho \ln 2}{\pi d} \cdot C_p [1 + \beta^2] + \frac{R_H I B}{d} C_n \quad (2.53)$$

Нисбий хатолик	Намунада контактларнинг кўриниши ва жойланиши		
			
$\Delta\rho/\rho$	$-\frac{1}{16} \frac{1}{\ln 2} \cdot \left(\frac{l}{D}\right)^2$	$-\frac{1}{4} \frac{1}{\ln 2} \cdot \left(\frac{l}{D}\right)^2$	$-\frac{1}{2} \frac{1}{\ln 2} \cdot \left(\frac{l}{D}\right)^2$
$\Delta\mu/\mu$	$\frac{2}{\pi^2} \left(\frac{l}{D}\right)$	$\frac{4}{\pi^2} \left(\frac{l}{D}\right)$	$\frac{2}{\pi} \left(\frac{l}{D}\right)$

билан аниқланади. Бу ерда C_ρ , C_H — намуна ўлчамларини ўлчаш натижаларига таъсирини ҳисобга оладиган тузатиш коэффицентлари,

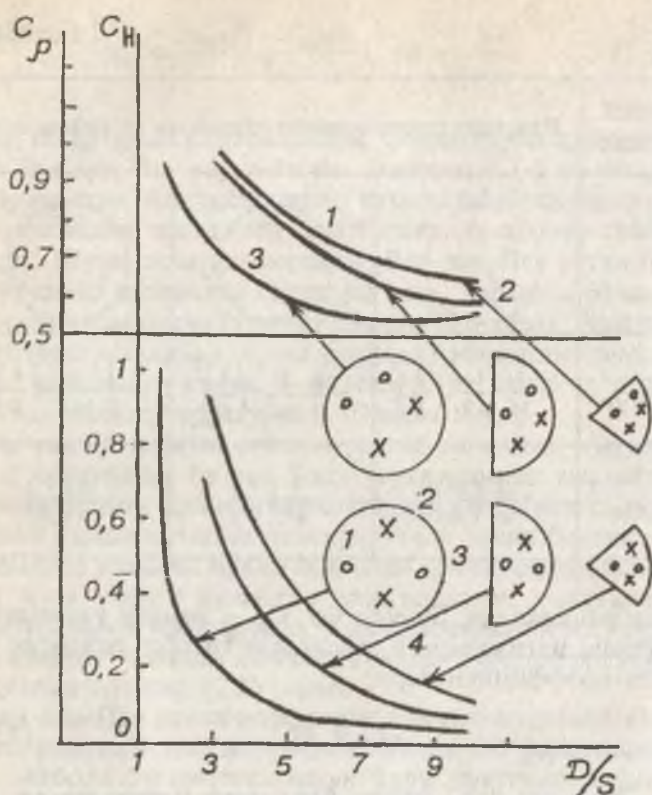
$$\beta = R_B \vec{B} / \rho \quad (2.54)$$

U_ρ — биринчи ҳад, намуна ўлчамлари (четки томон эффектлар) таъсирини ҳисобга олган тўрт зондли усул билан солиштира қаршиликни аниқлаш формуласи. Иккинчи ҳад $(1+\beta^2)$ — кўпайтувчи намуна четки қисмларининг Холл электр юритувчи кучини туташтиришидан вужудга келган Холл токига магнит майдонининг таъсирини ифодалайди. Бу ҳодиса иккиламчи Холл эффекти деб аталади.

U_M — зондлардан оқаётган токка қаршилик қилади, шунинг учун U_M ни геометрик магнит қаршиликнинг намоён бўлиши деб тушунтирилади.

U_H — учинчи ҳад Холл электр юритувчи кучи.

Кучсиз магнит майдонда (μ_n ; $\vec{B} \ll 1$) U_M ҳадни инобатга олмаслик мумкин. Зондларнинг занжирга уланиш чизмасини танлаб ҳамда намунадаги зондларни симметрик жойлаштириб, шунга эришиш мумкинки, потенциал зонд-



2.9-расм. Тўрт зондли усул билан ўлчашдаги доира, ярим доира, сектор кўринишдаги намуналар учун тузатиш функциялари ва зондлар жойланиши. X — ток зондлари, O — потенциал зондлари.

лар орасидаги тўла кучланиш (2.53) даги ташкил этувчиларнинг бирига тенг бўлишига эришиш мумкин. Доира ва яримдоира шаклидаги намуналарда U_p , U_H ни ўлчаш учун зондлар квадрати диагонали радиал симметрия чизиғи бўйича жойлаштирилади. U_M ни ўлчашда потенциал зондлар сифатида (1,3 ёки 2,4) радиал симметрия чизиғига тик диагонали бўйича жойлашган зондлар олинади. I ни ўлчашда ($B=0$) да 3 ва 4 зондлардан ток ўтказиб, I_{34} 1 ва 2 зондлар орқали кучланиш ўлчанади ёки аксинча.

C_p, C_H — тузатиш коэффициентлари 2.9-расмда келтирилган. Бу ўлчовлар орқали солиштирма қаршилиқ ва Холл доимийси куйидаги

$$\rho = \frac{\pi d}{C_p I \ln 2}; \quad R_H = \frac{\pi U_H}{C_H BI} \quad (2.55)$$

ифодалардан топилади. 2.10-расмда тўғри тўртбурчак шаклидаги пластинкаларда зондларнинг жойланиши ва тузатиш коэффициентлари C_p, C_H келтирилган.

2.6 §. Холл эффектини ўлчашдаги мунтазам (систематик) хатоликларга таъсир этувчи омиллар

Холл эффекти билан ҳамроҳ (бирга содир бўладиган) бўлган термогальваноманит ҳодисалардан ташқари, бир қанча омиллар борки, улар Холл эффектини ўлчашдаги мунтазам хатоликларга таъсир этади. Шу омилларни қисқача кўриб чиқайлик.

1. Намуна кўндаланг кесимига ўтказилган металл электродлар Холл кучланишини шунтлайди, натижада Холл зондлари орасидаги потенциаллар айирмаси унинг ҳақиқий қийматидан (U_H) кичик бўлади. Холл кучланиши Холл контактлари ва ток электродлари орасидаги масофага боғлиқ. Намунанинг ўртасида жойлашган Холл контактларидаги кучланиш намуна узунлигининг энига нисбати $a/b \geq 5$ бўлганда максимумга эришади ва Холл кучланишидан 1% дан катта бўлмаган қиймат билан фарқланади. Шунинг учун яримўтказгич намуналарда Холл эффектини ўлчашга тайёрлашда шунга амал қилиниши керак.

2. Холл доимийси кучсиз магнит майдонида ($\mu_0 B \ll 1$) намунадан ўтаётган токка I , магнит майдон индукциясига B , ва Холл кучланишига тўғри пропорционал бўлади. Германий ва кремний намуналари учун магнит майдонининг кичиклик шarti магнит майдон индукциясининг $B < 1 \text{ Тл}$ бўлган соҳаларида бажарилади. Масалан, InSb да $\mu_0 B \ll 1$ тенгсизлик магнит майдон индукциясининг $B < 0,3 \text{ Тл}$ соҳаларида бажарилади. Шундай қилиб, ҳар бир ярим-

ўтказгич учун магнит майдонининг кичиклик шартини қаноатлантирувчи магнит майдон индукциясининг катталигини билиш керак, шунда бу билан боғлиқ ўлчашдаги хатолик йўқотилади.

3. Холл доимийлари (2.7, (2.8)), (2.9) ифодаларининг хоссалари ҳамма йўналишда бир хил бўлсин деб фараз қилинган намуналар, яъни, изотроп намуналар учун ўринлидир. Умумий ҳолда хоссалари анизотроп бўлган яримўтказгичлар учун бу муносабатлар бажарилмайди. Лекин ток ва магнит майдон йўналишлари намунанинг кристаллографик ўқлари йўналишидан катта фарқ қилмаса, бу билан боғлиқ хатоликни йўқотиш мумкин. Холл доимийсини аниқлашда U_H ни магнитнинг икки йўналишида ўлчаб, натижалар ўртасини олиш тавсия этилади. Бу тавсия, яъни ўзгармас ток ва ўзгармас магнит майдонида Холл доимийсини ўлчашда инобатга олинади.

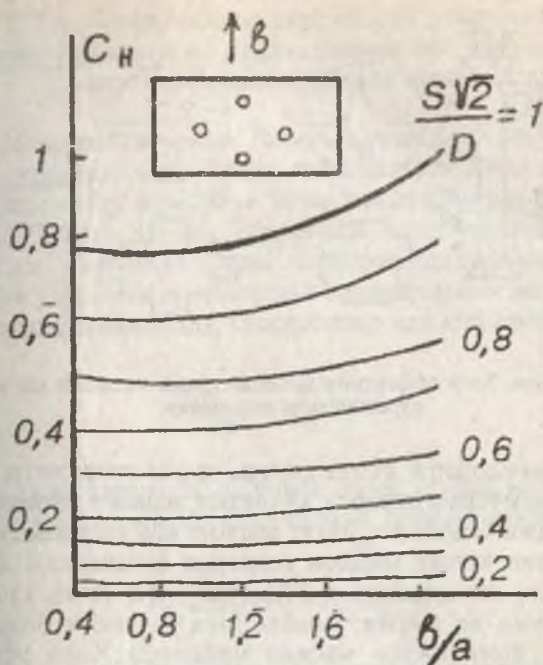
4. Холл эффектнинг юқорида келтирилган формуллари фақат энергия зоналари *айнимаган* яримўтказгичлар учун келтирилган, акс ҳолда ўлчанаётган Холл доимийсига ҳар бир энергия зоналаридаги заряд ташувчиларнинг қўшган ҳиссасини ҳисобга олиш керак. Масалан, *p*-тип германий валент зонаси *айниган* бўлиб, у оғир кавакли ва енгил кавакли тармоқлардан, ҳамда ўзаро спин орбитал таъсирлашуви туфайли парчаланган тармоқдан иборатдир. Маълумки, концентрациялари ва ҳаракатчанликларининг нисбатлари

$$\frac{P_l}{P_h} = 0,04; \quad \frac{\mu_{pl}}{\mu_{ph}} = 8 \quad (2.56)$$

мос равишда тенгдир. *p*-тип германий учун Холл доимийси

$$R_{pH} = \frac{r_H e \mu_{pe}^2 P_e - r_{Hh} \mu_{pn}^2 P_h}{e (\mu_{pl} P_l + \mu_{ph} P_h)^2} \quad (2.57)$$

ифода билан аниқланади. Енгил ва оғир кавакларнинг тажрибада аниқланган Холл доимийсига қўшган ҳиссаларини ажратиш мумкин эмас, шунинг учун тажрибада аниқланган Холл доимийси, Холл ҳаракатчанлиги фақат

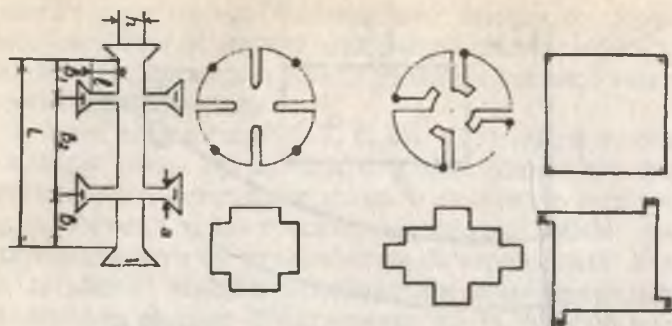


2.10-расм. Тўрт зондли Холл усули билан ўлчаганда тўғри тўртбурчак шаклдаги намуна учун тузатиш функцияси.

яримўтказгичнинг киришма билан легирланиш даражасини миқдорий, заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмларини сифат жиҳатдан баҳолашда хизмат қилиши мумкин.

Зоналар тузилиши мураккаб бўлган яримўтказгичларда тажрибадан олинган. μ_n ва R_n ларни аниқ изоҳлаш (тавсифлаш) учун текширилатган муайян материалларда уларнинг зоналар тузилишини ҳисобга олган Холл эффекти устида назарий тадқиқотлар ўтказиш керак.

5. Холл фактори магнит майдонининг индукциясига боғлиқ. Кучли магнит майдонида заряд ташувчилар релаксация вақтининг иссиқлик энергиясига боғлиқ, функцияси кучсиз. Шунинг учун заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмларида магнит майдон ошиши билан Холл фактори бирга интилади ($r_H \rightarrow 1$). Холл факторининг



2.11-расм. Холл эффектнини ўлчашда қўлланиладиган ҳар хил кўринишдаги намуналар.

магнит майдонига боғлиқлиги, ҳаракатчанлиги катта бўлган яримўтказгичларда кучлироқ намоён бўлади. Масалан, n -тип GaAs да r_H нинг магнит майдонга боғлиқлиги нисбатан кичик майдон соҳасида бошланади. Бу билан боғлиқ ҳатоликларни йўқотиш учун Холл кучланишини тоққа ва магнит майдонига чизиқли боғланиш соҳасида, яъни кичик магнит майдонда Холл эффекти ўлчаниши керак.

6. Холл эффекти ўлчанаётган намунанинг ёритилишидан баъзан пайдо бўлган фотоўтказувчанлик, фото ЭЮК ҳатоликка олиб келиши мумкин. Шунинг учун олдин намунани ёруғликка сезгирлиги текширилади, мабодо у ёруғликка сезгир бўлса, ўлчовлар қоронғуда олиб борилади. Ҳатоликни камайтириш учун бундан ташқари қуйидагиларга риоя қилиш керак. Электр майдон кучланганлиги 1В/см тартибида бўлиши, контактларнинг инжекциясини йўқотиш, юқори Ом ли намуналарда сирт ўтказувчанлиги билан боғлиқ сирт сирқиш тоқлари йўқотилиши керак. Бу омиллар маълум ўлчаш чизмаларини танлаш билан ёки ҳар хил кимёвий ишловлар бериш билан йўқотилади. Холл зондлари орқали намуна шунтланмаслиги учун маълум бир шаклда, масалан, “гантель” кўринишида намуналар тайёрлаш тавсия этилади (2.11-расм).

Тўртта Холл контактли намуна тайёрлашда уларнинг ўлчамлари $c \geq 0,1\text{ см}$; $b_1, b_2 \geq 2h$; $d \leq 0,1\text{ см}$; $1\text{ см} \leq L \leq 1,5\text{ см}$ тартибида бўлиши тавсия этилади.

**2.7 §. Яримўтказгичларда заряд ташувчилар
концентрацияси ва ҳаракатчанлигини намунанинг
магнит қаршилиги бўйича аниқлаш**

а) Магнито қаршилиқ (магниторезестив) эффекти.

Биз юқорида узун, энсиз намуналарда Холл эффекти-
ни Холл электр юритувчи кучи пайдо бўлиши билан на-
моён бўлишини кўрдик. Маълумки, n -тип ўтказувчанликка
эга бўлса, намунада эркин электронларнинг релаксация
вақтини уларнинг энергиясига боғлиқлигини назарда тут-
сак, электр майдонида электронлар ҳар хил дрейф тезлик

$$V_{\text{др}} = -\frac{e}{m_e} \tau(\epsilon) \vec{E}$$

билан ҳаракатланади. Шунинг учун уларга магнит май-
донида ҳар хил катталиқда бўлган Лоренц кучи

$$F_x = -e \cdot \frac{e}{m_e} \cdot \tau(\epsilon) E_x \cdot B$$

таъсир этади. Холл электр майдони (E_H) мувозанатга (ста-
ционар ҳолатга) эришганда тезликлари ўртача энергияга
(ϵ) мос келган электронларда ($\vec{E}_H$) нинг электронга таъ-
сир кучи Лоренц кучига тенглашади. Шунинг учун дрейф
ҳаракатига магнит майдон таъсир этмайди. Тезликлари
ўртача тезликдан катта ва кичик бўлган электронлар эса
ҳаракат йўналишларини электр майдонига нисбатан ўзгар-
тиради, уларнинг ҳаракат йўли оғади. Оқибатда магнит
майдонида намуна қаршилигининг ортиши кузатилади.
Бу ҳодиса физикавий магнит қаршилиқ эффекти деб ата-
лади. Мазкур эффектнинг батафсил назарияси Больцман-
нинг кинетик тенгламаси ечими асосида қаралади. Маг-
нит майдонида нисбий солиштирма қаршилиқнинг ўзга-
риши $j_x = \text{const}$ ва $j_y = 0$ бўлганда

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{E_x(B) - E_x(0)}{E_x(0)} = \frac{E(B)}{E(0)} - 1 \quad (2.58)$$

ифода билан аниқланади.

Кучсиз магнит майдонида ($\mu_n B \ll 1$ ёки $\mu^2 B^2 \ll 1$) кириш-
мавий (n ёки p -тип) ўтказувчанликли яримўтказгичлар
учун нисбий солиштирма қаршилиқнинг магнит майдо-
нида ўзгариши

$$\frac{\Delta\rho(B)}{\rho(0)} = \frac{\rho(B) - \rho(0)}{\rho(0)} \quad (2.59)$$

ифода билан, физикавий магнито солиштирма ўтказув-
чанлик

$$\sigma(B) = e\mu_n n(1 - \beta B^2 \mu_n^2) \quad (2.60)$$

ифода билан аниқланади. Бу ерда, β — физикавий

$$\beta = \frac{\langle \tau^3 \rangle \langle \tau \rangle - \langle \tau^2 \rangle^2}{\langle \tau \rangle^4} \quad (2.61)$$

магнито қаршилиқ коэффиценти. Релаксация вақтининг
энергияга боғланишини назарда тутмаслик, яъни элект-
ронларнинг тезликлари энергияси қандай бўлишдан
қатъи назар, бир хил бўлади деб олиш магнит қаршилиқ
коэффицентидаги тўла йўқотишга олиб келади ($\beta=0$): β —
заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмига, ярим-
ўтказгичларнинг зоналар тузилишига боғлиқ. Кўп ҳол-
ларда релаксация вақти (τ) нинг энергияга боғлиқлиги
даражали функция $\tau \sim \varepsilon^{-S}$ бўлади. Бунда электронларнинг
изоэнергетик сатҳлари шар сиртидан иборат бўлса, куч-
сиз магнит майдонда ва айнамаган яримўтказгичларда
заряд ташувчиларда турли сочилиш механизмлари содир
бўлгандаги S -нинг, Холл фактори r_H , магнит қаршилиқ
коэффиценти β -нинг қийматлари 2.2-жадвалда келти-
рилган.

Жадвал таҳлилидан кўринадики, магнито қаршилиқ
коэффиценти Холл факторига нисбатан сочилиш меха-
низмига кучлироқ боғлиқ экан. Кристалл панжараси куб
сингоний тузилишли яримўтказгичлар *Ge*, *Si*, *GaAs*,
InSb ва ҳоказоларда Холл эффектнинг катталиги кри-
сталл ўқларининг йўналишига боғлиқ бўлмайди. Холл
ўлчовларини кристалл ўқларининг исталган йўналишида
бажариш мумкин. Магнит қаршилиқнинг катталиги эса

ўлчашнинг қайси кристаллографик ўқларига нисбатан бажарилишига боғлиқ. Холл эффектида магнитоқаршилик катталигини ўлчаш техник жиҳатдан Холл электр юритувчи кучини ёки Холл токини ўлчашга нисбатан соддароқ. Лекин юқорида кўрсатилганлар ҳаракатчанликни физикавий магнито қаршилик бўйича бир мунча қийинчиликларга ва катта хатоликларга олиб келиши мумкин. Бўйи калта, эни сербар намуналарда Холл эффекти Холл токи пайдо бўлиши билан намоён бўлишини кўрган эдик. Бунда магнит майдонида ҳосил бўлган Холл токи (I_H) ўтказувчанлик токини оғдиради (2.5-расм). Ток ўтаётган най шаклидаги каналнинг узунлиги (a) магнит майдонида ортиб $a(1+\mu^2 B^2)^{1/2}$, эни (w) камайиб $w/(1+\mu^2 B^2)$ бўлишлиги оқибатида, ўтказувчанлик $w/a(1+\mu^2 B^2)^{-1}$ га пропорционал бўлади. Шундай қилиб, магнит майдони намунанинг ўтказувчанлигини камайтиради, яъни қаршилигини оширади. Бу ҳодиса, физикавий магнито қаршиликдан фарқли ўлароқ, геометрик магнит қаршилик эффекти деб аталади. Демак, тоза магнитоқаршилик эффекти бўйи калта, эни сербар бўлган намуналарда электр майдонининг бир жинсли соҳасида амалга ошади. Ўлчамлари чекланган намуна учун нисбий магнито қаршилик $E_x = \text{const}$, $E_y = 0$ да ўлчанганда

2.2-жадвал

Сочилиш механизмлари	S	r_H	β	β_r
Ионлашган киришмаларда	3/2	1,93	2,15	5,89
Нейтрал киришмаларда	0	1	1	1
Акустик фононларда	-1/2	1,18	0,381	1,77

$$\left(\frac{\Delta \rho(B)}{\rho(O)} \right)_T = \frac{E_x(B) - E_x(O)}{E_x(O)} = \frac{j_x(B)}{j(O)} \quad (2.62)$$

қўринишни олади. n -тип яримўтказгичларнинг геометрик магнитоқаршилиқ эффекти орқали нисбий солиштирма қаршилиқнинг магнит майдонида ўзгариши $\mu_n B \ll 1$ да

$$(\Delta\rho/\rho)_r = \beta_r \mu_n^2 B^2 \quad (2.63)$$

формула билан аниқланади. Бу ерда,

$$\beta_r = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2} \quad (2.64)$$

геометрик магнитоқаршилиқ коэффициенти, β_r — сочилиш механизмига боғлиқ бўлган катталиқ бўлиб, унинг қиймати жадвалда келтирилган. Кучли магнит майдони $\mu_n B \gg 1$ да геометрик магнитоқаршилиқни $\mu_n^2 B^2$ га пропорционалиги сақланади, физикавий магнитоқаршилиқ эса заряд ташувчилар ҳаракатчанлигига боғлиқ бўлмаган қийматга эришиб тўйинади. Ҳаракатчанлиги катта бўлган яримўтказгичларда магнит майдон индукциясининг кичик қийматларида кучли магнит майдони шарти амалга ошгани учун бундай яримўтказгичларда геометрик магнитоқаршилиқ усули бўйича μ_n ни аниқлаш афзалроқдир. Бундан ташқари, физикавий солиштирма магнитоқаршилиги релаксация вақтларининг ҳар хил ўртачалаштирилган қийматларининг айирмаси билан боғланган (2.60) ва у жуда кичик бўлиши мумкин. Масалан, $GaAs$ да уй температурасида қаршилиқнинг нисбий ўзгариши $B=1\text{Тл}$ да $\Delta\rho/\rho \approx 2\%$ а ($\Delta\rho/\rho)_r \approx 50\%$ га тенг.

б. Заряд ташувчилар ҳаракатчанлигини намунанинг геометрик магнитоқаршилиги бўйича аниқлаш

Бу усул билан заряд ташувчилар ҳаракатчанлигини ўлчаш бўйи калта, эни сербар бўлган намуналарда геометрик магнитоқаршилиқ кузатиладиган ($E_x = \text{const}$, $E_y = 0$) шарт бажарилганда ўринли бўлган (2.72) ифодага асосланган. Намуна қисқа ва сербар бўлса, металл контактлар (электродлар) орқали Холл электр майдони уланади. Бунда электр майдони намуна бўйлаб йўналади, электр токи эса майдонга нисбатан Холл бурчагига оingan ҳолда оқади. n -тип яримўтказгичлар учун Холл ҳаракатчанлиги билан геометрик магнитоқаршилиқ бўйича ўлчанган ҳара-

катчанлик орасидаги боғланишни кўрайлик. Геометрик магнитоқаршилиқ орқали аниқланадиган ҳаракатчанликни (2.63) дан топамиз

$$\mu_r = \frac{1}{B} \left[\frac{\Delta \rho(B)}{\rho(0)} \right]^{\frac{1}{2}} = \beta_r^{\frac{1}{2}} \mu_n \quad (2.65)$$

Магнит майдон уланмаганда ва уланганда пластина шаклидаги намуналарнинг юза бирлигидаги қаршилиқлари $R(0)$ ва $R(B)$ бўлсин. Кучсиз магнит майдони $\mu B \ll 1$ да (2.63) га кўра уларнинг нисбати

$$\frac{\Delta R(B)}{R(0)} = (\mu_r B)^2 = (r_n \mu_n \xi B)^2 \quad (2.66)$$

бўлади, бу ерда

$$\xi = \frac{\beta_r^{\frac{1}{2}}}{r_n} = \frac{\mu_r}{(r_n \mu_n)} \quad (2.67)$$

(2.67) ифодадан сочилиш механизмига боғлиқ коэффициент ξ ни тажрибада аниқлаш мумкинлиги кўринади. Релаксациянинг вақт доимийси импульс бўйича ўзгармас бўлган *такрибида* $\xi=1$, акустик фононларда сочилиш бўлса $\xi=1,13$, ионлашган киришма атомларида сочилса $\xi=1,26$ га тенг бўлади. (2.26) ва (2.31) формулалар чексиз катта ўлчамли $b \gg a$ юпқа намуналар учун, яъни Холл электр майдони кузатилмайдиган ҳол учун ўринли. Намуна ўлчамлари чекланганда Холл электр майдони қисман шунтланади (металл электродлари) ва геометрик магнитоқаршилиқни камайтиради. Шундай қилиб, геометрик магнитоқаршилиқ эффекти намунанинг ўлчамларига боғлиқ. Холл электр юритувчи кучи қисқа тўғри бурчакли пластинкаларда аниқланганда, тенгламага Холл ЭЮК ини контактлар орқали шунтланиш даражасини ифодаловчи тузатиш функцияси f киритилади ва у орқали ўлчамлари чекланган намунанинг нисбий геометрик магнитоқаршилиги

$$\left[\frac{\Delta R(B)}{R(0)} \right]_r = \frac{\Delta R(B)}{R(0)} \cdot f \quad (2.68)$$

аниқланади. Энг содда ҳолда f намуна узунлигини кенглигига нисбати билан аниқланади. Нисбат $a/b \leq 0,35$ бўлганда, аниқланиш хатолиги 10% дан катта бўлмаганда $f = 1 - 0,543 \frac{a}{b}$ билан ифодаланади. a/b нисбатнинг исталган қийматида f — релаксация вақтининг ўрталаштирилган қийматига боғлиқ. * Шундай қилиб, μ_r — ҳаракатчанликни сферикизоэнергетик сиртли киришмавий яримўтказгичларда аниқлаш мумкин. Геометрик магнитоқаршилиқ шакли Корбино диски кўринишида бўлган намуналарда ҳам кузатилади (2.12,6-расм). Бунда марказий контакт айланма ҳалқасимон контакт билан ажратилган. Корбино диски шаклидаги намунада электр майдонининг азимутал ташкил этувчиси $E_\phi = 0$ бўлади, бу йўналишда $j_\phi = j_\phi \neq 0$ Холл токи оқади. Магнит майдонидаги ток зичликлари ифодаси (2.26) дан

$$\frac{R(B)}{R(0)} = \frac{\rho(B)}{\rho(0)} (1 + \mu_{\text{нн}}^2 B^2) \quad (2.69)$$

ифодани олиш мумкин. Корбино доираси учун бу формулага

$$R(B) = \Delta R(B) + R(0); \quad \rho(B) = \Delta \rho(B) + \rho(0)$$

ни қўйиб, Холл ҳаракатчанлигининг

$$\mu_{\text{нн}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\frac{\Delta R(B)}{R(0)} - \frac{\Delta \rho(B)}{\rho(0)}}{1 + \frac{\Delta \rho(B)}{\rho(0)}}} \quad (2.70)$$

ифода билан аниқланишини кўрамыз. Физикавий магнитоқаршилиқ жуда кичик бўлган ҳолда $\frac{\Delta \rho(B)}{\rho(0)} \ll \frac{\Delta R(B)}{R(0)}$ Корбино доираси (диски)да магнитоқаршилиқ бўйича ҳаракатчанлик қуйидагича аниқланади:

$$\mu_{\text{нл}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Delta R(B)}{R(0)}} \quad (2.71)$$

Геометрик магнитоқаршилик усули эпитаксиал қатламларда юқори Ом ли қатламлар заряд ташувчиларининг ҳаракатчанликларини ўлчашда энг қулайдир ($n\text{л}^+$, $p\text{л}^+$ — структураларда). Бу усулда ҳам контактлар қаршилиги кичик бўлиши керак, чунки у $R(0)$ ни ошириб, ҳаракатчанликни камайтиради ва натижада мунтазам хатолик вужудга келади. Назарий текширишларнинг кўрсатишича, электр майдони йўналишида концентрация градиенти магнит қаршиликнинг ўзгаришига олиб келмайди. Магнит майдонидаги ва майдон бўлмагандаги қаршиликлар ўртача солиштирма қаршиликка пропорционал бўлади. Эпитаксиал технология билан қатламлар солишда бу жуда муҳимдир. Магнит майдонининг электр майдони йўналишига нисбатан йўналишига қаттиқ талаб қўйилмайди. Масалан, магнит майдони 26° га оғганда ҳаракатчанликни ўлчашдаги хатолик 10% дан ошмайди. Намунани магнит майдонида текширганда ўзгармас ва ўзгарувчан ток кўприкларидан фойдаланилади. Ўлчовлар магнит майдонининг ҳар хил қийматларида олиб борилади, $\Delta R(B)/R(0)$ нисбат B^2 ва пропорционал бўлади. Тажриба натижаларидан заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги (2.30) билан ҳисобланади. Қаршиликни ўлчаш кўприкларининг чиқиш сигналларидан илдиз чиқариш учун, электрон чизмасини қўллаш билан ҳаракатчанликка пропорционал сигнал олинади. У геометрик қаршилик усули билан ҳаракатчанликни тўғридан-тўғри аниқловчи асбоб яратиш имконини туғдиради.

2.8 §. Яримўтказгичларда тақиқланган зона кенглигини, донор ва акцептор киришма атомларининг концентрацияси ва ионланиш энергиясини аниқлаш

а. Тақиқланган зона кенглигини солиштирма ўтказувчанликнинг температурага боғлиқлигидан аниқлаш

Яримўтказгичларнинг солиштирма ўтказувчанлиги хусусий электр ўтказувчанлик ($n-p-n$) соҳасида қуйидаги

$$\sigma_i = en_i(\mu_n + \mu_p) \quad (2.72)$$

формула билан ифодаланади, бу ерда n_i — заряд ташувчиларнинг хусусий концентрацияси. Яримўтказгичларда электрон ва каваклар статистикасига кўра хусусий концентрация

$$n_i = (N_c \cdot N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.73)$$

ифода билан топилади. Бу ерда:

$$N_c = 2(2\pi m_n^* kT/h^2)^{3/2}; \quad N_v = 2(2\pi m_p^* kT/h^2)^{3/2} \quad (2.74)$$

бўлиб, улар мос равишда ўтказувчанлик ва валент зоналарида эффектив квант ҳолатларининг зичлиги, E_g — тақиқланган зона кенлиги, K — Больцман доимийси, T — температура, m_n^* , m_p^* — электрон ва кавакларнинг эффектив массалари. (2.74) дан кўринадики,

$$(N_c \cdot N_v)^{1/2} \sim T^{3/2}.$$

Электрон ва каваклар ҳаракатчанлигининг температурага боғлиқлиги бир хил бўлади деб қабул қилиб, уларнинг ҳар бирида ҳаракатчанликнинг температурага боғлиқлигини кенг температура оралиғида температуранинг даражали функцияси кўринишида ифодалаш мумкин:

$$\mu_{n,p} = A_{n,p} T^a \quad (2.75)$$

Ҳақиқатда электрон ва кавакларнинг температурага боғлиқлиги бир-биридан фарқ қилади, бошқача қилиб айтганда, улар ҳар хил қийматдаги η — билан аниқланади. Ҳаракатчанликлар нисбати $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ температурага боғлиқ бўлмаган доимий катталиқдир. Юқорида қайд қилинган фаразларга кўра, хусусий солиштирма электр ўтказувчанлик (2.72) ни

$$\sigma_i = CT^{3/2-\eta} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.76)$$

кўринишда ёзиш мумкин. (2.76) ни логарифмлаб, қуйидаги кўринишда ифодалаш мумкин:

$$\ln(\sigma, T^{r-1/2}) = \ln C - \frac{E_g}{2kT} \quad (2.77)$$

Демак, тажрибада ўлчанган хусусий солиштирма электр ўтказувчанликнинг температурага боғлиқлигини (2.78) ифода кўринишидаги графигини тасвирлаб E_g -ни аниқлаш мумкин экан:

$$E_g = -2k \frac{\Delta \ln(\sigma, T^{r-1/2})}{\Delta (1/T)} \quad (2.78)$$

Электрон-вольт бирлигида E_g ни аниқлаш учун қуйидаги формула ишлатилади:

$$E_g = -0,397 \frac{\Delta \lg(\sigma, T^{r-1/2})}{\Delta (1000/T)} \quad (2.79)$$

(2.76) ва (2.77) формулалардан кўринадикки, E_g ни аниқлаш учун η қийматини билиш керак. Лекин кўп ҳолларда $\eta \sim 3/2$ тартибида бўлгани учун $T^{r-1/2} = 1$ кўпайтмани ташлаб юбориш мумкин. Юқори температура соҳасида $\ln(\sigma, T^{r-1/2})$ ни $(1/T)$ га боғланишини қўллашда хусусий ўтказувчанликнинг ҳамда аралашма ўтказувчанлик соҳаларида чизиқли боғланишдан четга чиқишини назарда тутиш керак. Юқори температураларда бу боғланишнинг чизиқли боғланишдан четга чиқиши заряд ташувчиларнинг юқори тартибли сочилиш эффекти таъсирида вужудга келиши мумкин. Киришмавий электр ўтказувчанликда ҳаракатчанлиги кичик бўлган заряд ташувчилар пайдо бўлса, хусусий ўтказувчанликдан киришмавий ўтказувчанлик соҳасига ўтганда, чизиқли боғланишдан сезиларли даражада четга чиқиши кузатилади. $E_g = \text{const}$ бўлганда, яъни температурага боғлиқ бўлмаса, (2.77) ифода билан топилган E_g тақиқланган зонанинг катталигига тенг бўлади.

Ҳақиқатда тақиқланган зона кенглиги температурага боғлиқ бўлади ва бу боғланишнинг кўриниши ўлчаш натижаларига кучли таъсир кўрсатади. Агар E_g нинг температурага боғланиши

$$E_g = E_{g0} - \beta T \quad (2.80)$$

кўринишда бўлса, кўрилатган усул билан (2.77) дан $T=0$ даги тақиқланган зона кенглигининг қиймати аниқланади. У исталган температурадаги қийматини (2.91) орқали аниқлаш учун β бошқа ўлчашлар билан топилган бўлиши керак. E_g нинг ҳароратга боғланиши мураккаброқ чизикли бўлмаган кўринишда бўлса, $\ln(\sigma, T^{-1/2})$ нинг $1/T$ га боғлиқлиги чизикли боғланишдан анча четга чиқади ва (2.78) формула билан топилган энергия қиймати тақиқланган зона кенглигининг ҳақиқий қийматини ҳеч қайси бир температурада бермайди (ифодаламайди).

б. Холл доимийсининг температурага боғланишига тақиқланган зона кенглигини аниқлаш

Биз юқорида келтирган аралашмавий (киришмавий) ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичларнинг Холл доимийси (2.09) хусусий ўтказувчанлик соҳаси ($n=p=n_i$) да (2.09) ва (2.73) формулаларга кўра қуйидаги

$$R_H = \frac{r_H}{e} \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p} (N_c \cdot N_v)^{-1/2} \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.81)$$

кўринишга эга бўлишини кўрган эдик. Кўп ҳолларда амалда бажариладиган $\frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}$ нисбатнинг температурага боғлиқ эмас деб фараз қилиб, (2.81)

$$R_H T^{1/2} = c \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.82)$$

кўринишга келтирилади (2.82) дан кўринадики, Холл доимийсини ҳар хил температурада ўлчаб, хусусий ўтказув-

чанлик соҳасида E_g ни аниқлаш мумкин. Бунинг учун тажриба натижасини $\ln(R_H T^{3/2})$ нинг $1/T$ га боғланиши кўринишида чизиб, унинг оғиш бурчаги тангенс топилади ва у орқали E_g ҳисобланади:

$$E_g = 2\kappa \frac{\Delta \ln(R_H T^{3/2})}{\Delta(1/T)} \quad (2.83)$$

E_g -ни электрон-вольт бирлигида аниқлаш учун

$$E_g = 0,397 \frac{\Delta \lg(R_H T^{3/2})}{\Delta\left(\frac{1000}{T}\right)} \quad (2.84)$$

ифода қўлланилади. Шунга айтиш керакки, бу усул билан топилган E_g температураси $T=0$ К га мос келган ҳақиқий тақиқланган зона кенглигини беради. Агар $\ln(R_H T^{3/2})$ нинг $(1/T)$ га боғланиши чизиқли боғланишдан кучли фарқ қилса, буни тақиқланган зона кенглигининг температурага чизиқли боғланишидан фарқ қилиши билан ҳамда катта концентрацияли заряд ташувчиларни кўп фононли сочилиш ва электрон-кавак жуфтларида сочилиш жараёнларини вужудга келиши билан тушунтириш мумкин. Бу охириги икки жараён сочилиш механизмларига боғлиқ бўлган Холл коэффициентларига (r_{nH} , r_{pH}) таъсир қилади, ҳаракатчанликнинг температурага боғланиши кўринишини ўзгартиради.

в. Эркин заряд ташувчиларнинг концентрациясини температурага боғланишидан ΔE_p , N_A , N_D -ни аниқлаш

Холл доимийсининг катта температура оралигида ўзгаришини тадқиқ қилишда эркин заряд ташувчилар концентрациясининг ҳароратга боғлиқлигини таҳлил қилмоқ керак. Умумий ҳолда уни таҳлил қилиш анчагина мураккаб масалалар. Ҳақиқий n -тип яримўтказгичларда ҳамма вақт бир неча турдаги донор ва акцептор киришмалар бўлади. Баъзи бир киришма атомлари биргина электронни эмас, балки бир неча электронни бериши ёки қабул қилиши (бириктириши) мумкин. Киришма атомларининг

асосий сатҳидан ташқари, киришмаларнинг қўзғалган сатҳи электронни тутиб олиши мумкин. Булардан ташқари энергетик сатҳларнинг айланиши ҳисобга олиш керак.

Ҳар бир яримўтказгичда қандайдир миқдорда донор ҳамда акцептор киришмаларининг бўлиши яримўтказгични қисман компенсациялайди. Шунинг учун, ҳар бир алоҳида олинган ҳолда, нимани ташлаб юбориш кераклиги ҳал қилиниши керак.

Айтайлик, яримўтказгичнинг тақиқланган зонасида энергия сатҳлари E_D ва E_A бўлган донор ва акцептор киришмалар ва уларнинг концентрациялари N_D , N_A ва $N_D > N_A$ бўлсин. Шундай қилиб, яримўтказгич электрон ўтказувчанликка эга бўлиб, қисман компенсацияланган бўлади. Бизга маълумки, электронейтраллик шароитида мусбат зарядлар миқдори манфий зарядлар миқдорига тенг бўлади. Манфий зарядлар ўтказувчан зонадаги эркин электронлар концентрацияси билан акцептор сатҳидаги ионлашган акцептор атомларининг йиғиндисига тенг, мусбат зарядлар зичлиги валент зонадаги каваклар концентрацияси билан ионлашган донор киришма атомлари йиғиндисидан иборат. Яримўтказгичларда электрон ва каваклар статистикасига кўра донор сатҳидаги электронлар ва акцептор сатҳидаги электронлар концентрациялари қуйидаги ифодалар билан аниқланади:

$$n_D = \frac{N_D}{1 + \frac{1}{g_D} \exp\left(-\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \quad (2.85)$$

$$n_A = \frac{N_A}{1 + \frac{1}{g_A} \exp\left(-\frac{E_A - E_F}{kT}\right)}$$

Бу ерда g_D , g_A киришма сатҳларининг айланиш коэффициентлари омили содда бўлган ҳолда сатҳларнинг айланиш фақат электрон спини билан боғланган бўлганда, донор киришмаси учун $g_D=2$, акцептор киришмаси учун $g_A=1/2$ бўлади. Германияда саёз энергетик сатҳ ҳосил қиладиган

донор киришмалар сатҳи учун $g_D=2$ га, акцептор сатҳлар учун $g_A=4$ га тенг бўлади. Юқоридаги изоҳга кўра айни-маган n -тип киришмавий яримўтказгичлар учун электро-нейтраллик шарти

$$n+n_A=N_D-n_0+p \quad (2.86)$$

кўринишни олади. Бу тенглама асосида заряд ташувчилар концентрациясининг температурага боғлиқлигини таҳлил қилиш мумкин ва уларда ўзига хос характерли соҳаларни аниқлаш мумкин. (2.86) да Маҳаллий рекомбинация марказларидаги электронлар ҳисобга олинмаган, яъни рекомбинация марказларининг концентрацияси кичик деб фараз қилинган. Паст температуралар соҳасида валент зонадаги каваклар концентрациясини электрон концентрациясига нисбатан ҳисобга олмаслик мумкин ($n \gg p$). Бундан ташқари, ҳамма акцептор киришма атомини ионлашган $n_A=N_A$ деб ҳисоблаш мумкин. Шу тахминларни назарда тутсак, электронейтраллик тенгламаси (2.86)

$$n+n_A-N_D-n_0=n+N_A-N_D+N_D \left[1 + \frac{1}{g_0} \exp \left(\frac{E_D - E_F}{KT} \right) \right]^{-1} = 0 \quad (2.87)$$

кўринишга келади. Бу тенгламада

$$n = N_c \exp \left(- \frac{E_D - E_F}{KT} \right) \quad (2.88)$$

бўлишини ҳисобга олиб, (2.87) ифодадан

$$\frac{(n + N_A)n}{N_D - N_A - n} = \frac{N_c}{g_p} e^{\frac{\Delta E_D}{KT}} \quad (2.89)$$

формулага келамиз. Бу ерда $\Delta E_D = E_C - E_D$ — киришма атомининг ионланиш энергияси. Паст температура соҳасида электрон концентрацияси камаяди ва (2.89) нинг маҳражида электрон концентрациясини N_D -га нисбатан ташлаб юбориш мумкин. Бунда (2.89) дан

$$n = \frac{N_D - N_A}{N_A + n} N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \quad (2.90)$$

ифодани оламиз ва уни температурага боғлиқ икки соҳасини текшириб кўрамиз:

Тула ионланиш температурасидан

1. Паст температурада ($T_3 > T_1$)

$$n \ll N_A, \text{ агар } N_D > 2N_A \quad (2.91)$$

$$n \ll N_D, \text{ агар } N_D < 2N_A$$

шартлар бажариладиган соҳада, яъни яримўтказгич компенсацияланган соҳада электрон концентрациясининг температурага боғлиқлиги

$$n = \frac{N_D - N_A}{g_D \cdot N_A} N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \quad (2.92)$$

кўринишни олади.

2. Юқорироқ температура соҳасида ($T_3 > T_1 > T_1$), $N_D \gg N_A$, агар $N_D \gg n \gg N_A$ шартлар бажариладиган соҳада, яъни яримўтказгич компенсацияланмаган соҳада температура билан заряд ташувчилар (электронлар) концентрациясининг боғланишини

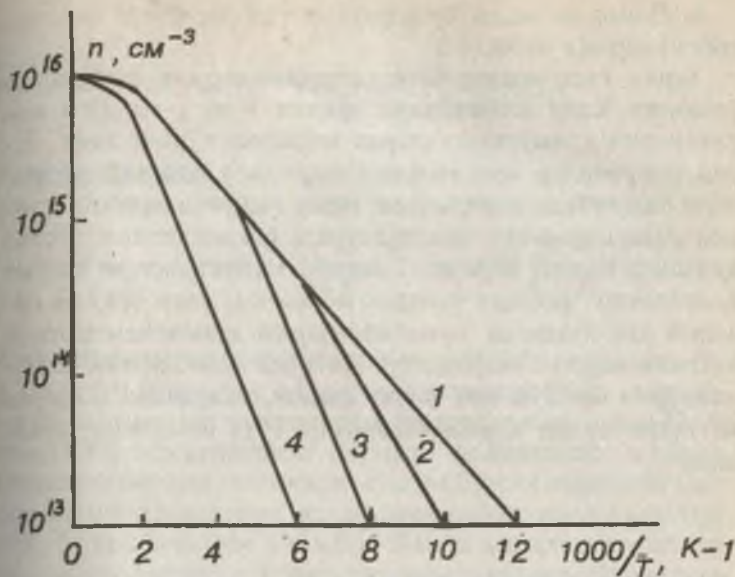
$$n = \sqrt{\frac{N_c N_D}{g_D}} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right) \quad (2.93)$$

кўринишда оламиз.

$n > N_A$ шарт $n < N_A$ шартга қараганда юқорироқ температурада бажарилади, шунинг учун электрон концентрациясининг температурага боғлиқлик графиги икки соҳадан иборат бўлиб, булардан биринчиси аста-секин иккинчисига ўтади (2.12-расм).

3. Электрон концентрацияси логарифмининг температура ($1/T$) га боғланишини назарий ҳисоблаш натижаси.

Киришмавий электр ўтказувчанлик соҳасида (2.92) ва (2.93) ифодаларга кўра, донор ва акцепторларнинг энер-



2.12-расм. Ҳар хил акцептор концентрациясида назарий ҳисобланган заряд ташувчилар концентрациясининг температурага боғлиқлиги.

$N_D - N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $E_D = 0,1 \text{ эВ}$; $m_e = 0,25 m_0$, $g_D = \frac{1}{2}$ бўлган ҳол учун
 $1 - N_A = 0$; $2 - N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $3 - N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $4 - N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

гия ионизацияси ΔE_D , ΔE_A нинг тоза киришмавий электр ўтказувчанлик соҳасида Холл доимийсининг температурага боғлиқлиги (компенсацияланмаган яримўтказгичда)

$$\lg(R_H T^{\frac{3}{2}}) = f(1000/T)$$

компенсацияланган киришмавий электр ўтказувчанлик ҳолида эса

$$\lg(R_H T^{\frac{3}{2}}) = f(1000/T) \quad (2.94)$$

Функциялари оғиш бурчагининг тангенс орқали (2.83) ини (2.84) дан E_s ни аниқлаш каби топилади.

4. Донор ва акцептор киришма атомларининг концентрацияларини аниқлаш.

Заряд ташувчилар концентрацияларини тажрибада ўлчанган Холл доимийлари орқали n ва p -типдаги киришмавий яримўтказгичларда топишни кўрган эдик. Заряд ташувчилар концентрацияларининг назарий ифодалари тажрибада аниқланган заряд ташувчиларнинг концентрацияларининг температурага боғлиқлигини таҳлил қилишга имкон беради. Тажриба натижаларини таҳлил қилишнинг мақсади шундан иборатки, улар орқали назарий ҳисобланган муносабатларни қаноатлантирувчи катталикларни аниқлашдир. Назарий ҳисобланган катталикларни маълум деб фараз қилиш, тажрибада олинган катталиклардан киришмаларнинг тўла ионланиш соҳасида

$$n(T_3) = N_D - N_A \quad (2.95)$$

қийматни аниқлашга имкон беради. $\ln n(T) = f(1/T)$ функция оғиш бурчагининг тангенсидан донор киришма атомининг ионланиш энергияси топилади. Бунда ΔE_D ни билган ҳолда T_1 температурада ($T_1 < T_3$) электрон концентрацияси $n(T_1)$ ни ўлчаб, (2.92) дан

$$N_A \cdot g_D = \frac{n(T_3) \cdot N_c}{n(T_1)} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT_1}\right) \quad (2.96)$$

ифодани оламир.

(2.93) ифодани қаноатлантирувчи T_2 температура ($T_3 > T_2 > T_1$) соҳасида электрон концентрациясини билган ҳолда (2.93) дан

$$\frac{N_D}{g_D} = \frac{n^2(T_2)}{N_c} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT_2}\right) \quad (2.97)$$

ифода топилади. (2.96) ва (2.97) ларнинг кўпайтмаси ва (2.95) N_D , N_A -га нисбатан тенгламалар тизимини ташкил этади. Тенгламалар тизимининг ечими

$$N_D = \frac{1}{2} A^{1/2} + \frac{1}{2} n(T_3) \quad (2.98)$$

$$N_A = N_D - n(T_3) = \frac{1}{2} A^{1/2} - \frac{1}{2} n(T_3)$$

бўлади, бу ерда

$$A = \left[n^2(T_3) + 4 \frac{n^2(T_2) \cdot n(T_3)}{n(T_1)} \cdot \exp \left[- \frac{\Delta E_D (T_2 - T_1)}{K T_1 T_2} \right] \right]^{1/2}$$

Агар киришма сатҳларининг айланиш коэффициентлари (g_A , g_D) маълум бўлса ёки олдиндан танланган бўлса, киришма концентрациясини топишда назарий ҳисобланган (2.96) ёки (2.97) ифодаларнинг биридан фойдаланиш мумкин. Бунда ионланиш энергияси маълум бўлган киришма концентрацияларини аниқлаш Холл доимийсининг икки температурада ўлчанган қиймати бўйича аниқлаш масаласига келади. Биринчи ўлчаш киришмаларнинг тўла ионланиш соҳасида ўтказилади:

$$R_H(T_1) = \frac{r_{H1}}{en(T_1)} = \frac{r_{H1}}{e(N_D - N_A)} \quad (2.99)$$

Иккинчи ўлчаш T_1 ёки T_2 соҳаларда ўтказилади:

$$R_H(T_1) = \frac{r_{H1}}{en(T_1)}; \quad R_H(T_2) = \frac{r_{H2}}{en(T_2)} \quad (2.100)$$

Булардан (2.96), (2.97) га кўра N_A ва N_D лардан бири

$$N_A = \frac{1}{g_D} \frac{r_{H1}}{R_H(T_3)} \cdot \frac{R_H(T_1)}{r_{H1}} N_c \cdot \exp \left(- \frac{\Delta E_D}{\kappa T_1} \right) \quad (2.101)$$

ёки

$$N_D = \frac{r_{H2}^2 g_D}{(e R_H(T_2))^2 N_c} \exp \left(- \frac{\Delta E_D}{\kappa T} \right)$$

аниқланади. (297) ифода ёрдамида донор концентрацияси N_D аниқланса акцептор концентрацияси N_A ҳисобланади. Аксинча, N_A аниқланса $N_D - N_A = n(r_3)$ дан ҳисобланади. Агар T_1 ва T_2 температураларда заряд ташувчиларда сочилиш кристалл панжарадан ионлашган киришмаларга ўтиш соҳасида бўлса, $\frac{r_{H3}}{r_{H1}} = 0,61$ бўлади ва зарурият бўлганда буни ҳисобга олиш керак. N_A ва N_D ларни аниқлашнинг яна бир усулини кўрайлик. Бу усул заряд ташувчилар концентрациясини аниқлашнинг (2.89) ифодасига асосланган, нейтраллик шартидан олинган (2.89) формуладан акцептор концентрациясини

$$N_A = \frac{1}{g_D} N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \cdot \left(\frac{N_D - N_A}{n} - 1\right) - n \quad (2.102)$$

кўринишига келтирамиз. Бу ифода кенг температура оралиғида аралаш ўтказувчанлик соҳасигача бажарилади, чунки буни олишда ҳеч қандай фаразсиз электронейтраллик шартидан тўғридан-тўғри олинган. (2.102) ифодага кўра, киришма атомининг ионланиш энергияси маълум бўлса, Холл доимийсининг икки марта ўлчанган қиймати бўйича: 1) биринчи ўлчаш киришма атомининг тўла ионланиш соҳасида (T_3); 2) ихтиёрий T_1 температура ($T_1 < T_3$) да шу ўлчашларга кўра, N_D ва N_A

$$N_A = \frac{1}{g_D} N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \cdot \left[\frac{r_{H3} R_H(T_1)}{R_H(T_3) \cdot r_{H1}} - 1\right] - \frac{r_{H1}}{e R_H(T_1)} \quad (2.103)$$

$$N_D = \frac{r_{H3}}{e R_H(T_3)} + N_A$$

формулалардан ҳисобланади. Умуман 4 та катталикини N_A , N_D , g_D ва ΔE_D ни аниқлаш учун (2.102) ифодага кичик квадратлар усулини қўллаб, уларнинг шундай қийматлари топиладики, улар эксперимент натижалари билан мос тушсин. Юқорида келтирилган мулоҳаза ва усуллари тўла p -тип ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичларга ҳам қўллаш мумкин.

Юқорида қўрилган усуллардан ташқари, N_A ва N_D ни аниқловчи бир қанча усуллар бор. Масалан, паст температурада инфрақизил нурларнинг киришма атомларида ютилишига асосланган усулни кўрсатиш мумкин. Бундай тажрибалар ўтказиш мураккаб бўлиб, олинган натижалар етарли даражада ноаниқдир. N_D ва N_A ни алоҳида аниқлашда уларнинг парамагнетик резонансларини текшириш орқали аниқлаш мумкин. Бунда жуда ҳам катта қийинчиликларга дуч келинади. Шулар билан бирга, магнит майдонида қаршиликнинг ўзгаришига асосланган усулни ҳам келтириш мумкин.

ЯРИМУТКАЗГИЧЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ ОПТИК УСУЛЛАР БИЛАН ЎЛЧАШ

3.1-§. Яримўтказгичларнинг оптик параметрлари

Яримўтказгичларда оптик ҳодисалар асосида электромагнит тўлқинларнинг боғланган валент электронлар, боғланмаган эркин заряд ташувчилар, кристалл панжара ва киришма атомлари, электрон-ковак плазмалари билан ўзаро таъсири ётади. Шунинг учун оптик ҳодисалар яримўтказгичли кристалларда тўлқин узунлиги $0,2 \div 100$ мкм оралиғида бўлган электромагнит тўлқинлар таъсирида содир бўладиган кенг жараёнларни ўз ичига олади.

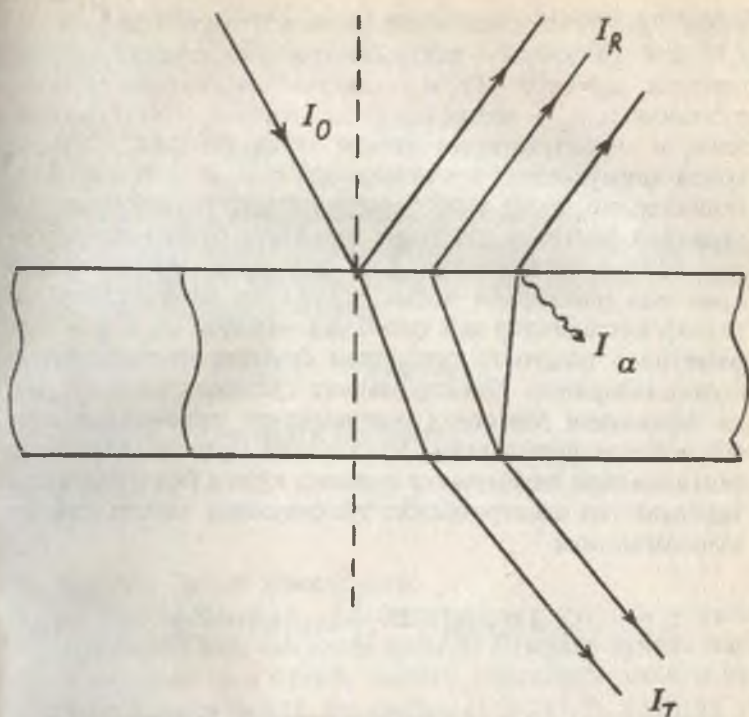
Яримўтказгич сиртига тушган ёруғлик уч қисмга ажралади: бир қисми қайтади, бир қисми синиб намунага киради, унинг бир қисми ютилиб, бир қисми эса намунадан ўтади (3.1а-расм). Намунадан қайтган I_R , ўтган I_T ва намунада ютилган I_a ёруғлик интенсивликларининг уларга тушган ёруғлик интенсивлиги I_0 га нисбати билан аниқладиган катталиклар

$$R_v = \frac{I_R}{I_0}; \quad T_v = \frac{I_T}{I_0}; \quad A_v = \frac{I_a}{I_0} \quad (3.1)$$

мос равишда намунанинг ёруғликни қайтариш ва ўтказиш (шаффофлик, тиниқлик) коэффициентлари, A_v — ютиш қобилияти деб аталади. Бу катталиклар намунадан ёруғлик оқимининг қандай қисми қайтишини, ўтишини ва намунада ютилишини кўрсатади. Энергиянинг сақланиш қонунига мувофиқ:

$$R_v + T_v + A_v = 1 \quad (3.2)$$

бўлади. Оптика курсларидан маълумки, T_v , R_v , A_v лар билан оптик константалар орасидаги муносабатлар электр



3.1, а-расм. Пластина шаклидаги яримўтказгич намунада нурнинг йўли.

ўтказувчан муҳитда (солиштирма электр ўтказувчанлиги $\sigma \neq 0$ бўлганда) комплекс нур синдириш кўрсаткичи билан аниқланади

$$\bar{n}^2 = c^2 \mu_0 \left(\mu \epsilon_1 \epsilon_0 - i \mu \frac{\sigma}{\omega} \right) = (n - i\chi)^2 \quad (3.3)$$

Бу ерда нур синдириш кўрсаткичи $\bar{n}^*$ нинг ҳақиқий қисми $n = c/u$ бўлиб, у ёруғликнинг вакуумда тарқалиш тезлигини яримўтказгичдаги тарқалиш тезлиги u га нисбати билан аниқланадиган катталиқдир. Мавҳум қисми χ электромагнит тўлқинларининг муҳитда сўнишини кўрсатадиган катталиқдир. Шунинг учун χ — ютилиш кўрсат-

кичи ёки экстенция коэффициенти деб юритилади, $\epsilon_0 = (4\pi \cdot 9 \cdot 10^{-9}) \text{ Ф/м}$ — вакуумнинг диэлектрик сингдирувчанлиги, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — вакуумнинг магнит сингдирувчанлиги, ϵ_1 — намунанинг диэлектрик сингдирувчанлиги, σ — солиштирма электр ўтказувчанлик. Умумий ҳолда яримўтказгич кристалларида ϵ , μ , σ — тензор катталиклардир, яъни улар электромагнит тўлқинларининг кристалл ўқларига нисбатан тарқалиш йўналишига боғлиқ бўлган катталиклар. Куб шаклидаги кристалларда кристалл панжараси оптик ҳодисалар параметрларини скаляр катталиклар деб ҳисоблаш мумкин. ϵ_1 , σ , μ — параметрлар намунага тушаётган ёруғлик частотасининг функцияларидир. Электромагнит тўлқинларнинг муҳитда тарқалиши Максвелл тенгламалари тизимининг ечими асосида ўрганилади. Ўтказувчан муҳитда Максвелл тенгламалари тизимининг ечимига кўра z ўқи йўналишда тарқалаётган электромагнит тўлқинининг электр майдон кучланганлиги

$$E_z = E_{z0} \exp\left(-\frac{\omega\chi}{c} z\right) \cdot \exp\left(ikvt - \frac{\pi z}{c}\right) \quad (3.4)$$

кўринишдаги ифода билан аниқланади. Бу формула амплитудаси экспонента қонуни бўйича сўнувчи ясси электромагнит тўлқинларнинг электр майдон кучланганлигини ифодалайди. Одатда оптик асбобларда электр майдон кучланганлиги амплитудаси квадратига пропорционал бўлган ёруғлик интенсивлиги (I) ўлчанади. Шунга кўра, (3.4) дан

$$I_z \sim \left[E_{z0} \exp\left(-\frac{\omega\chi}{c} z\right) \right]^2 = E_{z0}^2 e^{\frac{2\omega\chi}{c} z} \quad (3.5)$$

бўлади. Бундан кўринадики, муҳитда тарқалаётган ёруғликнинг интенсивлиги намуна сиртидан узоқлашган сари камайиб боради. (3.5) тенгламанинг

$$I_z = I_0 e^{-\alpha z} \quad (3.6)$$

қўринишдаги ифодаси ёруғликнинг муҳитда ютилишини қўрсатувчи Бугер-Ламберт қонуни деб юритилади. Бу ерда

$$\alpha = 2 \frac{\omega \chi}{c} \quad (3.7)$$

α — ютилиш коэффициенти деб аталади.

Яримўтказгичларнинг оптик хоссаларини ёритишда n ва χ билан бир қаторда, комплекс диэлектрик сингдирувчанлик ҳам қўлланилади:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 \quad (3.8)$$

n^* билан ε орасидаги боғланиш

$$n^* = \sqrt{\varepsilon \mu} \quad (3.9)$$

формула билан аниқланади.

Электромагнит тўлқинларининг тўлқин узунлиги $\lambda = 0,2 \div 100$ мкм соҳасида яримўтказгичлар кучсиз магнит хоссаларига эга бўлиб, магнит сингдирувчанлиги бирга яқин бўлади ($\mu \approx 1$). Бу вақтда (3.3), (3.7), (3.8) ва (3.9) тенгламалардан

$$\varepsilon_1 = n^2 - \chi^2; \quad \varepsilon_2 = 2n\chi = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}; \quad \alpha(\omega) = \varepsilon_2 \frac{\omega}{nc} \quad (3.10)$$

бўлишлигини кўрамиз. Яримўтказгичларнинг оптик хоссаларини ε_1 ва ε_2 орқали ҳисоблашга зарурият бўлган вақтда n ва χ параметрларга ўтиш унчалик қийинчилик туғдирмайди. Нур синдириш қўрсаткичлари n_1 ва n_2 бўлган муҳит чегарасига тушган ёруғлик иккига ажралади: бир қисми қайтади, бир қисми эса синиб, намунага киради. Маълумки, қўтбланган ёруғлик икки муҳит чегарасига тушганда қайтган (E'), синган (E'') тўлқинларнинг электр майдон кучланганликлари амплитудалари Френель тенгламалари орқали аниқланади. Бунда $\mu_1 = \mu_2 \approx 1$ бўлганда E' ва E'' лар қуйидаги ифодалар орқали топилади:

$$E'_{vp} = E_{vp} \frac{\lg(\varphi - \varphi^*)}{\lg(\varphi + \varphi^*)}; \quad E'_{vs} = \frac{\sin(\varphi^* - \varphi)}{\sin(\varphi + \varphi^*)} \cdot E_{vs} \quad (3.11)$$

$$E''_{vp} = E_{vp} \frac{2 \sin \varphi^* \cos \varphi}{\sin(\varphi + \varphi^*) \cos(\varphi - \varphi^*)}; \quad E''_{vs} = \frac{2 \sin \varphi^* \cos \varphi}{\sin(\varphi + \varphi^*)} \cdot E_{vs}$$

Бу ерда φ — тушиш, φ'' — синиш бурчаклари. E_p , E_s — тушаётган тўлқинларнинг электр майдон кучланганлик-лари амплитудаси. P ва S — индекслар электр майдон кучланганлигини ёруғликнинг тушиш текислигига парал-лел ва унга тик текисликда ётишини мос равишда кўрса-тади. Кутбланган ёруғликнинг намунадан қайтиш коэф-фициентлари

$$R_{vs} = \left| \frac{E'_{vs}}{E_{vs}} \right|^2; \quad R_{vp} = \left| \frac{E'_{vp}}{E_{vp}} \right|^2 \quad (3.12)$$

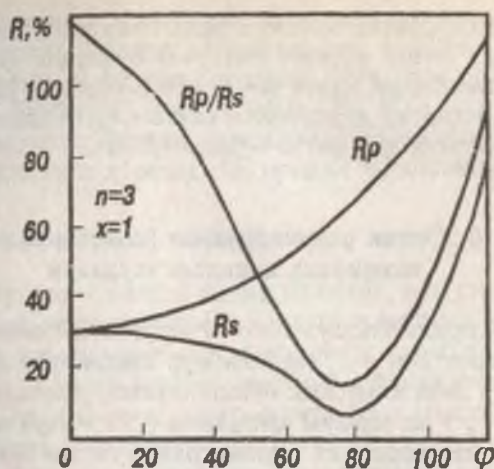
ўтиш коэффициентлари (шаффофлик коэффициентлари) куйидаги ифодалар билан аниқланади.

$$T_{vs} = \left| \frac{E_{vs}}{E_{vs}} \right|^2; \quad T_{vp} = \left| \frac{E_{vp}}{E_{vp}} \right|^2 \quad (3.13)$$

Френель тенгламаларидан кўринадики, ёруғликнинг на-мунадан қайтиш ва ўтиш коэффициентлари ёруғликнинг тушиш бурчагига (3.16-расм), оптик константаларига, электр майдон кучланганлиги векторининг йўналишига боғлиқ. Эслатиб ўтамиз, Френель тенгламалари муҳит-нинг нур синдириш кўрсаткичи комплекс бўлган ҳол учун ҳам ўринлидир. Бунда синиш қонуни

$$\frac{n^*}{n_1} = (n - i\chi) = \sin \varphi / \sin \varphi^* \quad (3.14)$$

кўринишда бўлади. Биринчи муҳит ҳаво бўлганда $n_1 = 1$ бўлиб, синиш бурчаги комплекс бўлади. Ёруғлик ҳаводан



3.1, 6-расм. Ҳаво яримўтказгич чегарасида чизиқли қутбланган ёруғликнинг қайтиш коэффициентларининг тушиш бурчагига боғланиши (нур синдириш кўрсаткичи $n=3$, ютиш кўрсаткичи $s=1$ бўлган ҳол учун).

яримўтказгич сиртига тик тушганда $\varphi = \varphi'' = 0$ бўлади. Френель муносабатларига кўра, ҳаво-яримўтказгич чегарасидан ёруғликнинг қайтиш коэффициентининг оптик константалар (n ва χ) билан боғланиши қуйидаги кўринишни олади:

$$R_s = R_p = R_{\varphi} = \frac{(n-1)^2 + \chi^2}{(n+1)^2 + \chi^2} \quad (3.15)$$

(3.15) дан кўринадики, қайтиш коэффициенти ёруғлик тик тушганда унинг қандай қутбланганлигига боғлиқ бўлмайди. Қайтиш коэффициентининг тушиш бурчагига боғлиқлиги шуни кўрсатадики, тушиш бурчагининг $\varphi = 0 \div 17^\circ$ оралиғида деярли ўзгармайди, шунинг учун амалиётда тушиш бурчагининг $0 \div 17^\circ$ оралиғида ўлчанган қайтиш коэффициентини тик тушгандаги каби қараш мумкин. (3.15) тенгламадан кўринадики, қайтиш коэффициентини ўлчаш билан бир вақтда икки параметр (n ва χ) ни аниқлаш мумкин эмас. Кўп яримўтказгичларда нур

синдириш кўрсаткичининг етарлича катта бўлиши туфайли, уларда ютиш кўрсаткичи $\chi=0$ бўлганда ҳам қайтиш коэффициентлари катта $R=30\div 40\%$ бўлади. Намуналарда нур синдириш кўрсаткичи катта $n \gg \chi$ бўлганда қайтиш коэффициенти ҳам катта бўлади ($R \approx 1$).

3.2 §. Оптик параметрларни (константаларни) тажрибада аниқлаш усуллари

Биз юқорида ўтказувчан $\sigma \neq 0$ муҳитда диэлектрик синдирувчанлик $\epsilon = \epsilon_1 - i\epsilon_2$ ни ёки нур синдириш кўрсаткичи ($\bar{n}^* = n - i\chi$) нинг комплекс бўлишлигини, уларнинг ҳақиқий (n , $\epsilon_1 = n^2 - \chi^2$) ва мавҳум қисмлари (χ , $\epsilon_2 = 2n\chi$) нинг кристаллнинг микроскопик параметрлари билан бевосита боғлиқ эканлигини кўрган эдик. Яримўтказгичлар тузилишини, параметрларини оптик усуллар билан аниқлашда биринчи навбатда n ва χ ларни алоҳида ёки $\epsilon_1 = n^2 - \chi^2$ ва $\epsilon_2 = 2n\chi$ ларни ёруғлик тўлқин узунлигининг кенг соҳасида ва ҳар хил температураларда аниқлаш лозим. Оптик параметрларнинг (константаларни) аниқлаш усулларини икки гуруҳга бўлиш мумкин. Биринчи гуруҳ усуллари ёруғликнинг қайтиш коэффициенти ни ўлчашга, иккинчи гуруҳ усуллари намунанинг тиниқлигини (шаффофлигини) ўлчашга асосланган. Оптик константалар (n , χ , α) ни тажрибада ўлчаш усулларни қисқача кўриб чиқамиз. Ютиш кўрсаткичи нур синдириш кўрсаткичидан анча кичик ($n \gg \chi$) бўлган тўлқин узунлиги соҳасида (3.15) дан (3.16) тенгламани оламиз:

$$R_r = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (3.16)$$

$n^2 \gg \chi^2$ шарт тўлқин узунлигининг катта $\lambda \gg \lambda_g$ соҳасида $\left(\lambda_g = hc/E_g = \frac{1.24}{E_g(\text{эВ})}, [\text{мк}] \right)$ ҳам бажарилади, бу ерда E_g — тақиқланган зона кенлиги. Кўп яримўтказгичларда, ҳатто заряд ташувчилар концентрацияси катта бўлганда ҳам $n^2 \gg \chi^2$ шарт бажарилади. Шунинг учун (3.16) ифодадан нур синдириш кўрсаткичининг табиий ёруғликда қайтиш

коэффициентини ўлчаш билан аниқлаш мумкин. Кристалларда ёруғлик тўлқин узунлигининг кучсиз ютилиш соҳасида R ёки R_p/R_s -нинг тушиш бурчагига боғланиш графигидан Брюстер бурчаги, яъни $R_p, R_p/R_s$ -лар минимумга эришадиган бурчак аниқланади. Брюстер бурчаги (φ_B) нур синдириш кўрсаткичи орқали ҳисобланади:

$$n = \operatorname{tg} \varphi_B \quad (3.17)$$

Агар намунада ютилиш содир бўлмаса, нур синдириш кўрсаткичини ясси параллель сиртли пластина кўринишида бўлган намунанинг шаффофлигига қараб ҳам аниқлаш мумкин. Ҳавода турган пластина кўринишидаги намуна ичида ёруғликнинг қайта-қайта (кўп марта) қайтиши содир бўлса (интерференцияни ва ютилишни ҳисобга олмаганда), унинг шаффофлик (ёруғликнинг намунадан ўтиши) коэффициенти қуйидаги кўринишни олади.

$$T_v = \frac{1 - R_v}{1 + R_v} = \frac{2n}{n^2 + 1} \quad (3.18)$$

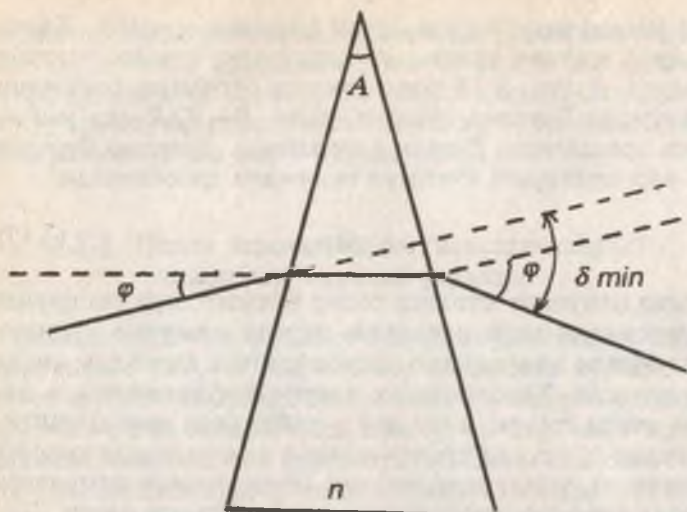
Шундай қилиб, намуна шаффофлигини билган ҳолда нур синдириш кўрсаткичи қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$n = \frac{1 - \sqrt{R_v}}{1 + \sqrt{R_v}} = \frac{1 - [(1 - T_v)/(1 + T_v)]^{1/2}}{1 + [(1 - T_v)/(1 + T_v)]^{1/2}} \quad (3.19)$$

Бу ҳолда тўла қайтиш коэффициенти

$$R_v + T_v = 1 \quad (3.20)$$

ифода билан аниқланади. Бу ерда ҳам энергиянинг сақланиш қонуни бажарилади. Намунанинг юқори шаффофлик (тиниклик) соҳасидаги нур синдириш кўрсаткичини аниқлашда катта аниқлик билан ўлчайдиган призма усулидан фойдаланиш мумкин. Бунинг учун текширилаётган намунадан синдириш бурчаги A бўлган призма ясалади (3.2-расм). Тўлқин узунлиги λ бўлган монохроматик ёруғликнинг параллел оқими (дастаси) призмадан ўтган-



3.2-расм. Ёруғликнинг кичик бурчакка четланиши (оғиши) ҳолида призма орқали нур йули.

дан сўнг δ — бурчакка оғади, бунда нурнинг синиш бурчаги нурнинг призмадан чиқишидаги синиш бурчагига тенг бўлганда, n -ни ўлчашда энг катта аниқликка эришилади:

$$\varphi_{\text{кириш}} = \varphi_{\text{чиқиш}} = \varphi$$

Бу ҳолда δ — бурчак энг кичик бўлади. Шунинг учун призма усули одатда кичик бурилиш (оғиш) усули деб юритилади. Нур синдириш кўрсаткичи қуйидаги тенглама билан топилади:

$$n = \frac{\sin \left(\frac{A + \delta_{\min}}{2} \right)}{\sin (A/2)} \quad (3.21)$$

Текширишлар бу усул билан яримўтказгичларда нур синдириш кўрсаткичининг 0,01% аниқлик билан ўлчаш мумкинлигини кўрсатди.

Ютилиш кўрсаткичи (χ) ни ёки ютилиш коэффициентини (α) ни $n^2 \gg \chi^2$ бўлганда пластинка шаклидаги намуналарнинг шаффофлик коэффициентини ўлчаш билан аниқлаш мумкин,

$$T_v = \frac{(1 - R_v)^2 [1 + i\alpha/4\pi n]}{(\exp(\beta) - R_v \exp(-\beta))^2 + 4R \sin^2(\delta + \psi)} \quad (3.22)$$

бу ерда: $\beta = \frac{\alpha d}{2}$ (d — намуна қалинлиги, α — ютилиш коэффициенти), δ — намунадан ёруғлик бир марта ўтганидаги фаза ўзгариши (фаза силжиши)

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd \cos \varphi$$

билан ифодаланади (φ — плёнкада нурнинг синиш бурчаги), ψ — намунадаги ёруғликнинг $\vec{E}$ ва $\vec{H}$ векторлари орасидаги фазавий бурчаги бўлиб,

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\chi}{n^2 + \chi^2 - 1} \quad (3.23)$$

билан аниқланади. Агар интерференция кузатилмаса (намуна сиртидаги нуқсонлар туфайли ёки ёруғлик тўлқин узунлигининг катта бўлиши туфайли), T , R ни α — орасидаги боғланишлари соддалашади ва

$$T_v = \frac{(1 - R)^2 [1 + (\lambda \cdot \alpha/4\pi n)^2]}{\exp(\alpha d) - R^2 \exp(-\alpha d)} \quad (3.23a)$$

бўлади. $n^2 \gg \chi^2$ бўлганда, яъни $\frac{\alpha \lambda}{4\pi n} \ll 1$ да шаффофлик коэффициентининг $(1 - R)/(1 + R)$ дан 10% гача бўлган ўзгариш соҳасида шаффофлик коэффициенти қуйидаги тенгламадан аниқланади:

$$T_v = \frac{(1 - R_v)2e^{-\alpha d}}{1 - R_v^2 e^{-2\alpha d}} \quad (3.23b)$$

Таъкидлаш керакки, бу соддалашган тенглама билан α ни аниқлаш учун катта ҳисоб қилиш талаб қилинади. Шунинг учун одатда α ни аниқлашда ҳар хил R ларга мос келган номограммалардан фойдаланилади. Шаффофлик коэффиценти $n^2 \gg \chi^2$ бўлганда ($T < 10\%$ бўлса) $1 \gg R^2 e^{-2\alpha d}$ бўлади ва (3.226) дан ютилиш коэффиценти қуйидагича аниқланади:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1 - R_v)^2}{T_v} \right] \quad (3.24)$$

Агар синдириш кўрсаткичлари бир биридан фарқ қилса, плёнка (парда) тагликдан иборат структурани плёнкада ютилишини аниқлаш учун плёнка ҳаво ва плёнка таглик, таглик билан ҳаво чегараларидаги ёруғликнинг қайтишини ҳисобга олиш керак. Агар тагликда кучсиз ютилиш содир бўлса, юпқа қатламда ютилиш коэффиценти қуйидагича ҳисобланади:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1 - R_{v1})(1 - R_{v2})(1 - R_{v12})}{T_v} \right] \quad (3.25)$$

Бу ерда: R_{v12} , R_{v2} , R_{v1} плёнка-таглик, таглик-ҳаво, плёнка-ҳаво чегараларидаги қайтиш коэффицентлари. Тажрибадан яримўтказгичларда ютилиш коэффицентини қайтиш ва шаффофлик коэффицентлари натижалари бўйича аниқлаш учун қуйидаги босқичлардан ўтилади. Дастлаб намунанинг сиртига сайқал берилади, унинг қалинлиги $\alpha d \gg 1$ шартига жавоб беради. Бу билан намунанинг остки сиртидан ёруғликнинг қайтиши таъсири йўқотилади ва мумкин бўлган тўлқин узунлиги соҳасида турли температурада ва бошқа ташқи таъсирлар остида R_v ўлчанади, бу ёруғликнинг сиртдан бир қарра (марта) қайтиши коэффицентини беради. Сўнгра намунанинг қалинлиги камайтирилади: $\alpha d < 1$ ёки $(1 - R_v)/(1 + R_v) > T_v > 10\%$ шаффофлик соҳасида ёруғликнинг ўтиш интенсивлигини текширилади соҳада аниқ ўлчаш мумкин бўлсин. Бу ҳолда T ни ўлчаш имкони вужудга келади. Ютилиш коэффицентини шаффофлик коэффиценти қиймати бўйича аниқ-

лашда $T > 10\%$ бўлганда (3.226) ва $T < 10\%$ бўлганда (3.25) тенгламадан фойдаланилади. Ютилиш коэффициентини аниқлашда фақат шаффофлик коэффициентини ўлчаш билан ҳам чегараланиш мумкин, бунинг учун қалинлик-лари d_1 ва d_2 бўлган бир хил кристаллдан намуналар тайёрланади, уларнинг қалинлиги шундай бўлиши керакки ($\alpha d_2 > 1$ ва $\alpha d_1 > 1$ бўлиб), шаффофлик коэффициентлари T_{v1} ва T_{v2} 10% бўлсин, у ҳолда текширилаётган намуна-нинг ютилиш коэффициенти

$$\alpha = \frac{1}{d_2 - d_1} \ln \frac{T_{v1}}{T_{v2}} = \frac{1}{d_2 - d_1} \ln \frac{I_{v1}}{I_{v2}} \quad (3.26)$$

билан ҳисобланади. Бу ерда I_{v1} ва I_{v2} мос равишда қалинли-ги d_1 ва d_2 бўлган намуналардан ўтган ёруғлик интенсивли-гидир. Агар тадқиқотчи ихтиёридаги намуна кичик бўлса, уни қалинлигини юпқалаштириш билан ўлчаш мумкин.

Ютилиш коэффициенти α ни ҳисоблаш тенгламаси (3.25) нинг таҳлили $T < 10\%$ ва $R = 35\%$ бўлганда, шаффоф-ликнинг 10^3 марта ўзгариши ютилиш коэффициентининг фақат 6 марта ўзгаришига олиб келади. Демак α нинг қий-матини катта ораликда ўлчаш учун битта материалдан ясал-ган ҳар хил қалинликдаги намуналар тўплами бўлиши ке-рак. Масалан, яримўтказгичларда ёруғликнинг хусусий ютилиш чегарасида ютилиш коэффициенти (α) 10^2 дан то 10^4 см^{-1} гача ўзгаради. Қалинлиги d — бўлган ҳар бир на-муна учун ютилиш коэффициентининг максимуми $\alpha_{\max}$ шаффофлик минимуми қиймати бўйича аниқланади. $\alpha_{\min}$ тажрибада α ни аниқлашда кузатиладиган энг катта хато-ликка эришиш билан баҳоланади. Ютилиш коэффициен-тини ўлчашнинг нисбий $\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ хатолиги (3.26) учун

$$\delta\alpha = \delta d + \left(\frac{2R_v}{1 - R_v} \delta R_v + \delta T_v \right) \left[\ln \frac{(1 - R_v)^2}{T_v} \right]^{-1} \quad (3.27)$$

билан аниқланади. Агар α ни уни ташкил этувчилари-нинг хатоликлари йиғиндисидан ($\delta R + \delta d + \delta T$) катта бўлма-ган хатолик билан ўлчанади деб фараз қилинса, у ҳолда $R = 35\%$ бўлганда

$$\alpha_{\min} \approx \frac{1}{d} \quad (3.28)$$

ифода ўринли бўлади ва у шаффофлик коэффициентини $T=16\%$ бўлгандаги қийматига мос келади. Ютилиш коэффициентининг $\alpha < 1/d$ соҳасида α ни аниқлашдаги хатолик $\alpha_{\min}$ ни аниқлашдаги хатоликдан катта бўлади. Шундай қилиб, текширилаётган соҳада ютилиш коэффициенти $\alpha = 10^{-1} \text{ см}^{-1}$ дан $\alpha = 10^4 \text{ см}^{-1}$ гача ўзгарса, камида икки хил d_1 ва d_2 қалинликдаги намуна олиниши керак. ($d_2 > d_1$). d_1 қалинликни топиш учун (3.26) тенгламага ютилиш коэффициенти юқори чегараси 10^4 см^{-1} , R , ва T -нинг минимум қийматлари қўйилиб ҳисобланади. Масалан, 10^4 см^{-1} , $T_{\min} = 0,01\%$ ва $R = 35\%$ бўлганда, $d_1 = 8,3 \text{ мкм}$ эканлиги кўринади. d_2 — қалинлик эса қуйидаги (3.29) тенглама билан топилади:

$$d_2 = \frac{1}{\alpha_{\min}} = \frac{1}{10 \text{ см}^{-1}} = 1 \text{ мм}. \quad (3.29)$$

Қалинлиги $d_2 = 1 \text{ мм}$ бўлган намунада ютилиш коэффициентини 10 дан 84 см^{-1} гача, қалинлиги $d_1 = 8,3 \text{ мкм}$ намунада 240 дан 10^4 см^{-1} гача текшириш мумкин. Ютилиш коэффициентини $84 \div 240 \text{ см}^{-1}$ ораликда текшириш учун қалинлиги $d_3 = 200 \text{ мкм}$ бўлган учинчи намуна зарур (керак). Бу намуна билан $\alpha_{\min} = 50 \text{ см}^{-1}$ дан $\alpha_{\max} = 415 \text{ см}^{-1}$ гача ўлчаш мумкинки, кичик ютилиш коэффициентларини ўлчашда ютилиш коэффициентини аниқлашдаги хатоликнинг минимум бўлиш шарти $\alpha d = 1$ дан ёруғликнинг тарқалиш йўналишида намуна қалинлиги катта бўлишлигини талаб этади. Жуда кичик ютилиш коэффициентларини $\alpha < 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ ўлчаш учун махсус усуллар яратилган.

3.3-§. Заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчашнинг оптик усуллари

Яримўтказгичларда ёруғликнинг эркин заряд ташувчиларда ютилиши хусусий ютилишнинг қизил чегарасидан катта бўлган тўлқин узунлиги соҳаси ($\lambda > \lambda_g$ ёки $h\nu > E_g$) да айниқса муҳим ўрин тутати. Эркин заряд ташувчилар-

да ёруғлик ютилиш механизмининг классик назариясида эркин заряд ташувчиларнинг ёруғлик (электромагнит) тўлқинининг электр майдонида олган кинетик энергиясига яримўтказгич намунасидаги ҳар хил нуқсонлар (кристалл панжара даврийлигининг бузилиши) билан ўзаро таъсирлашганда (сочирилишида) иссиқликка айланиши деб қаралади. Квант механикаси нуқтаи назаридан кристалл панжаранинг даврий майдонида ҳаракатланаётган эркин электронлар импульснинг сақланиш қонунига кўра, ёруғликни ютмаслиги керак. Лекин кристалл панжаранинг тебраниши ёруғликнинг эркин электронда ютилишини вужудга келтиради. Оптик константаларнинг ёруғлик тўлқин узунлигига боғланиши аналитик ифодасини оптик константалар дисперсиясининг классик назарияси ёрдамида олиниши мумкин. Бу назарияга кўра қаттиқ жисм чизиқли осцилляторлар тўпламидан иборат деб ва электромагнит тўлқинларининг электр майдонида электроннинг ҳаракат тенгламаси ечими қаралади,

$$m\ddot{x} + m\omega_0^2 x + \frac{m}{\tau} \dot{x} = -eE_0 e^{i\omega t} \quad (3.30)$$

Бу тенгламанинг биринчи ҳади Ньютон кучини, иккинчи ҳади мувозанат ҳолатидан силжиган x масофага пропорционал бўлган (қайтарувчи) эластик кучини, учинчи ҳади тормозловчи кучни, яъни заряд ташувчилар тезлигига пропорционал бўлган ишқаланиш кучини, ўнг томонидаги ҳади электронга электр майдонининг таъсир кучини тавсифлайди. Шундай қилиб, ўтказувчан зонадаги электронларнинг эффектив массаси m_n га тенг бўлган эркин электрон деб қаралади, шунинг учун (3.30) тенгламадаги қайтарувчи кучни нолга тенглаштириб ва m массасини электрон эффектив массаси билан алмаштириб,

$$m_n \ddot{x} + \frac{m_n}{\tau} \dot{x} = -eE_0 e^{i\omega t} \quad (3.31)$$

электромагнит тўлқинининг электр майдонидаги эркин электрон ҳаракат тенгламасини оламиз. Электр майдон таъсирида электроннинг гармоник тебранма ҳаракати содир бўлади. Шу билан бирга бу тебранишнинг комплекс амплитудаси (3.31) тенгламага кўра қуйидагича бўлади:

$$x_0 = -\frac{e\vec{E}_{v0}}{m_n} \cdot \frac{1}{\left(\omega^2 + \frac{\omega}{\tau}i\right)} \quad (3.32)$$

Бунда ҳосил бўлган қутбланиш вектори

$$\vec{P}_{vx} = eN\vec{x}_0 \quad (3.33)$$

бўлишлигини эътиборга олиб, электр майдон индукция-сининг ифодасидан

$$\vec{D}_v = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}_v = \epsilon_0 \vec{E}_v + \vec{P}_v, \quad (3.34)$$

комплекс диэлектрик сингдирувчанликнинг аниқланиши-ни қўрамиз.

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \cdot i = 1 + \frac{\vec{P}_{vx}}{\epsilon_0 \vec{E}} \quad (3.35)$$

Зоналараро ўтишларни ϵ га қўшган ҳиссаси ҳисобга олинганда, хусусий ютилиш чегараси билан бўйлама оптик тебранишлар частотаси оралигида $\omega_\xi > \omega > \omega_\omega$ диэлектрик сингдирувчанлик (3.35) тенглама

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty \left[1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\tau^{-1})} \right] \quad (3.36)$$

билан аниқланади. Бундан унинг ҳақиқий ва мавҳум қисм-лари қуйидаги кўринишни олади:

$$\epsilon_1(\omega) = n^2 - \chi^2 = \epsilon_\infty \left[\frac{1 - \omega_p^2 \tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \right] \quad (3.37)$$

$$\epsilon_2(\omega) = 2n\chi = \frac{\epsilon_\infty \omega_p^2}{\omega} \left[\frac{\tau}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \right] \quad (3.38)$$

Бу ерда $\omega^2 = eN\varepsilon_\infty m_n$ — эффектив массаси m_n , концентрацияси N бўлган эркин заряд ташувчиларнинг плазмавий частотаси. (3.37) ва (3.38) ифодаларнинг релаксация вақти τ га боғлиқ ($\omega^2\tau^2 + 1$) кўпайтмаларида энергия бўйича ўрталаштириш ҳисобга олинмаган. Агар τ энергияга боғлиқ бўлса, ε_1 ва ε_2 лар электронларнинг кристалларда сочилиш механизмига боғлиқ бўлади. (3.37) ва (3.38) ларда электромагнит тўлқинларнинг кристалл панжара билан таъсирланиши ҳам ҳисобга олинмаган. Бу таъсирлашишда кимёвий боғланишнинг улуши кичик, заряд ташувчилар концентрацияси катта бўлган яримўтказгичларда унчалик муҳим эмас. Ёруғликнинг хусусий ютилиш чегарасининг частотаси билан кристалл панжаранинг бўйлама оптик тебранишлар частотаси оралиғида тоза кристаллар учун юқори частотали диэлектрик сингдирувчанлик частотага боғлиқ бўлмайди, доимий ε_∞ га тенг бўлади. Бу частота оралиғида ҳаракатчанлиги катта бўлган яримўтказгичлар учун

$$\omega^2\tau^2 \gg 1$$

шарт бажарилиши мумкин. n -тип германий учун релаксация вақти тахминан 10^{-13} секундни ташкил этади. Ёруғликнинг тўлқин узунлиги $\lambda = 20$ мкм бўлганда, $\omega^2\tau^2 \approx 400$ га тенг бўлади. $\omega^2\tau^2 \gg 1$ шарт бажарилганда (3.37) ва (3.38) ифодалар

$$\varepsilon_1 = n^2 - \chi^2 = \varepsilon_\infty \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \quad (3.39)$$

$$\varepsilon_2 = 2n\alpha = \varepsilon_\infty \omega_p^2 / \tau \omega^3 \quad (3.40)$$

кўринишни оладилар.

Ёруғликни эркин заряд ташувчиларда ютилиш коэффициенти α (3.10) ва (3.40) ларга кўра

$$\alpha \approx \frac{\varepsilon_\infty \omega_p^2}{n \cdot c \cdot \omega^2} < \frac{1}{\tau} > \sim \chi^2 < \frac{1}{\tau} > \quad (3.41)$$

ифода билан аниқланади. Ютилиш коэффициенти заряд ташувчиларнинг сочилиш механизмига, яъни $<1/\tau>$ нинг

ўртача қийматига боғлиқ бўлиб, ёруғлик тўлқин узунлигининг квадратиغا пропорционалдир. Ўтказувчанликка ҳар хил типдаги заряд ташувчилар қатнашса, улардаги ютилишлар қўшилади. Паст частоталарда ($\omega^2\tau^2 \ll 1$) ютилиш коэффициенти:

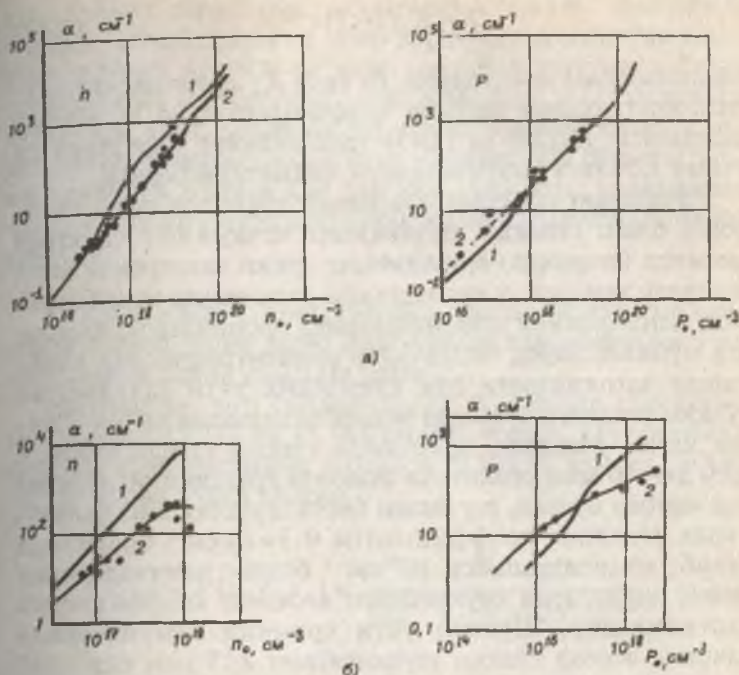
$$\alpha \approx Ne^2\tau/m_n^*c \cdot n\varepsilon_0 \sim \sigma_0 \quad (3.42)$$

у частотага боғлиқ бўлмайдиган ва доимий электр майдонда кристаллнинг солиштирама ўтказувчанлигига пропорционал бўлган катталиқ.

Релаксация вақтининг энергияга боғлиқлиги даражали функция кўринишида бўлганида (3.38) ни сочилиш механизмига боғлиқ бўлган γ коэффициентга кўпайтирилади. Сочилиш кристалл панжара тебранишида содир бўлса, $\gamma = 1,13$ га, ионлашган киришма атомда содир бўлса, $\gamma = 3,4$ га тенг бўлади. Эркин электронларда ёруғлик ютилишининг квант назариясига кўра ютилиш коэффициенти тўлқин узунлигига боғлиқлиги $\alpha \sim \lambda^n$ кўринишда ва даража (n) 2 дан фарқли бўлиб, сочилиш механизмига қараб, 1 дан 4 гача ўзгаради. Кўпгина яримўтказгич материалларда тажрибадан олинган ютилиш коэффициенти тўлқин узунлигига боғлиқлиги мураккаб кўринишга эга.

а) Заряд ташувчилар концентрациясини ёруғликнинг ютилиши бўйича аниқлаш

Тажрибада ютилиш коэффициенти бўйича, заряд ташувчилар концентрациясини аниқлашда, ютилиш коэффициенти уларнинг концентрациясига боғлиқлиги асос қилиб олинган. Ютилиш коэффициенти тажрибада аниқланган ёруғликнинг намунадан ўтиш ва қайтиш коэффициентлари бўйича ҳисоблаб, заряд ташувчилар концентрациясини аниқлаш мумкин. Лекин тажрибада аниқланган ва назария бўйича ҳисобланган натижалар бири-биридан фарқлангани учун одатда олдиндан тажрибада олинган $\alpha = f(N)$ градиуровка (даражалаш) графигидан фойдаланиб топилади. Бунинг учун заряд ташувчилар концентрацияси маълум бўлган бир қанча намуналарда ютилиш коэффициентининг концентрацияга боғлиқлиги аниқланади. Ютилиш коэффициентининг концентра-



3.3-расм. n , p — типдаги кремний намуналарда ёруғликнинг ютилиш коэффициенти α ни заряд ташувчилар концентрациясига назарий (1-чизик) тажриба йўли билан (— — чизик) боғланиш.
 a — ёруғликнинг тўлқин узунлиги 40 мкм бўлган хол учун.

цияга назарий боғланиши, $\alpha = f(N)$ тажриба натижалари билан мос тушмаслиги эркин заряд ташувчиларда ёруғлик ютилишининг назарий модели етарлича яхши ишланмаганлигидан далолат беради. Бир қанча ҳолларда тажриба ва назария натижалари қисқа тўлқин узунлиги оралиғида мос тушади. Масалан, p , n -тип кремнийларда инфрақизил соҳанинг қисқа тўлқин узунлиги қисмида $\alpha(N)$ нинг назарий ва амалий қийматлари бир-бирига мос тушади, узун тўлқин узунлик қисмида эса, кучли фарқ кузатилади (3.3-расм).

Тажрибада ёруғликни намунадан ўтиш (шаффофлик) коэффициенти орқали $T > 0,1$ да қиймати ютилиш коэффициенти (2.236) ва қайтиш коэффициенти

$$R = R_0(1 - T)e^{-ad} \quad (3.43)$$

ифодаларидан аниқланади. Бу ерда R_0 яримчексиз намунада ёруғликнинг қайтиш коэффиценти, d — намуна қалинлиги. (3.236) ва (3.43) тенгламанинг биргаликдаги ечими ютилиш коэффиценти қийматини беради.

Ўлчашнинг спектрал оралиғини танлашда шуни эътиборга олиш керакки, оралиқнинг маълум бир спектрал қисмида (соҳасида) ёруғликнинг эркин электронда ютилишидан ташқари, у яна киришма атомларида ҳамда кристалл панжаранинг тебранишларида (фононларда) ютилиши мумкин. Заряд ташувчилар концентрациясини аниқлашда хатоликларга йўл қўймаслик учун ўлчанаётган тўлқин узунлиги соҳасида бошқа ютилишлар кичик бўлиши керак. Масалан, кремнийда тўлқин узунлигининг 6 мкм дан 40 мкм оралиғида фононда ёруғликнинг ютилиши намоён бўлади, шу билан бирга, ёруғликнинг фононларда ютилиш коэффиценти $0,3 \div 10 \text{ см}^{-1}$ оралиғида бўлиб, концентрацияси 10^{18} см^{-3} бўлган намуналарнинг эркин зарядларда ёруғликнинг ютилиш коэффиценти тартибидадир. Шунинг учун кремний намуналарида ўлчовни асосан тўлқин узунлигининг $\lambda < 5 \text{ мкм}$ ёки $\lambda > 40 \text{ мкм}$ бўлган соҳаларида ўтказилиши мақсадга мувофиқдир. Бунда қисқа тўлқин узунлик соҳасидан фойдаланиб стандарт ўлчов асбобларини қўллаган маъқулдир. Тажрибани заряд ташувчилар концентрацияси кичик бўлган намуналарда ўтказиш мақсадга мувофиқдир. Чунки ютилиш коэффиценти тўлқин узунлигининг ортиши билан ортиб боради. Бунда ўлчанаётган заряд ташувчилар концентрациясини қўйи чегараси 10^{15} см^{-3} гача камаяди (ўлчаш техникаси 40 мкм да қийинлашади). Яримўтказгич параметрларини ўлчашда ёруғлик манбаи сифатида лазер нурларининг қўлланиши катта имкониятлар яратади. Бунда ёруғликни тўлқин узунлиги тартибида бўлган кичик диаметрли юзага тўплаш (ёруғлик зондини олиш) ва намуналарнинг кичик соҳасини текшириш мумкин.

Лазер нурлари интенсивлигининг катта бўлиши ўлчов асбоблари ҳамда усулнинг сезгирлигини оширади, намунани тор ва кенг қилиб, лазер нурлари билан ёритиш мумкин. Лазерларни ёруғлик манбаи сифатида ишлатилишининг ютуғи шундан иборатки, инфрақизил интрос-

копларнинг характеристикаларини яхшилаш имконини беради. Ҳаракатланувчи лазер нурларига асосланган микроскопларни яратиш ва улар ёрдамида текшириладиган намуналарда бир жинсли эмасиликнинг тақсимланиши тўғрисида аниқ маълумотлар олиш мумкин ҳамда концентрация, ҳаракатчанликнинг нафақат юза бўйича, балки қалинлик бўйича ҳам ҳар хил кўндаланг кесимларда тақсимланиши тўғрисидаги миқдорий натижаларни олиш мумкин.

б) Ёруғликнинг плазма резонанси соҳасида намунадан қайтиши бўйича эркин заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини аниқлаш усули

Намунанинг нур синдириш (n) ва ютилиш кўрсаткич (χ) ларини (3.37) ва (3.38) лардан топиб, ёруғликнинг қайтиш коэффициенти ифодаси (3.15) га қўйсак, ЭХМ да ҳисоблаш қулай бўлган

$$R(\omega) = R(a, b, \epsilon_{\infty}) = \frac{(G^{-1}F - \epsilon_{\infty}^{-1/2})^2 + a^2 F^{-2} G^{-2}}{(FG^{-1} + \epsilon_{\infty}^{-1/2}) + a^2 F^{-2} G^{-2}} \quad (3.44)$$

қайтиш коэффициентининг спектрал боғланишдаги аналитик ифодаси олинади. Бу ерда:

$$F(a, b) = \left[[a^2(b^2 - 1) + 1]b + \{[a^2(b^2 - 1) - 1]^2 b^2 + a^2\}^{1/2} \right]^{1/2}$$

$$G(a, b) = [2b(a^2 b^2 + 1)]^{1/2} \quad (3.45)$$

$$a = \omega_p \cdot \langle \tau \rangle; \quad b = \omega / \omega_p$$

бўлади. Шундай белгилаш билан оптик константаларнинг дисперсион муносабатлари қуйидаги тенгламалар билан ифодаланади:

$$\epsilon_1(\omega) = n^2 - \chi^2 = \epsilon_{\infty} \left(1 - \frac{a^2}{a^2 b^2 + 1} \right) \quad (3.46)$$

$$\varepsilon_2(\omega) = 2n\chi = \frac{\varepsilon_\infty \cdot a}{b(a^2b^2 + 1)} \quad (3.47)$$

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon_\infty} G^{-1}(a, b) F(a, b) \quad (3.48)$$

$$\chi(\omega) = \sqrt{\varepsilon_\infty} F^{-1}(a, b) G^{-1}(a, b) \quad (3.49)$$

Булар ёрдамида яримўтказгичлар параметрларини аниқлашда плазманинг тебраниш частотаси

$$\omega_p^2 = e^2 N / \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \cdot m_n^* \quad \text{ёки} \quad \lambda_p = \frac{2\pi c}{\omega_p} \quad (3.50)$$

ва ўлчамсиз $a = \omega_p \langle \tau \rangle$ катталики асосий параметрлардан ҳисобланади. Уларни билган ҳолда яримўтказгич хоссаларини тавсифловчи катталиклардан электр ўтказувчанликнинг частотага боғлиқлигини, ўзгармас ток учун солиштирма ўтказувчанлик (σ_0), релаксация вақти $\langle \tau \rangle$ ни аниқлаш мумкин.

$$\sigma(\omega) = \frac{c \varepsilon_\infty a}{2\lambda_p (a^2 b^2 + 1)}; \quad \sigma_0 = \frac{c \varepsilon_\infty a}{2\lambda_p}; \quad \langle \tau \rangle = \frac{a \lambda_p}{2\pi c} \quad (3.51)$$

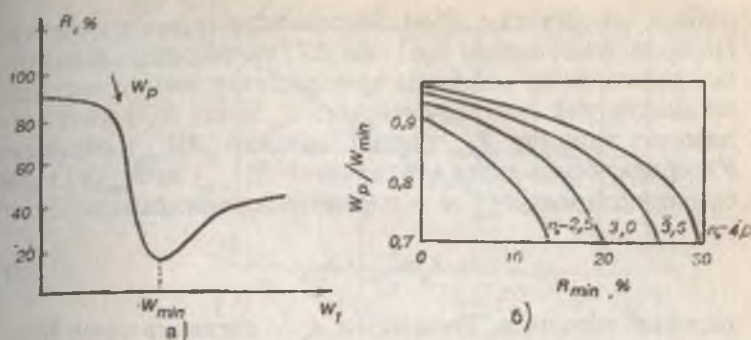
Эркин заряд ташувчилар концентрациясининг эффектив массасига нисбати қуйидаги

$$\frac{N}{m_n} = \frac{\pi c^2 \varepsilon_\infty}{e^2 \lambda_p} \quad (3.52)$$

тенглама ёрдамида ҳисоблаб топилади. Демак, $R(\lambda)$ орқали намуна параметрларини аниқлашнинг биринчи босқичида λ_p ва a — параметрлар аниқланади. Бунинг учун ЭХМ да берилган

$$\varepsilon_\infty \{5(\text{CdS}), 8,5(\text{GaAs}), 10,5(\text{GaP}), 11,7(\text{Si}) 16(\text{Ge})\}$$

a -ни 0 дан 25 гача, b -ни 0,5 дан 2,5 гача бўлган оралиқдаги қийматларида қайтиш коэффициентининг спектри



3.4-расм. Яримўтказгичли намунада концентрациянинг маълум қийматида қайтиш спектри (а), плазма частотанинг қайтиш коэффициентининг минимал қийматига боғланиши (б).

ҳисобланади. Кремний учун ($\epsilon_{\infty}=11,7$) $R(\omega)$ ни ҳисоблаш натижалари 3.4а-расмда келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, частота ортиши билан ютилиш коэффициенти маълум бир частота (ω_p) дан бошлаб кескин камаяди, ω_p -га яқин соҳада минимумга эришади, сўнг оҳиста ортиб боради.

Ёруғликнинг плазма частотаси $\omega=\omega_p$ да намуналарда ютилиш ҳодисаси плазма-резонанс деб юритилади. Плазма-резонанс спектри бўйича яримўтказгичлар параметрини аниқлашнинг бир қанча усуллари яратилган. $R(\omega)$ дан маълумки, плазма-резонанс қисқа тўлқин узунлик соҳасида ($\lambda < \lambda_{\min}$) ва $b > 1$ да b қанча катта бўлса, қайтиш коэффициенти a -параметр шунча кам таъсир қилади, у қайтиш спектрининг $b=1$ соҳасида сезиларли таъсир кўрсатади. Параметр a нинг камайиши билан заряд ташувчилар концентрацияси ва қайтиш коэффициенти минимумдаги қиймати $R_{\min} \sim m_p/4N$ ортиб боради, минимуми қисқа тўлқин узунлик соҳасига силжийди, минимуми ёйилиб, камроқ аниқлик билан (аниқланади) намоён бўлади. Демак, плазма-резонанс минимумининг спектрал ҳолати заряд ташувчилар концентрациясига боғлиқ. Берилган ϵ_{∞} учун ёруғликнинг қайтиш спектри бўйича $R_{\min}=f(b_{\min})$ ва $R_{\min}=f(a)$ лар ҳисобланади (3.4б-расм). Кейинги босқичда назарий ҳисобланган $R(\omega)$ спектри таж-

рибада аниқланган $R(\omega)$ боғланишга солиштирилади. Назарий ҳисобланган $R(\omega)$ ёки $R(\lambda)$ ни танлашда бошланғич параметрлар сифатида кристаллнинг юқори частотали диэлектрик сингдирувчанлиги ϵ_∞ ҳамда $R(\lambda)$ нинг минимумга эришган $\lambda_{\min}$ тўлқин узунлиги $R(\lambda_{\min})$ олинади. Юқоридаги расмларда келтирилган $R(b_{\min})$ ва $R_{\min}(a)$ каби боғланишлардан $b_{\min}$ ва a параметрлар аниқланади, сўнг

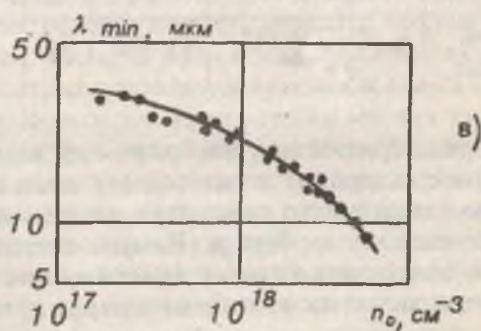
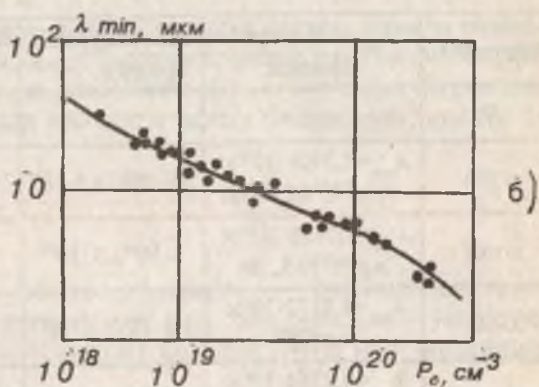
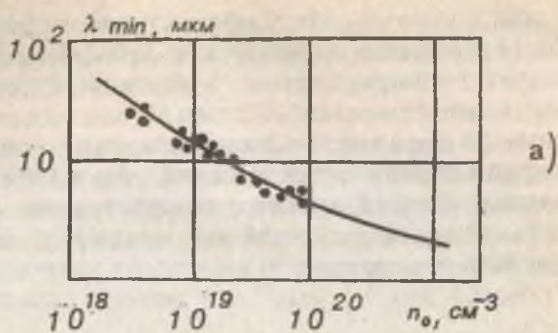
$$\lambda_p = \lambda_{\min} \cdot b_{\min} \quad (3.53)$$

ҳисоблаб топилади. Топилган a , λ_p — параметрларни билган ҳолда, σ_0 , $\langle \tau \rangle$, N/m_n — аниқланади. Шунинг таъкидлаш керакки, $R(\lambda)$ ни ҳисоблашга кирган, тажрибадан аниқланадиган катталиклар, $R_{\min}$, $\lambda_{\min}$ кристаллнинг ҳажмий хоссаларидан ташқари, уларнинг сирт ишловига ҳам боғлиқ. Текширишларнинг кўрсатишича, яримўтказгич сиртига механик ишлов беришда, яъни силлиқлашда сирт қатлами деформацияланади. Механик сайқал бериш яъни силлиқлаш ва ялтиратиш билан бу деформацияни йўқотиш мумкин эмас.

Қайтиш коэффиценти спектрининг худди ўзидай такорланишига фақат сирт қатламини кимёвий едириш ва сайқал бериш орқали эришилади. Одатда амалиётда заряд ташувчилар концентрациясини ўлчашда концентрацияси маълум бўлган намуналар асосида аниқланган $N(\lambda_{\min})$ боғланишдан, яъни плазма-резонанснинг калибровка (даражалаш) чизигидан фойдаланиб топилади (3.5-расм). 3.1-жадвалда кремний ва $GaAs$ яримўтказгичлари эмперик боғланишларининг аналитик ифодаси келтирилган.

Заряд ташувчилар концентрацияси N ни плазма-резонанс усули билан аниқлашнинг ҳатолиги $\lambda_{\min}$ ни ўлчаш аниқлигига ва калибровка чизигининг $R(\lambda_{\min})$ оралиқ ҳатолигига боғлиқ. $\lambda_{\min}$ ни ўлчашнинг мунтазам ҳатоликларининг ташкил этувчилари спектрал асбоблар тўлқин узунлиги бўйича градуировка ҳатолигидан ва қайтиш спектри минимумининг кескинлиги билан боғлиқ бўлган тасодикий ҳатоликлардан иборат.

Заряд ташувчилар концентрациясининг камайиши билан плазма-резонанс минимумининг кенглиги ўсади,



3.5-расм. $\lambda_{\min}$ ни заряд ташувчилар концентрациясига боғланиши:
 а) *n*-типдаги кремний учун, б) *p*-типдаги кремний учун,
 в) *n*-типдаги GaAs учун.

шунинг учун $\lambda_{\min}$ ни ўлчашдаги тасодифий хатолик ва концентрацияни аниқлашдаги хатоликлар ортади. Статистик текширишларнинг кўрсатишича, заряд ташувчилар концентрацияси 10^{20} дан 10^{18} см⁻³ гача камайганда, ишонч оралиғи 0,95 бўлган аниқликда ўлчашнинг тасодифий хатолиги *n*-тип кремний учун $\pm 10\%$ дан 50% гача ортади. Галлий арсенид концентрациясини 10^{19} дан 10^{17} см⁻³ ораликда ўлчашнинг тасодифий хатолиги $\pm 10\%$ дан 80% гача ортади.

3.1-жадвал

Материал	$\lambda_{\min}$ — эмперик ифодаси	концентрация оралиғи, см ⁻³	Аппроксимация хатолиги %
<i>Si</i>			
<i>n</i> -тип	$\lambda_{\min} = 3,2908 \cdot 10^{11} \times$ $\times n^{-0,5451} + 1,8153$	$1,5 \cdot 10^{18} \dots 1,5 \cdot 10^{21}$	2,4
<i>p</i> -тип	$\lambda_{\min} = 1,2125 \cdot 10^{15} \times$ $\times p^{-0,7370} + 3,184$	$3 \cdot 10^{18} \dots 1 \cdot 10^{20}$	0,8
<i>GaAs</i>	$\lambda_{\min} = 8,4172 \cdot 10^2 \times$ $\times n^{-0,08125}$	$1,5 \cdot 10^{17} \dots 6 \cdot 10^{17}$	0,5
<i>n</i> -тип	$\lambda_{\min} = 4,1584 \cdot 10^7 \times$ $\times n^{-0,3451}$	$6 \cdot 10^{17} \dots 2,5 \cdot 10^{18}$	—
галлий арсенид	$\lambda_{\min} = 1,7231 \cdot 10^{10} \times$ $\times n^{-0,4875}$	$2,5 \cdot 10^{18} \dots 1 \cdot 10^{19}$	—

Юқорида ёритилган усул билан бир жинсли, кўпқатламли намуналарнинг электрофизик хоссаларини аниқлаш заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчашга имкон беради. Намуна сиртининг алоҳида олинган соҳаларида ўлчов ўтказиш мумкин, шунингдек уларни ҳар хил технологик мақсадларда қўллаш мумкин.

в) Заряд ташувчилар концентрациясини Фарадей эффекти билан ўлчаш усули

Ясси (чизиқли) қутбланган ёруғлик доимий магнит майдонига жойлаштирилган намунадан майдон йўнали-

ши бўйича ўтганида унинг қутбланиш текислигининг бурилиши Фарадей эффекти ва бурилиш бурчагини Фарадей бурчаги φ_F деб аталади.

Оптика курсидан маълумки, ясси қутбланган ёруғликнинг электр майдон қучланганликлари соат мили бўйича (ўнг) ва унга тескари йўналишда айланувчи (чап) айланма қутбланган икки тўлқин суперпозиция (йигинди)сидан иборат деб қараш мумкин. Магнит майдонида муҳитнинг нур синдириш кўрсаткичи бу тўлқинлар учун икки хил (n_+ , n_-) бўлади, шунинг учун улар ҳар хил фазовий тезликлар $V_+ = \frac{c}{n_+}$, $V_- = \frac{c}{n_-}$ билан тарқалади ва натижада

улар орасида фаза фарқи θ вужудга келади, бунинг оқибатида ясси чизиқли қутбланган ёруғлик намунадан чиққан чоғида қутбланиш текислиги φ_F — бурчакка бурилади. Бурилиш бурчаги қуйидаги ифода билан аниқланади.

$$\varphi_F = \frac{\theta}{2} = \frac{\pi l(n_- - n_+)}{\lambda} = \frac{\omega l}{2c}(n_- - n_+) \quad (3.54)$$

Бу ерда: l — намуна узунлиги, λ — ёруғликнинг вакуумдаги тўлқин узунлиги, n_+ ва n_- мос равишда — ўнг ҳамда чап айланма қутбланган ёруғлик учун нур синдириш кўрсаткичлари.

Борди-ю, Фарадей эффекти эркин заряд ташувчилар билан боғланган бўлса, уларнинг ҳаракати нуқтаи назаридан қараганда, Фарадей эффектини Холл эффекти деб қараш мумкин: заряд ташувчилар ёруғлик тўлқини электр майдон қучланганлиги таъсирида ташқи магнит майдонга тик йўналишда ҳаракатланади. Борди-ю, заряд ташувчилар ўзгармас магнит майдонга нисбатан қандайдир бурчак билан ҳаракатланса, уларнинг траекторияси магнит майдон йўналишида спирал кўринишда бўлади.

Заряд ташувчилар айланма частотасининг циклатрон резонанс частота ω_c деб юритилади. Циклатрон частота заряд ташувчиларнинг эффектив массаси ва магнит майдон индукциясига боғлиқ бўлиб, электрон учун $\omega_c = eB/m_e$, кавак учун эса $\omega_c = eB/m_p$ билан аниқланади.

Фарадей бурчаги ишораси электрон ва кавак учун ҳар хил бўлиб, у ёруғликнинг доимий магнит майдон индук-

цияси векторига нисбатан қандай йўналишда тарқалишига боғлиқ. Агар магнит майдон индукцияси бўйича тарқалаётган ёруғликнинг қутбланиш текислиги соат мили бўйича бурилса, Фарадей бурчаги мусбат деб ҳисобланади. Кучсиз магнит майдонида $\mu^2 B^2 \ll 1$ ва $\omega^2 \tau^2 \gg 1$, $n_- + n_+ = 2\bar{n}$ шартлар бажарилганда, Фарадей бурчагининг (3.54) ифодаси n — тип намуналар учун

$$\varphi_F = \frac{e^2 \lambda^2 B \cdot l \cdot N}{2\pi^2 c^3 \epsilon_0 m_e \bar{n}} \quad (3.55)$$

кўринишни олади. Бу ерда $\bar{n}$ — магнит майдон индукцияси йўқ ($B=0$) бўлгандаги нур синдириш кўрсаткичи. (3.55) тенгламадан кўринадик, эркин заряд ташувчилар вужудга келтирган қутбланиш текислигининг бурилиш бурчаги заряд ташувчилар концентрацияси N га, ёруғлик тўлқин узунлигининг квадрати λ^2 га, намуна узунлиги l га, магнит майдон индукцияси B га пропорционал бўлиб, сочилиш механизмига боғлиқ эмас. Агар ўлчов ёруғликнинг инфрақизил тўлқин узунлиги соҳасида ўтказилса, релаксация вақтини чегараловчи $\omega^2 \tau^2 \gg 1$ шарт бажарилади намунада тарқалаётган ёруғлик намуна ичида қайта-қайта қайтиши сабабли унинг оптик йўли узаяди ва Фарадей бурчагининг φ_F ортишига олиб келади. Бунда Фарадей бурчаги φ_F нинг намуна ичида ёруғликнинг қайта-қайта қайтишидан содир бўлган φ_F' бурчак орқали боғланиши қуйидаги ифода билан аниқланади.

$$\varphi_F = \varphi_F' [1 + 2R^2 \exp(-\alpha d) \cos 4\varphi_F']^{-1} \quad (3.56)$$

(3.55) тенгламадан кўриниб турибдики, агар намунада нур синдириш кўрсаткичи, заряд ташувчилар концентрацияси маълум бўлса, заряд ташувчиларнинг эффектив массасини аниқлаш мумкин ёки эффектив массаси маълум бўлса, заряд ташувчилар концентрациясини топиш мумкин.

Заряд ташувчилар эффектив массасини аниқлаш усули сифатида Фарадей айланишининг қўлланишини чекловчи бир қанча омиллари мавжуд. Масалан, анизотроп массали намуналарда ўлчанаётган эффектив масса ўрта-

ча қийматни беради. Кўп яримўтказгичларда валент зонаси экстремуми айниган бўлиши p -тип яримўтказгич материалларида ўлчов натижаларини изоҳлашни мураккаб-лаштиради.

Агарда заряд ташувчиларнинг эффектив массаси заряд ташувчилар концентрациясига боғлиқ бўлса, заряд ташувчилар концентрацияси m^* — ўзгармас соҳасида Фарадей бурчагини ўлчаш билан топилади. Масалан, GaAs да эффектив массанинг концентрацияга боғлиқлигини $N < 10^{18} \text{ см}^{-3}$ да инобатга олмаслик мумкин.

$\omega^2 \tau^2 \ll 1$ соҳада ҳам Фарадей эффектидан заряд ташувчилар концентрациясини аниқлаш мумкин. Фарадей эффекти билан намуналарда заряд ташувчиларнинг нотекис тарқалишига боғлиқ бир жинсда эмаслиликнинг тақсимотини ўрганишда юпқа намуна сиртининг кичик соҳаси ясси қутбланган нур билан (маҳаллий) кетма-кет ёритилади. Ясси чизиқли қутбланган ёруғлик намуна билан ёруғлик манбаи орасига поляризаторни жойлаштириш билан олинади. Поляризатор сифатида кўпинча Николь призмаси қўлланилади. Фарадей бурчагини ўлчаш учун намуна билан фотоқабулқилгич орасига поляризатор (Николь призмаси) жойлаштирилади ва у анализатор деб номланади. Бурилиш бурчаги φ_F анализаторни фотоқабулқилгичда энг катта сигналга эришгунча айлантириб топилади.

Спектрнинг инфрақизил соҳасида $\lambda \approx 2 \text{ мкм}$ да Фарадей бурчагини ўлчашда (3.55) ифодани қўллаш шарти магнит майдонининг индукция вектори $\vec{B} \approx 1 \text{ Тл}$ бўлганда бажарилади, чунки концентрацияси $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ бўлган галлий арсенид намунаси учун қалинлиги $l = 1 \text{ мм}$, $\lambda = 10 \text{ мкм}$, $B = 1 \text{ Тл}$ бўлганда, магнитооптик бурилиш бурчаги $\varphi_F = 0,1^\circ$ бўлади. φ_F -ни ўлчашнинг аниқлигини ошириш учун у магнитнинг икки йўналишида ўлчанади ва

$$\sin 2\varphi_F = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) \quad (3.57)$$

билан аниқланади. Бу ерда I_1 ва I_2 — фотоқабулқилгичда олинган энг катта ва энг кичик ёруғликнинг интенсивлигига пропорционал бўлган электр сигналдир.

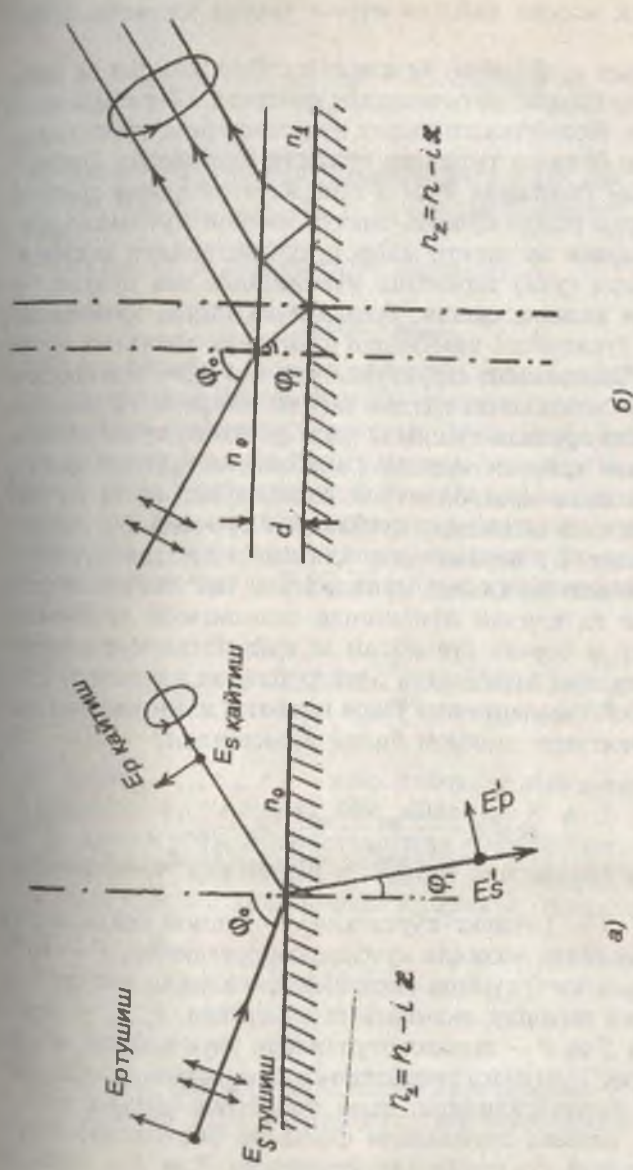
Эркин заряд ташувчилар билан боғланган Фарадей эффектидан ташқари, зоналараро Фарадей эффекти ҳам

содир бўлиши мумкин. Фотоннинг энергияси таққиланган зона кенглигига яқин соҳасида қутбланиш текислигининг бурилиши бу икки эффект билан пайдо бўлади. Заряд ташувчилар концентрацияси кичик бўлган намуналарда ва тўлқин узунлиги кичик бўлган соҳада зоналарро Фарадей эффектини ҳисобга оладиган тузатиш коэффициентини киритиш керак бўлади. Бунинг учун Фарадей бурчаги φ_F нинг қиймати юқори Омли намуналарда ўтказилади. Фарадей эффектини ўлчашда эластик механик кучланишлар хатолик манбалари сифатида хизмат қилади. Бу нурнинг иккиг ажралиш синиш ҳодисасига олиб келади, бунинг оқибатида намунага тушаётган ясси қутбланган тўлқин намунадан ўтганда, эллиптик қутбланиди. Фарадей эффекти кўп материалларда ўлчанган ва бошқа усуллар натижалари билан солиштирилган. Бу эффект ёрдамида n — тип индий антимолидда ўтказувчан зонанинг параболик эмаслигини тасдиқловчи, электрон эффектив массасининг заряд ташувчилар концентрацияси ва намуна температураси билан ўсувчи функция бўлишлиги кўрсатилган. Яримўтказгич намуналарнинг биржинслиликка тез миқдорий ва сифатий жиҳатдан текшириш натижаларини телевизор экранида қайд қиладиган, Фарадей эффектига асосланган автоматик қурилмалар яратилган.

3.4 §. Эллипсометрия усули

Усулнинг моҳияти.

Охириги йилларда илмий-тадқиқот институтларида ҳозирги замон микроэлектроника саноатида бир жинсли ва бир жинсли бўлмаган материалларнинг (диффузион, эпитаксиал қатламли структуралар) параметрларини контактсиз ўлчаш, назорат қилиш усулларида бири бўлган эллипсометрия усули кенг қўлланилмоқда. Эллипсометрия усули қутбланган ёруғликни, текширилаётган намуна билан ўзаро таъсирлашиши туфайли, ундан қайтганда қутбланиш ҳолатининг ўзгаришини аниқлашга асосланган. Чизикли қутбланган ёруғликнинг намунадан қайтгандаги қутбланиш ҳолатининг ўзгариши таъсирлашаётган намунанинг ҳажмий хусусиятларига, сиртнинг хосса-



3.6-реш. Эпитаксиал қатламсиз (а), эпитаксиал қатламли (б), яримўтказгич намуна сиртидан қайтган чизиқли қўбланган ёрузликнинг (нурнинг) йўли.

си ва структурасига боғлиқ. Ҳозирги замон эллипсо-метрия усули асосан қайтган нурни таҳлил қилишга асосланган.

Чизиқли қутбланган ёруғликнинг бир жинсли ва эпитаксиал қатламли намуналардан қайтиши 3.6-расмда келтирилган. Яримўтказгичларда нур синдириш кўрсаткичи комплекс бўлиши туфайли, чизиқли қутбланган ёруғлик намунадан қайтганда P ва S ташкил этувчилари орасида фаза фарқи пайдо бўлади, электр майдон кучланганликлари ўзгаради ва электр майдон кучланганлиги векторининг охири (учи) тарқалиш йўналишига тик бўлган текисликда эллипс чизади, бошқача айтганда, қутбланган ёруғлик ўтказувчан намунадан қайтганда эллиптик қутбланади. Эпитаксиал структураларда эса ҳаво эпитаксиал қатлам ва эпитаксиал қатлам тағлик чегараларидан қайтган нурлар орасида қўшимча фаза фарқи вужудга келади. Намунадан қайтган эллиптик қутбланган ёруғлик ҳолати одатда иккита эллипсометрик параметрлар (ψ ва Δ) билан, бошқача айтганда, қутбланиш бурчаклари орқали аниқланади. Бу параметрлар қайтган эллиптик қутбланган нурнинг тарқалиш йўналишига тик текисликдаги шаклини ва қандай йўналишда эканлигини кўрсатади. Параметр ψ бурчак тушаётган ва қайтаётган нурларнинг P ва S ташкил этувчилари электр майдон кучланганликлари амплитудаларининг ўзаро нисбати, яъни қайтиш коэффициентлари нисбати билан аниқланади:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{(E'_{P_{\text{кал}}}/E'_{P_{\text{кал}}})}{(E_{P_{\text{туш}}}/E_{S_{\text{туш}}})} = \frac{|r_P|}{|r_S|} \quad (3.58)$$

бу ерда: S — (индекс-кўрсаткич) — тушиш текислигига тик текисликда чизиқли қутбланган ёруғликни, P — (индекс-кўрсаткич) тушиш текислигида чизиқли қутбланган ёруғликка тегишли эканлигини кўрсатади. r_P , r_S — ёруғликнинг S ва P — ташкил этувчилари учун қайтиш коэффициенти. Намунага тушаётган ёруғлик чизиқли қутбланган деб фараз қилинади, яъни тушаётган ёруғликнинг P ва S — ташкил этувчилари фазалари бир-бирига тўғри (мос) келади. Ўз навбатида, ёруғликни P ва S — ташкил этувчиларининг (3.58) ифодадаги комплекс қайтиш ко-

эффицентлари нисбати қуйидагича ифодаланиши мумкин.

$$\frac{r_P}{r_S} = \frac{|r_P|}{|r_S|} e^{i(\delta_P - \delta_S)} = e^{i\delta} \operatorname{tg} \psi \quad (3.59)$$

бу эллипсометриянинг асосий тенгламасидир. r_P нинг r_S га нисбати $n_2, \chi_2, n_1, d_1, \lambda, \varphi_1$ параметрларнинг функцияси.

Иккинчи эллипсометрик параметр Δ

$$\Delta = \delta_{\text{Poyatlash}} - \delta_{\text{Saytlash}} = \delta_P - \delta_S \quad (3.60)$$

га тенг бўлиб, у намуна сиртидан ёруғликнинг қайтиши сабабли пайдо бўлган P ва S — ташқил этувчилари орасидаги фаза фарқини кўрсатади. Модомики ёруғликнинг поляризация ҳолати фақат иккита параметр билан аниқланар экан, битта тушиш бурчагига (φ_0) мос келган билан ўлчашдан ҳам иккита параметрни аниқлаш мумкин. Қалинлиги d_1 бўлган эпитаксиал плёнкали гомоэпитаксиал структуралар учун (3.59) тенглама қуйидаги кўринишни олади.

$$\operatorname{tg} \psi e^{i\delta} = \frac{r_{1P} + r_{2P} e^{-2\delta i}}{1 + r_{1P} \cdot r_{2P} e^{-2\delta i}} = \frac{1 + r_{1S} \cdot r_{2S} e^{-2\delta}}{r_{1S} + r_{2S} e^{-2\delta i}} \quad (3.61)$$

Бу ерда $r_{1P}, r_{1S}, r_{2P}, r_{2S}$ — ҳаво-плёнка, плёнка-таглик чегараларидан ёруғликнинг мос равишда P ва S — ташқил этувчилари учун Френель қайтиш коэффициентлари, δ — ёруғликнинг қалинлиги d_1 бўлган эпитаксиал қатламдан ўтишда вужудга келган фаза ўзгариши (градусларда):

$$\delta = \left(300 \frac{d_1}{\lambda} \right) (n_1^2 - \sin^2 \varphi_0)^{1/2} \quad (3.62)$$

Маълумки, чизиқли қутбланган ёруғликнинг P ва S компоненталари учун диэлектрик сингдирувчанликлари

$$\sqrt{\varepsilon_1} = n_1 - i\chi_1 \quad \text{ва} \quad \sqrt{\varepsilon_2} = n_2 - i\chi_2$$

бўлган икки ўтказувчан муҳит чегарасидан Френель қай-
тиш коэффициентлари

$$r_{01S} = \frac{\sqrt{\varepsilon_0} \cos \varphi_0 - \sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_1}{\sqrt{\varepsilon_0} \cos \varphi_0 + \sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_1}, \quad r_{01P} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_0 - \sqrt{\varepsilon_0} \cos \varphi_1}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_0 + \sqrt{\varepsilon_0} \cos \varphi_1}$$

$$r_{12S} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_2}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_2}, \quad r_{12P} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_2}{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi_2}$$

ифодалар билан аниқланади. Бу ерда φ_0 — ёруғликнинг тушиш бурчаги, φ_1 — эпитаксиал қатламдаги синиш бурчаги, φ_2 — тагликдаги синиш бурчаги.

$$\cos \varphi_1 = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} \sin^2 \varphi_0}; \quad \cos \varphi_2 = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_2} \sin^2 \varphi_0}$$

Модомики, r_{12S} , r_{12P} ва $e^{-2\delta}$ — комплекс катталиклар (r_{1S} , r_{1P} — ҳақиқий катталиклар (чунки $\chi_1=0$) экан, (3.61) ифода ҳам комплекс бўлади. Ҳақиқий ва мавҳум қисмларини ажратиб, ψ ва Δ ларнинг оптик константалари n_2 , χ_2 — бўлган тагликка ўтказилган эпитаксиал қатлам қалинлигига боғланишини аниқлаш мумкин, яъни:

$$\operatorname{tg} \psi = \sqrt{\Phi_1^2 + \Phi_2^2}; \quad \operatorname{tg} \Delta = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \quad (3.63)$$

Φ_1 ва Φ_2 лар эллипсометрия асосий тенгламасининг ҳақиқий ва мавҳум қисмларидир:

$$\Phi_1 = \Phi_2(n_0, \lambda_1, \varphi_0, d_1, n_1, n_2, \chi_1, \chi_2)$$

$$\Phi_2 = \Phi_2(n_0, \lambda, \varphi_0, d_1, n_1, n_2, \chi_1, \chi_2)$$

Бурчаклар (ψ ва Δ) ни ўлчаб, (3.63) тенгламаларни бирга ечиб қайтган тизимида исталган иккита ноаниқ параметр-ни аниқлаш мумкин. Демак, эллипсометриянинг амалий масалалари nn^+ , pp^+ эпитаксиал структураларда эпитаксиал қатлам қалинлиги ҳамда тагликдаги заряд ташувчи-

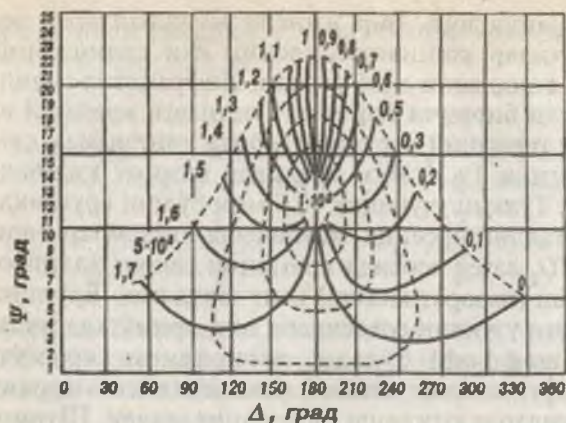
лар концентрациясини, бир жинсли материалларда эса заряд ташувчилар концентрациясини ёки солиштирма қаршиликни аниқлашга олиб келади. Инфрақизил эллипсометрия усули биринчи марта nn^+ типдаги кремний ва pp^+ типдаги германий структураларида эпитаксиал қатлам қалинлигини $1 \div 10$ мкм оралиқда назорат қилишда ўлланган. Тўлқин узунлиги 10,6 мкм бўлган ёруғликда кремний ва галлий арсенид эпитаксиал қатламларининг қалинлиги CO_2 лазер асосида яратилган саноат эллипсометрида ўлчаш (назорат қилиш) кенг тарқалган. Ёруғликнинг бу тўлқин узунлик соҳасидаги тоза яримўтказгичлари тиниқ (шаффоф) бўлади, легирланган яримўтказгичларда ёруғликнинг ютилиш механизми асосан эркин заряд ташувчиларда ютилиши билан аниқланади. Шунинг учун ёруғликнинг инфрақизил соҳасида микроэлектроникада кенг тарқалган nn^+ , pp^+ кремний, галлий арсенид типдаги ва бошқа материалларнинг гомоэпитаксиал структураларини шаффоф (тиниқ), эпитаксиал қатлам, ёруғликни ютувчи тагликдан иборат структура деб қараш мумкин. Яримўтказгичлар оптик константалари дисперсиясининг классик назариясига мувофиқ

$$n_2^2 - \chi_2^2 = \varepsilon_\infty - \frac{4\pi\rho}{1 + 4\pi^2 c^2 \tau^2 \lambda^{-2}} \quad (3.64)$$

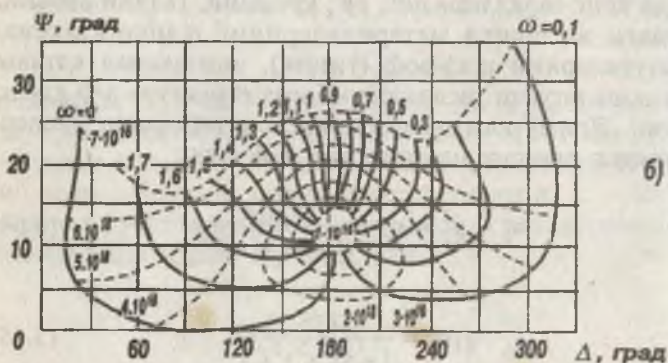
$$\chi_2 n_2 = \frac{\lambda/\rho}{1 + 4\pi^2 c^2 \tau^2 \lambda^{-2}} \quad (3.65)$$

ифодалар олинган. Бу ерда, n_2 — тагликнинг нур синдириш кўрсаткичи, χ_2 — экстенция коэффициенти, ε_∞ — кристалл панжара диэлектрик сингдирувчанлиги, τ — релаксация вақти, ρ — солиштирма қаршилик.

Яримўтказгичларнинг оптик константалари заряд ташувчилар концентрацияси, релаксация вақти орқали (3.63) ва (3.64) муносабатлар билан боғланган. Солиштирма ўтказувчанлик ва релаксация вақти, ҳар хил заряд ташувчилар концентрацияси учун, Ирвин $\rho = f(N)$ диаграммасидан топилди. Эпитаксиал қатламнинг қалинлиги ва таглик концентрациясининг керакли соҳасида эллипсометрик параметрлар (ψ ва Δ) ЭХМ да ҳисобланади ва ҳисоблаш



а)



б)

3.7-расм. Эпитаксиал қатлам-таглик чегараси кескин бўлган $np+$ -типдаги GaAs эпитаксиал структуранинг қалинлиги $d=0,3$ мкм бўлган чизикли оралиқ ўтиш қатлами ҳисобга олинган ҳол учун, $\varphi-\Delta$ номограммаси (а), $np+$ -тип GaAs структурали тагликдаги электронлар концентрацияси ва эпитаксиал қатлам қалинлигини аниқлаш $\varphi-\Delta$ номограммаси (б).

натижалари ва Δ координатларида номограмма кўринишида келтирилади. ψ ва Δ лар қалинликнинг даврий функцияси бўлгани учун, берилган заряд ташувчилар концентрациясида ψ (ΔN_2 , d_1) боғланиш ёпиқ эгри чизикдан иборат бўлади. Тажрибада ўлчанган ҳар бир жуфт ψ ва Δ параметрлар номограммаларида тагликни қандайдир за-

ряд ташувчилар концентрациясига, эпитаксиал қатлам қалинлигига мос келган даврий эгри чизиқда ётган нуқта тўғри келади. 3.7-расмда эпитаксиал қатлам-таглик чегараси кескин бўлган np^+ типдаги $GaAs$ эпитаксиал структурасининг номограммаси келтирилган. Қўп ҳолларда эпитаксиал структуралар юқори температураларда олинади, бунинг натижасида диффузия, автолегирилаш жараёнлари содир бўлиб, чегаранинг кескинлик шарти бузилади ва эпитаксиал қатлам-таглик чегарасида оралиқ ўтиш қатлами пайдо бўлади. Текширишларнинг кўрсатишича, агар киришма атомларининг қалинлик бўйича тақсимооти маълум бўлса (масалан, чизиқли), бу оралиқ ўтиш қатламининг таъсирини ψ - Δ номограммани ҳисоблашда эътиборга олиш мумкин. Бунда эллипсометрия тенгламасига қўшимча параметр d_0 — оралиқ ўтиш қатлам қалинлиги киритилади. Бу параметр маълум бўлса, масалан, тагликда заряд ташувчилар концентрацияси маълум бўлса, у ҳолда эллипсометрик ўлчовлар эпитаксиал ва оралиқ ўтиш қатламлар қалинликларини аниқлашга имкон беради. Агар оралиқ ўтиш қатлами қалинлиги технологик жиҳатдан тақдорланувчан катталиқ бўлса, у вақтда уни эллипсометрик номограммани ҳисоблашда эътиборга олиш мумкин. 3.7а-расмда қалинлиги $d_0=0,3$ мкм бўлган чегаравий оралиқ ўтиш қатламининг ҳисобга олинган эллипсометрик номограммаси келтирилган.

Қутбланиш бурчаклари ψ ва Δ ни тажрибада аниқлаш

Чизиқли қутбланган ёруғликни таҳлил қилиш, яъни эллипсометрия параметрларини аниқлаш қурилмаси қуйидаги асосий қисмлардан иборат бўлади: ёруғлик манбаи, поляризатор, анализатор, чорак тўлқин узунлик пластина (компенсатор) фотоқайдқилгич, модулятор, кучайтиргич. Лазерларнинг интенсивлиги спектрофотометр ёруғлик манбаларига нисбатан катта бўлгани учун, сўнгги йилларда улар эллипсометрларда ёруғлик манбаи сифатида ишлатилмоқда. Саноатда улар асосида ҳар хил тўлқин узунлик соҳасида ишлайдиган эллипсометрлар, эллипсометрик микроскоплар (УИТ—ТЭС, ЭИ—09, ИТ—1, 7—0031; ЛЭМ—2, ЛЭМ—3, ЛЭФ—3М ва бошқалар) ишлаб чиқарилади.

Табиий ёруғликдан чизиқли қутбланган ёруғлик олишда поляризатор қўлланилади, анализатор поляризатор каби

ишлайди ва компенсатордан ўтган қутбланган ёруғликни таҳлил қилишга хизмат қилади. Фақат чизиқли поляризатор ва анализатор орқали қисман қутбланган ёруғликни эллиптик қутбланган ёруғликдан ажратиб бўлмайди, чунки анализаторни оптик ўқ атрофида айлантирганда, икки ҳолда ҳам ёруғликнинг интенсивлиги ўзгаради, интенсивликнинг максимум қийматини минимумга нисбати бир хил бўлиши мумкин. Бу нисбат айлана бўйлаб қутбланган ёруғлик учун ҳам, табиий ёруғлик учун ҳам бирга тенг бўлади. Буларни бир-биридан ажратиш (фарқлаш) учун эллиптик қутбланган нур анизатропик кристаллдан ясалган пластина (компенсатор) дан ўтказилиб, унинг ортогонал ташкил этувчилари орасида шундай фаза фарқи ҳосил қилиш мумкинки, бунда эллиптик қутбланган ёруғлик чизиқли қутбланган нурга айлансин. Бу ҳодиса анализаторда кузатилади ва таҳлил қилинади. Компенсатор сифатида икки ўқли кристалларда бош ўқиға параллел қилиб қирқиб олинган кварц, слюда, исланд шпати, CdS — монокристалл пластиналари қўлланилади. Агар компенсатор пластинасиға кираётган чизиқли қутбланган ёруғликнинг электр майдон кучланганлиги вектори кристаллнинг оптик ўқиға нисбатан 45° бурчак остида тушса, у ҳолда оддий ва ғайриоддий нурларнинг интенсивликлари бир хил бўлади. Агар пластина қалинлиги

$$\frac{\pi}{2} = 2\pi d(n_0 - n_H)/\lambda$$

шартни қаноатлантирса, у ҳолда компенсатордан чиққан нур айлана бўйлаб қутбланган ёруғликка айланади. Оддий ва ғайриоддий нурлар орасидаги нурлар $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ га тенг фаза фарқи пайдо қиладиган пластина чорак тўлқин узунлик пластинаси деб юритилади.

Бу ерда, n_0 — оддий нурнинг нур синдириш кўрсаткичи, n_H — ғайриоддий нурнинг нур синдириш кўрсаткичи. Қутбланиш бурчаклари ψ ва Δ ни тажрибадан аниқлаш учун поляризатор ва намуна орасиға уларға нисбатан ўқи 45° бурчак остида чорак тўлқин узунликли пластина жойлаштирилади. У ўлчов давомида ўзгартирилмайди. Бу

ҳолда интенсивликнинг минимумга эришиш ҳолати фотоқабулқилгич ёрдамида кетма-кет анализатор ва поляризаторларни бураб топилади. Одатда минимумни 3—4 марта кетма-кет бураш билан топиш мумкин, бу билан поляризаторни ва анализаторнинг азимут бурилиш бурчаклари аниқланади. Ўлчов одатда ўлчашнинг, яъни, анализатор азимут бурчагининг икки соҳасида бажарилади. Биринчи соҳада анализаторнинг азимут бурчаги $0 < A_1 \leq +90^\circ$ оралиқда ўзгаради. Бу соҳада $\Delta < 180^\circ$ да бўлса, ёруғлик минимуми поляризатор азимут бурчагининг $-45^\circ < P < +45^\circ$ оралиғида, $\Delta > 180^\circ$ бўлганда эса поляризатор азимут бурчаги $45^\circ < P < 135^\circ$ оралиғида кузатилади. Анализатор азимут бурчагининг иккинчи ўзгариш соҳасида $90^\circ < A_2 < 180^\circ$ ёруғлик минимуми поляризатор азимутини $45^\circ < P \leq 135^\circ$ ёки $135^\circ < P_2 < 225^\circ$ оралиғида кузатилади. Бунда ψ ва Δ лар

$$\Delta = P_1 + P_2$$

$$\psi = [A_1 + (180 - A_2)]/2$$

ҳисоблаш формулаларидан аниқланади.

Кейинги йилларда эллипсометрик ўлчашларнинг сезгирлиги жиҳатидан юқори, ўрганиладиган материаллар доирасининг кенгайишига имкон берадиган, автоматлаштириш қулай бўлган бир қанча усуллари яратилган.

ψ ва Δ ларнинг тажрибада аниқланган қийматлари бўйича олдиндан чизилган номограммадан ёки эллипсометрия асосий тенгламаси орқали ҳисоблаб, яримўтказгич намуналар оптик константаларининг электрофизик параметрлари аниқланади.

НОМУВОЗАНАТ ЗАРЯД ТАШУВЧИЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ УЎЛЧАШ УСУЛЛАРИ

4.1-§. Номувозанат заряд ташувчилар параметрлари

Яримўтказгичлар ташқи таъсир остида, яъни ёруғлик, рентген, γ — квантлар, тезлантирилган нейтрал, зарядланган заррачалар ҳамда p — n ўтиш орқали инженерия, электр майдонда зарбдан ионланиш, туннел жараёнлари туфайли номувозанат заряд ташувчиларнинг пайдо бўлиши, генерацияланиши мумкин. Номувозанат заряд ташувчилар яримўтказгич материаллари ва асбобларининг электрофизик, фотоэлектрик хоссаларини аниқлайди. Номувозанат заряд ташувчиларнинг дрейф ҳаракатчанлиги (μ) диффузия коэффициенти (D), диффузион узунлик (L), яшаш вақти (τ), сиртий рекомбинация тезлиги (S) каби параметрлар билан тавсифланади. Бу параметрларни аниқлаш усуллари электрон, кавак узлуксизлик тенгламаларининг баъзи бир соддалаштирувчи фаразлар билан берилган бошланғич, чегаравий шартларни қанотлантирувчи ечимини топишга асосланган. Яримўтказгич намуналарда номувозанат заряд ташувчилар хусусияти (табиати, хатти-ҳаракати) қуйидаги

1. Электрон, кавак ток зичликлари

$$j_n = e\mu_n nE + eD_n \text{grad}n \quad (4.1)$$

$$j_p = e\mu_p pE - eD_p \text{grad}p \quad (4.2)$$

2. Узлуксизлик

$$\frac{\partial n}{\partial z} = g_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{e} \text{div}j_n \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = g_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{e} \text{div}j_p \quad (4.4)$$

тенгламалари системаси ечими билан тавсифланади:
 Бу ерда $n = n_0 + \Delta n$ ва $p = p_0 + \Delta p$ — номувозанат ҳолатдаги заряд ташувчилар (электрон, ковак) тўла концентрацияси n_0 , p_0 — мувозанатдаги заряд ташувчилар электрон, ковак концентрацияси; Δn , Δp — номувозанат заряд ташувчилар электрон, ковакнинг мувозанат ҳолатдагисига нисбатан ортиқча концентрацияси, Δn , Δp — электрон, ковак диффузия коэффициентлари; μ_n , μ_p — электрон, ковак ҳаракатчанликлари; τ_n , τ_p — электрон, ковак яшаш вақтлари; g_n , g_p — электрон, ковакни генерациялаш тезликлари.

Фотоинженция (ёруғлик орқали) номувозанат ҳолатдаги заряд ташувчиларни ҳосил қилганда генерация тезлиги

$$g = \alpha \beta I_0 e^{-\alpha x} (1 - R_0) / h\nu = g_0 e^{-\alpha x}$$

ифода билан топилади. Бу ерда α — ёруғликнинг яримутказгичда ютилиш коэффициенти, R_0 — ёруғликнинг намунадан қайтиш коэффициенти, $h\nu$ — фотон энергияси, β — заряд ташувчиларнинг квант чиқиш коэффициенти I_0 — ёруғлик интенсивлиги. (4.3) ва (4.4) тенгламалардан куринадик, номувозанат ҳолатдаги заряд ташувчилар концентрацияларининг ўзгариш тезликлари $\frac{\partial n}{\partial t}$, $\frac{\partial p}{\partial t}$ ни заряд ташувчиларнинг рекомбинация, генирация, дрейф-диффузия жараёнлари аниқлайди. Заряд ташувчилар концентрацияси фақат бир йўналишда, масалан, x — ўқи бўйича ўзгаради ва электр майдон кучланганлиги E x ўқи бўйича йўналган бўлсин деб олинган ҳол учун, (4.3) ва (4.4) тенгламалар (4.1) ва (4.2) ни назарда тутганда, қуйидаги курилишни олади:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = g_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \mu_p \cdot p \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = g_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + \mu_n \cdot n \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \quad (4.6)$$

Бу ерда $\left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)$ Пуассон тенгламаси

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon} (\Delta p - \Delta n) \quad (4.7)$$

билан ифодаланади. Ҳажмий заряд вужудга келмаганда, яъни намунада электр нейтраллик шарт $\Delta n = \Delta p$ бажарилганда $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$ бўлади. Бу ҳол яхши ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичларда кузатилади. Киришмали яримўтказгичнинг бирор жойида қайси усул билан бўлмасин асосий бўлмаган заряд ташувчилар инжекциялансин. Пайдо бўлган ҳажмий заряд бунда икки усул билан: бу соҳадан асосий бўлмаган заряд ташувчиларни чиқариб ташлаш орқали, ёки ҳажмий зарядни бошқа типдаги заряд орқали, яъни асосий заряд ташувчилар билан компенсацияланиши мумкин. Асосий заряд ташувчиларнинг катта концентрацияларида электр нейтралликни *тиклаш* учун уларнинг қайта тақсимланиши жуда тез, максвелл релаксация вақти

$$\tau_M = \epsilon_0 \epsilon / \sigma \quad (4.8)$$

ичида содир бўлиши керак. ϵ_0 , ϵ — вакуум, яримўтказгичнинг диэлектрик сингдирувчанликлари, τ — яримўтказгичнинг солиштира ўтказувчанлиги.

Амалиётда асосий заряд ташувчиларнинг қайта тақсимланиши ҳеч қандай қийинчилик туғдирмайди. Ноасосий заряд ташувчиларнинг диффузия жараёни ўз харақатчанлигига, диффузия коэффицентига эга бўлган нейтрал заррача каби содир бўлади. Электр майдонида асосий бўлмаган заряд ташувчилар зарядланган заррача каби дрейфланади. Лекин асосий заряд ташувчиларнинг тез қайта тақсимланиши туфайли, ҳажмий заряд ҳосил бўлмайди. Демак, заряд ташувчиларнинг кичик концентрацияларида, икки ишорали заряд ташувчиларнинг фазода қайта тақсимланиши орқали, электронейтралликнинг тикланиши содир бўлади.

$\Delta p = \Delta n$ бўлганда $g_n = g_p$, $\sigma_n = \tau_p$ бўлади. (4.5) ни $\tau_n = e n m_n$ га, (4.6) ни $\sigma_p = e p \mu_p$ га қўпайтириб, ўхшаш ҳадларни қўшиб,

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = g_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} + D \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \mu_E E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \quad (4.9)$$

кўринишда бўлган узлуксизлик тенгламасини оламиз. Кичик электр майдонларида заряд ташувчилар дрейф ҳаракатининг диффузиясига нисбатан ҳисобга олинмаслиги мумкин, шунинг учун (4.9) ни кичик электр майдонда

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = g_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} + D \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} \quad (4.10)$$

кўринишда ифодалаш мумкин. Бу ерда,

$$D = \frac{\sigma_n D_p + \sigma_p D_p}{\sigma_n + \sigma_p} = \frac{n + p}{n/D_p + p/D_n} \quad (4.11)$$

$$\mu_E = \frac{\tau_n \mu_p - \tau_p \mu_n}{\tau_n + \tau_p} = \frac{(n - p)}{(n/\mu_p + p/\mu_n)} \quad (4.12)$$

(4.10) тенглама (4.5) ва (4.6) тенгламаларга тенг кучли бўлиб, электронейтраллик шарти бажарилган шароитда, у заряд ташувчилар табиатини ифодалайди. (4.10) даги D — электрон-кавакнинг диффузиясини аниқлайди ва заряд ташувчиларнинг бикутбий диффузия коэффициенти, (4.12) даги μ_E эса бикутбий дрейф ҳаракатчанлиги деб юригилади.

n -тип киришмали яримўтказгичда $n \gg p$ бўлгани учун (4.11) ва (4.12) лардан

$$D = D_p; \mu_E = \mu_p$$

p -тип киришмали яримўтказгичда $p \gg n$ бўлгани учун

$$D = D_p; \mu_E = -\mu_n$$

ва хусусий яримўтказгичда $p = n$ бўлгани учун

$$D = 2 \frac{D_n D_p}{D_n + D_p}; \mu_E = 0$$

бўлишлигини кўрамиз. Киришмали яримўтказгичларда заряд ташувчиларнинг бикутбий диффузия коэффициен-

ти асосий бўлмаган заряд ташувчилар диффузия коэффициентига тенг бўлишлигини, бикутбий дрейф ҳаракатчанлик абсолют қиймати бўйича асосий бўлмаган заряд ташувчилар ҳаракатчанлигига мос келишини кўрдик. Бундан ташқари, электрон кавак концентрациялари n ва p -ларнинг нисбатига қараб μ_E — ишорасини ўзгартиради: $n=p$ ва $\mu_E=0$ бўлишлигини гувоҳи бўламиз. Агар бикутбий диффузия коэффициенти (4.11)ни Эйнштейн муносабати

$$D = \frac{KT}{e} \mu_D \quad (4.13a)$$

орқали ифодаласак, ҳаракатчанликнинг яна бир ифодасини, яъни заряд ташувчиларнинг бикутбий диффузион ҳаракатчанлик ифодасини оламиз.

$$\mu_D = \frac{n + p}{\frac{p}{\mu_n} + \frac{n}{\mu_p}} \quad (4.136)$$

Киришмали яримўтказгичларда $n \gg p$ ёки $p \gg n$ ўринли бўлганда μ_D қиймати μ_E га тенг бўлиб, унинг ишораси ҳамма вақт мусбат бўлади. Хусусий яримўтказгичларда

$$\mu_D = 2 \frac{\mu_n \mu_p}{\mu_n + \mu_p} \text{ дир.} \quad (4.13b)$$

Узлуксизлик тенгламалари (4.9) нинг баъзи бир содда ҳоллардаги ечимини таҳлил қилайлик.

1. Фараз қилайлик, электр майдон қўйилмаган ($E=0$) ва намунада номувозанатдаги заряд ташувчилар текис $g_n = \alpha \beta I_{0v} (1 - R_v)$ генирациялансин. Намуна эркин сиртларида сиртий рекомбинация содир бўлмасин ($S=0$). Бу ҳолда дрейф, диффузия жараёнлари бўлмайди, шунинг учун (4.9) тенглама

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = g - \frac{\Delta p}{\tau_p} = (1 - R_v) \alpha \cdot \beta I_{0v} - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (4.14)$$

кўринишни олади. Номувозанат заряд ташувчилар концентрациясининг вақт бўйича ўзгаришини фақат генерация ва рекомбинация жараёнлари аниқлайди. Ёпишиш (тутқич) марказлар бўлмаганда генерация тезлиги $g_0 = \alpha \beta I_0 (1 - R_r)$ — га мос $\Delta p_{\text{бош}}$ — бошлангич концентрация тўғри келсин.

Агар $t=0$ да генерация жараёни тўхтатилса, $t>0$ да $g=0$ бўлгандаги (4.14) нинг ечими

$$\Delta p = p(t) - p_0 = \Delta p_{\text{бош}} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) = \alpha \beta I_0 (1 - R_r) \tau_p e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (4.15)$$

бўлади. Текис генерация билан вужудга келган асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрациясининг сўниши ёруғлик интенсивлиги I_0 (уйғотиш даражаси) кичик $\Delta n, \Delta p \ll n_0 + p_0$ ёки жуда катта I_0 да, яъни катта даражали инжекция $\Delta n, \Delta p \gg n_0 + p_0$ бўлганда экспонента қонуни билан содир бўлади. Бундан фойдаланиб, номувозанат заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини аниқлаш мумкин. Бу ердаги τ_p — вақтни яримўтказкичга киритилган ноасосий заряд ташувчилар концентрациясини e — марта камайишига кетган вақт деб қараш мумкин.

2. Стационар ҳол $\frac{d\Delta p}{dt} = 0$ ни кўрайлик. Электр майдо-ни бўлмаганда ва яримчексиз намунанинг x — ўқи бўйича номувозанат заряд ташувчилар нотекис генирацияланиб, ҳажм бўйича $t=0$ да $g_p=0$ деб фараз қилинганда, узлуксизлик тенглама

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0 \quad (4.16)$$

кўринишда бўлади. Бу тенгламанинг

$$p_{x=0} = \Delta p(0) + p_0; \quad p_{x=\infty} = p_0$$

чегара шартларини қаноатлантирувчи ечими

$$\Delta p(x) = p(x) - p_0 = \Delta p(0) \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \quad (4.17)$$

бўлади. Бу ечимдан фойдаланиб, яримўтказгич намуналарида асосий бўлмаган заряд ташувчилар диффузион узунлиги $L = \sqrt{D\tau}$ ни аниқлаш мумкин. L ни асосий бўлмаган заряд ташувчилар диффузияси содир бўлганда улар концентрациясининг e — марта камаядиган масофаси деб қараш мумкин. Тақиқланган зонадаги ёпишиш (тутқич) марказларида ушланган зарядлар, заряд ташувчиларнинг диффузион оқимиға ҳисса қўшмайди. Шунинг учун диффузион узунлик орқали яшаш вақтини аниқлаганда, ёпишиш марказлари номувозанат, асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтига таъсир кўрсатмайди.

3. Стационар, ностационар масалаларни кўришда, баъзи бир ҳолларда, чегаравий шартлар,

$$j_{px} = eD \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad a = \pm S(p - p_0) \Big|_{x=0}, \quad a \quad (4.18)$$

кўринишда берилиши мумкин. Бу ерда, S — ўлчамлиги тезлик бирлиги билан аниқланадиган катталиқ, у сиртий рекомбинация тезлиги деб аталади. Мазкур чегаравий шартнинг маъноси шундан иборатки, у S — тезлик билан сиртга оқиб кираётган заряд ташувчилар оқимини англатади. S нинг энг катта қиймати заряд ташувчилар тезлиги 10^7 см/с нинг тўртдан бирига тенг бўлиб, германий ва кремнийлар учун уй шароитида $2 \cdot 10^6$ см/с тартибида бўлади. Агар намунада ёпишиш маркази мавжуд бўлса, асосий, ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақtlари бир-биридан жуда катта фарқ қилади $\tau_n \neq \tau_p$. Ёпишиш марказларида ушланган заряд ташувчилар концентрацияси ошиқча номувозанат заряд ташувчилар концентрациясидан катта бўлса, асосий заряд ташувчилар яшаш вақти номувозанат асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтидан жуда катта бўлади.

n — тип материалларда $\tau_n \gg \tau_p$, p — типда эса $\tau_p \gg \tau_n$ бўлади. Бу ҳолда битта намуна учун заряд ташувчиларнинг яшаш вақти ўлчаш усуллариға қараб ҳар хил қийматға эға бўлиши мумкин. Текширишлар шуни кўрсатадики, но-

мувозанат заряд ташувчилар концентрациясини, яъни номувозанат ўтказувчанликнинг вақт бўйича сўнишига асосланган ҳамма τ ни ўлчаш усуллари ёпишиш (тутқич) марказларининг ҳолатига, концентрациясига боғлиқ бўлган заряд ташувчилар вақтини беради.

Диффузион узунликни ўлчашга асосланган заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлашнинг ҳамма усуллари яримўтказгич намуналарида ёпишиш (тутқич) марказларини бор ёки йўқ бўлишига, уларнинг ҳолатига боғлиқ бўлмаган асосий заряд ташувчилар яшаш вақтини берадилар. Яримўтказгич намуналарида заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини, диффузион узунлигини аниқлашнинг жуда кўп усуллари мавжуд. У ёки бу усулни қўллаш яримўтказгич материаллари ва асбобларининг ишлашини аниқлайдиган заряд ташувчилар яшаш вақтига қараб танланади. Яримўтказгичларда номувозанат заряд ташувчиларни генерациялаш усулларига қараб, ташувчилар яшаш вақтини, диффузион узунлигини ўлчашнинг стационар, ностационар усуллари тавсия этилган.

3-туркум усуллар сифатида p - n ўтишни қўллашга асосланган усулларни кўрсатиш мумкин. Охирги йилларда ёруғлик интенсивлиги катта бўлган импульсли лазерларнинг яратилиши муносабати билан заряд ташувчилар яшаш вақтини катта Δn , $\Delta p \gg n_0 + p_0$ даражали инжекцияда ўлчаш имкони туғилди. Нурланишли, нурланишсиз рекомбинациялар заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини, диффузион узунлигини аниқловчи жараёнлардир. Бундан ташқари, τ , L намуналарни олиш шароитига, иссиқлик ишловларига ва температурага боғлиқ параметрлардир.

4.2 §. Номувозанат заряд ташувчилар билан инжекцияланган намунанинг ўтказувчанлиги

Узунлиги a , эни b , қалинлиги d тўғри бурчакли параллелепипед шаклида бўлган ва $x=0$ ва $x=a$ даги қундаланг кесимларига Ом контактлари олинган намунанинг номувозанат ўтказувчанлигини таҳлил қиламиз (4.1-расм) x — йўналишда намунадан I — ток ўтказилганда ундаги кучланиш ташуви V бўлсин. Намунада қандайдир усул, ма-

салан, фотоинжекция (ёруғлик) билан ёки инъекцияловчи контакт орқали ток импульси билан номувозанат заряд ташувчилар электрон, кавакни генерациялайлик, уларнинг тақсимооти ихтиёрий бўлиб, концентрациялари Δn , $\Delta p \ll n_0 + p_0$ Ом контактларида эса

$$\Delta n|_{x=0,a} = \Delta p|_{x=0,a} = 0 \quad (4.20)$$

бўлсин. Намунанинг Ом контактларидан икки-уч диффузион узунлик ($2 \div 3$) Z дан катта масофада жойлашган ўрта қисмида заряд ташувчиларнинг инъекцияси содир бўлса, (4.20) шартни амалга ошириш мумкин. Намунадан оқаётган электрон, кавак токлари (4.1), (4.2) нинг x бўйича ташкил этувчилари

$$j_{nx} = e\mu_n(n_0 + \Delta n)(E_{0x} + \Delta E_x) + eD_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \quad (4.21)$$

$$j_{px} = e\mu_p(p_0 + \Delta p)(E_{0x} + \Delta E_x) - eD_p \frac{\partial \Delta p}{\partial x}$$

билан ифодаланади. Бу ердаги ва кейинги учрайдиган “0” белги уларнинг мувозанат ҳолатдаги қийматини билдиради.

(4.19) шарт ўринли бўлганда, (4.21) даги Δn , ΔE_x , Δp , ΔE_x ларни, иккинчи тартибдаги кичик ҳадлар бўлгани учун, инобатга олмаса бўлади. Электрон кавак токлари j_{nx} , j_{px} ни қўшиб, кейин эса бутун намуна ҳажми ($a \cdot b \cdot d$) бўйича интеграллаймиз. Токнинг диффузион ташкил этувчиларининг интегралга қўшган ҳиссаси (4.20) шартига кўра нолга тенг, чунки

$$\int_{abd} \frac{\partial \Delta n}{\partial x} dx dy dz = \int_{abd} \frac{\partial \Delta p}{\partial x} dx dy dz = \int_{bd} (\Delta n(a) - \Delta n(0)) dy dz = 0$$

Ана шундай тенгликни p учун ҳам ёзиш мумкин.

$$V_0 = a \cdot E, \quad \Delta V = \int_0^a \Delta E_x dx, \quad I = \int_{bd} (j_{nx} + j_{px}) dy dz$$

муносабатларни назарда тутсак, намунада номувозанат заряд ташувчилар инъекцияланганда, ундан оқаётган токнинг ўзгариши

$$\Delta I = \frac{e}{a^2} (\mu_p \Delta p + \mu_n \Delta N) V_0 + G_0 \Delta V \quad (4.22a)$$

бўлади. Бунда

$$\begin{aligned} \Delta p &= \int_{abd} \Delta n \, dx dy dz \\ \Delta N &= \int_{abd} \Delta p \, dx dy dz \end{aligned} \quad (4.22b)$$

ΔN , Δp — мос равишда намунадаги номувозанат электрон, кавакларнинг тўла сони,

$$G_0 = \frac{bd}{a} e (\mu_n \cdot n_0 + \mu_p p_0) = \frac{1}{R_0} \quad (4.23)$$

намунанинг мувозанат ҳолатдаги (қоронғудаги) ўтказувчанлиги, мувозанат ҳолатида намунадан оқаётган токни

$$I_0 = V_0 / R_0 = G_0 V_0$$

орқали, намунадан номувозанат ҳолатда (заряд ташувчилар инжекцияланганда) оқаётган токни

$$I = \frac{V}{R} = G \cdot V = (G_0 + \Delta G) V \quad (4.24)$$

формула орқали ифодаласак ҳамда кичик инжекцияда Δn , $\Delta p \gg n_0$, p_0 , яъни $G_0 \gg \Delta G$ бўлишлигини назарда тутсак, заряд ташувчилар инжекцияланган намунадан оқаётган токнинг ўзгариши

$$\Delta I = \Delta G V_0 + G_0 \Delta V \quad (4.25)$$

ифода билан аниқланишини кўрамиз. (4.22) ни (4.25) билан солиштиришдан намунага электрон, кавак инжекцияланганда ўтказувчанликнинг ортиши:

$$\Delta G = \frac{e}{a^2} (\mu_n \Delta N + \mu_p \Delta p) \quad (4.26)$$

салан, фотоинжекция (ёруғлик) билан ёки инъекцияловчи контакт орқали ток импульси билан номувозанат заряд ташувчилар электрон, кавакни генерациялайлик, уларнинг тақсимоти ихтиёрий бўлиб, концентрациялари Δn , $\Delta p \ll n_0 + p_0$ Ом контактларида эса

$$\Delta n /_{x=0,z} = \Delta p /_{x=0,z} = 0 \quad (4.20)$$

бўлсин. Намунанинг Ом контактларидан икки-уч диффузион узунлик (2÷3) Z дан катта масофада жойлашган ўрта қисмида заряд ташувчиларнинг инъекцияси содир бўлса, (4.20) шартни амалга ошириш мумкин. Намунадан оқаётган электрон, кавак токлари (4.1), (4.2) нинг x бўйича ташкил этувчилари

$$j_{nx} = e\mu_n(n_0 + \Delta n)(E_{0x} + \Delta E_x) + eD_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \quad (4.21)$$

$$j_{px} = e\mu_p(p_0 + \Delta p)(E_{0x} + \Delta E_x) - eD_p \frac{\partial \Delta p}{\partial x}$$

билан ифодаланади. Бу ердаги ва кейинги учрайдиган "0" белги уларнинг мувозанат ҳолатдаги қийматини билдиради.

(4.19) шарт ўринли бўлганда, (4.21) даги Δn , ΔE_x , Δp , ΔE_x ларни, иккинчи тартибдаги кичик ҳадлар бўлгани учун, инобатга олмаса бўлади. Электрон кавак токлари j_{nx} , j_{px} ни қўшиб, кейин эса бутун намуна ҳажми ($a \cdot b \cdot d$) бўйича интеграллаймиз. Токнинг диффузион ташкил этувчиларининг интегралга қўшган ҳиссаси (4.20) шартига кўра нолга тенг, чунки

$$\int_{abd} \frac{\partial \Delta n}{\partial x} dx dy dz = \int_{abd} \frac{\partial \Delta p}{\partial x} dx dy dz = \int_{bd} (\Delta n(a) - \Delta n(0)) dy dz = 0$$

Ана шундай тенгликни p учун ҳам ёзиш мумкин.

$$V_0 = a \cdot E, \quad \Delta V = \int_0^a \Delta E_x dx, \quad I = \int_{bd} (j_{nx} + j_{px}) dy dz$$

муносабатларни назарда тутсак, намунада номувозанат заряд ташувчилар инъекцияланганда, ундан оқаётган токнинг ўзгариши

$$\Delta I = \frac{e}{a^2} (\mu_p \Delta p + \mu_n \Delta N) V_0 + G_0 \Delta V \quad (4.22a)$$

бўлади. Бунда

$$\begin{aligned} \Delta p &= \int_{abd} \Delta n \, dx dy dz \\ \Delta N &= \int_{abd} \Delta p \, dx dy dz \end{aligned} \quad (4.226)$$

ΔN , Δp — мос равишда намунадаги номувозанат электрон, кавакларнинг тўла сони,

$$G_0 = \frac{hd}{a} e (\mu_n \cdot n_0 + \mu_p p_0) = \frac{1}{R_0} \quad (4.23)$$

намунанинг мувозанат ҳолатдаги (қоронғудаги) ўтказувчанлиги, мувозанат ҳолатида намунадан оқаётган токни

$$I_0 = V_0 / R_0 = G_0 V_0$$

орқали, намунадан номувозанат ҳолатда (заряд ташувчилар инжекцияланганда) оқаётган токни

$$I = \frac{V}{R} = G \cdot V = (G_0 + \Delta G) V \quad (4.24)$$

формула орқали ифодаласак ҳамда кичик инжекцияда Δn , $\Delta p \gg n_0, p_0$, яъни $G_0 \gg \Delta G$ бўлишлигини назарда тутсак, заряд ташувчилар инжекцияланган намунадан оқаётган токнинг ўзгариши

$$\Delta I = \Delta G V_0 + G_0 \Delta V \quad (4.25)$$

ифода билан аниқланишини кўрамиз. (4.22) ни (4.25) билан солиштиришдан намунага электрон, кавак инжекцияланганда ўтказувчанликнинг ортиши:

$$\Delta G = \frac{e}{a^2} (\mu_n \Delta N + \mu_p \Delta p) \quad (4.26)$$

ифода билан аниқланади. (4.19) ва (4.20) шартлар бажарилганда (4.26) ифода намунада инъекцияланган заряд ташувчиларнинг ҳар қандай тақсимланишида ўринли бўлади. Юқорида кўрдикки, (4.20) шартнинг бажарилиши диффузион токнинг нолга тенг бўлган ҳиссасини таъминлайди. Шунинг учун (4.26) ни

$$\Delta n/x=0=\Delta n/x=a; \quad \Delta p/x=0=\Delta p/x=a \quad (4.27)$$

билан алмаштириш мумкин. Дейлик, (4.21) да электр майдон кучланганлиги шундай катта ва токнинг диффузион ташкил этувчисини ташлаб юбориш мумкин бўлсин, у ҳолда (4.20) ва (4.27) шартлар бажарилиши ёки, бажарилмаслигидан қатъи назар, у (4.25) ифода ўринли бўлади. Ихтиёрий инъекцияланиш даражасида, яъни (4.19) шарт бажариладими, йўқми, (4.26) ифода ўринли бўлиши учун Δn , Δp лар x га боғлиқ бўлмаслиги керак. Бу шартни, масалан, намуна сиртини бир хил интенсивликда ёритиш билан амалга ошириш мумкин. Кучсиз инъекцияда, яъни (4.19) бажарилганда, намуна қаршилиги ΔR нинг ўзгариши

$$\Delta R = R_0 - R = \frac{1}{G_0} - \frac{1}{G_0 + \Delta G} = \frac{\Delta G}{G_0(\Delta G + G_0)} \approx R_0^2 \Delta G \quad (4.28)$$

билан аниқланади, бу ерда R_0 — мувозанатдаги намуна қаршилиги.

4.3 §. Номувозанат заряд ташувчилар параметрларини ўлчашнинг ностационар усуллари

а. Номувозанат заряд ташувчилар параметрларини ўлчаш усули назарияси

Маълумки, заряд ташувчилар генерацияланишининг қандай содир бўлишига, намуна ўлчамларига, сирт ишловига қараб заряд ташувчилар концентрацияси (фотоўтказувчанлик)нинг вақт бўйича ўзгаришини, яъни релаксацияларини аниқловчи рекомбинация, дрейф, диффузия жараёнлари ҳар хил кечади. Шунинг учун 4.1-§ да

келтирилган $\Delta n(x, y, z, t)$ ёки $\Delta G(x, y, z, t)$ ларнинг сўни-
шидан аниқлаш мумкинлиги тўғрисидаги гоёни амали-
ётга татбиқ этиш учун қайд этилган омиллар ва жараён-
ларни $\Delta n(x, y, z, t)$ ва $\Delta G(x, y, z, t)$ релаксацияларига
таъсирини батафсилроқ таҳлил қилайлик. Олдин намуна
тўғри бурчакли ёлғиз (якка) ёки даврий ёруғлик импуль-
си билан ёритилган ҳолни қараб чиқайлик. Фотон энер-
гияси $\hbar\omega \geq E_g$ бўлган ёруғлик импульси давомийлиги ичида
номувозанат заряд ташувчилар намуна ҳажми бўйича те-
кис генерацияланган ва эркин сиртлари шундай ишлов-
дан ўтказилганки, сиртий рекомбинация кичик (бошқача
айтганда, кузатилмасин) деб фараз қиламиз. Бу ҳолда за-
ряд ташувчиларнинг диффузияси вужудга келмайди.

$\Delta n = \Delta p$ да чизиқли рекомбинация $\left(\frac{\Delta p}{\tau_p}\right)$ мавжуд бўлганда,

$\vec{E} = 0$ да узлуксизлик тенгламаси (4.14) кўринишда бўла-
ди. Кичик интенсивликдаги ($\Delta n, \Delta p \ll n_0 + p_0$) амплитудаси
 I_0 , давомийлиги T бўлган тўғри бурчакли ёруғлик им-
пульси билан ёритилганда, импульснинг давомийлиги
оралиғида $0 \leq t = T$ (4.14) нинг ечими

$$\Delta p = \alpha \beta I_0 \tau_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right) (1 - R_p) \quad (4.29)$$

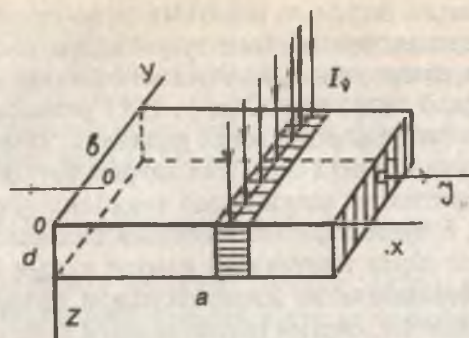
ва импульс тутагандан сўнг $T \leq t$ да

$$\Delta p = \alpha \beta \tau_p I_0 \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_p}}\right) e^{-\frac{t-T}{\tau_p}} \cdot (1 - R_p) \quad (4.30)$$

бўлади. Агар ёруғлик импульсининг давомийлиги заряд
ташувчилар яшаш вақтидан катта ($T > \tau_p$) бўлса, заряд та-
шувчиларнинг концентрацияси стационар

$$\Delta n_{\text{ст}} = \alpha I_0 \beta \tau_p (1 - R_p) \quad (4.31)$$

қийматга эришиб улгуради. Шундай қилиб, кўрилатган
ҳолда заряд ташувчиларнинг концентрацияси ($\Delta n, \Delta p$)
ҳамда уларга пропорционал бўлган фотоўтказувчанлик,
импульс давомийлиги оралиғида



4.1-расм. Яримўтказгич намунанинг модели.

$$\Delta G \sim \Delta p \sim (1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}) \quad (4.32)$$

Импульс тутагандан сўнг

$$\Delta G \sim \Delta p \sim e^{-\frac{t-T}{\tau_p}} \quad (4.33)$$

қонуниятлари бўйича ўзгаради. Энди фотоўтказувчанликнинг сўнишида диффузия, дрейф рекомбинация жараёнлари қатнашадиган мураккаброқ ҳолни кўрайлик. Намуна $X=0$, $X=2A$, $Y=0$, $Y=2B$, $Z=0$, $Z=2C$ дан ўтган текисликлар билан чекланган тўғри бурчакли параллелопипед шаклида бўлсин (4.1-расм). Айтайлик, намуна n — типли яримўтказгич бўлсин, у ҳолда номувозанатий заряд ташувчиларнинг диффузиясини асосий бўлмаган заряд ташувчи, яъни кавак аниқлайди. Заряд ташувчилар текис генерацияланган намунани сиртларида, заряд ташувчиларнинг сиртий рекомбинацияси содир бўлганда, сиртта томон йўналган заряд ташувчилар оқими вужудга келади. Бу билан ҳам бўйича заряд ташувчиларнинг нотекис тақсимланишига ва натижада уларнинг диффузияси содир бўлади. Фараз қилайлик, намунада ёпишиш марказлари йўқ, ёруғлик импульсининг уйғотиш даражаси (интенсивлиги) кичик Δn , $\Delta p \ll n_0 + p_0$ бўлсин. Импульс давомийлиги шундай кичик бўлсинки, унинг туташ вақти-ни вақт ҳисобининг бошланишини ($t=0$) деб қабул қилиш

мумкин бўлсин. $t=0$ да ҳажм бўйича бир хил (текис) тарқалган номувозанат электрон, кавакларнинг диффузия, рекомбинация жараёнлари бошланади. Ўтказувчанликни ўлчаш учун зарур бўлган X — йўналишда электр майдони мавжуд бўлган ҳолда узлуксизлик тенглама (4.4) си, яъни,

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} - \mu E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} + D \operatorname{divgrad} \Delta p(x, y, z, t) \quad (4.34)$$

билан ифодаланади. Узлуксизлик (4.34) тенгламани бошланғич

$$\Delta p(x, y, z, t)/_{t=0} = \Delta p_{\text{бош}} \quad (4.35)$$

ва сиртий рекомбинацияни ҳисобга олувчи

$$\begin{aligned} x=0, x=2A \quad \text{сиртларида} \quad D \frac{\Delta p}{dx} &= \pm S_a \Delta p \\ y=0, y=2B \quad \text{сиртларида} \quad D \frac{\Delta p}{dy} &= \pm S_b \Delta p \\ z=0, z=2C \quad \text{сиртларида} \quad D \frac{\Delta p}{dz} &= \pm S_c \Delta p \end{aligned} \quad (4.36)$$

чегаравий шартларни қаноатлантирувчи ечими

$$\begin{aligned} \Delta p = \sum_{ijk} \Delta p_{ijk} = \sum_{ijk} G_{ijk} \cos\left(\frac{\varepsilon_i x}{A}\right) \cos\left(\frac{\xi_j y}{B}\right) \cos\left(\frac{\xi_k z}{C}\right) \times \\ \otimes \exp\left(-\frac{\mu E x}{2D}\right) \exp\left\{-\left[\frac{1}{\tau} + \gamma_{ijk} + \frac{(\mu E)^2}{4D}\right] t\right\} \end{aligned} \quad (4.37)$$

кўринишда бўлади. Бу ерда

$$\gamma_{ijk} = D \left(\frac{\varepsilon_i^2}{A^2} + \frac{\xi_j^2}{B^2} + \frac{\xi_k^2}{C^2} \right) \quad (4.38)$$

Δp_{ijk} — амплитудаси G_{ijk} бўлган гармоника концентрацияси, берилган хусусий функцияси билан аниқланадиган ошиқча заряд ташувчилар концентрациясининг қисми.

G_{ijk} — бошланғич шартдан, яъни заряд ташувчиларнинг $t=0$ даги тақсимотидан топиладиган катталиқ. (4.37) ечимга хусусий функцияларнинг чизиқли комбинацияси деб қараш мумкин. Ундан кўринадики, Δp_{ijk} — нинг вақтга боғланиши учта экспоненциал ташкил этувчиларни ўз ичига олади.

$\exp\left(-\frac{t}{\alpha p}\right)$ — намуна ҳажмида заряд ташувчилар ре-

комбинацияси туфайли,

$\exp(-\gamma_{ijk} t)$ — сиртий рекомбинация туфайли,

$\exp\left[-\frac{(\mu E)^2}{4D}\right]$ — заряд ташувчилар тақсимотига май-

дон таъсири туфайли вужудга келган ташкил этувчилардир, заряд ташувчилар яшаш вақтини, сиртий рекомбинация тезлигини ўлчашда вақт доимийлигининг охириги ташкил этувчиси шундай кичик бўлсинки, ташқи электр майдони фотоўтказувчанликнинг пасайишига таъсир кўрсатмасин. Бунга эришиш учун,

$$\frac{(\mu E)^2}{4D} < \frac{1}{\tau} + \gamma_{ijk} \quad (4.39)$$

шарт бажарилиши керак. Одатда бу шарт электр майдон кучланганлигининг бир неча В/см дан катта бўлмаган қийматларида бажарилади. Агар (4.34) тенгламада электр майдон кучланганлигини кичик деб, уни инобатга олмасак ва унга (4.36) чегаравий шартларни қўлласак, ϵ_r , η_j , ξ_k — катталиқларни сиртий рекомбинация тезликлари S диффузия коэффициенти D ни намуна ўлчамлари билан боғлайдиган,

$$\frac{S_a A}{D} = \epsilon_r \operatorname{tg} \epsilon; \quad \frac{S_b B}{D} = \eta_j \operatorname{tg} \eta; \quad \frac{S_c C}{D} = \xi_k \operatorname{tg} \xi_k \quad (4.40)$$

муносабатларни беради. Булар трансдент тенгламалар бўлиб, биринчи ечимлари 0 билан $\frac{\pi}{2}$ оралиғида, иккинчи ечимлари $\pi \div 1,5\pi$ оралиғида ётади. Шу билан бирга,

$S=0$ даги ечимлари $\xi=\eta_1=\xi_1=0$ $S\rightarrow\infty$ да эса $\varepsilon_1=\eta_1-\xi_1=\frac{\pi}{2}$ бўлади. Шунинг учун $\Delta\rho_{\mu k}$ нинг асосий гармоникаси ε, η, ξ — ларнинг энг кичик хусусий қийматларига мос келиб, эффектив вақт доимийси,

$$\tau_{\infty\Phi} = \left(\frac{1}{\tau} + \gamma_{\parallel} \right)^{-1} \quad (4.41)$$

билан аниқланади. Бу ерда

$$\gamma_{\parallel} = D \left[\frac{\xi^2}{A^2} + \frac{\eta_1^2}{B^2} + \frac{\xi_1^2}{C^2} \right] \quad (4.42)$$

$\gamma_{\parallel}$ — сирт рекомбинацияси тезлигига, намуна геометрик ўлчамларига боғлиқ. $\gamma_{\mu k}$ ни қабул қилиши мумкин бўлган қийматининг кичигидир. Термодинамик мувозанатни тиклаш жараёнлари билан боғлиқ асосий гармониканинг камайиши (пасайиши) қолган гармоникалардан устунлик қилади, чунки у энг катта вақт доимийсига эга. $\nu_{\mu k} + \frac{1}{\tau}$ — катталикини $\left(\frac{1}{\tau} + \gamma_{\parallel} \right)$ га яқин қийматни қабул қилгунча кетган вақт оралиғи гармоникалар амплитудалари $G_{\mu k}$ нинг ўзаро нисбатига боғлиқ. Энг содда ҳолда δ (дельта функция) — кўринишдаги ёруғлик импульси билан ёритилган, бошланғич ҳолатда текис тақсимланган заряд ташувчилар камайишининг бошланишида $S\rightarrow\infty$, $2B=2C\ll 2A$ бўлганда, асосий гармоника номувозанатий ошиқча заряд ташувчилар $2/3$ қисмининг релаксациясини ифодалайди, бу нисбий вақт ўтиши билан ортиб боради ва тез чегаравий қийматга яқинлашади.

Демак, бу ҳолда фотоўтказувчанлик релаксациясининг асосий қисми нисбатан катта бўлмаган бошланғич қисмидан ташқарида

$$\Delta\sigma(t) = \Delta\sigma_0 \exp \left[- \left(\frac{1}{\tau} + \gamma_{\parallel} \right) t \right] \quad (4.43)$$

орқали ифодаланади. Намунанинг геометрик ўлчамлари қанча катта бўлса, эркин сиртларда сирт рекомбинация тезлиги қанча паст бўлса, вақт доимийси (4.41) га сирт рекомбинациясининг таъсири шунча кичик бўлади. $\gamma_{\parallel}$ — содда формулалар билан ифодаланадиган баъзи бир хусусий ҳолларни кўрайлик.

Агар $x=0$ ва $x=2A$ қирралари (ёқлари)да сирт рекомбинацияси тезликлари чексиз катта $S \rightarrow \infty$ (одатда бу омик контактларда амалга ошади) ва бошқа сиртларида $S=0$ деб қабул қилсак, у

$$\gamma_{\parallel} = \gamma_{100} = \frac{\pi^2}{4A^2} \quad (4.44)$$

кўринишда ифодаланади. (4.44) формулани шубҳасиз зариад ташувчилар ҳажмий яшаш вақтини аниқлашга қўллаш мумкин. Эффе́ктив яшаш вақти $\tau_{\text{эф}}$ тажрибадан ўлчаш билан аниқланган бўлса, ҳажмий яшаш вақти

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{эф}}} - \frac{\pi^2 D}{4A^2} \quad (4.45)$$

билан аниқланади.

Қачонки ҳамма сиртларда сирт рекомбинацияси тезлиги жуда катта бўлиб, $\tau_{\text{эф}}$ маълум бўлса,

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{эф}}} - \frac{\pi^2 D}{4} \left(\frac{1}{A^2} + \frac{1}{B^2} + \frac{1}{C^2} \right) \quad (4.46)$$

бундай имконият яна туғилади.

Агар ёруғлик импульси билан рекомбинация жараёнига омик контактлари таъсир этмайдиган масофада бўлган бир қисми ёритилган бўлса, унда

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{эф}}} - \frac{\pi^2 D}{4} \left(\frac{1}{B^2} + \frac{1}{C^2} \right) \quad (4.47)$$

бўлади. Намуна эркин сиртларида сирт рекомбинацияси тезликлари бир хил чекли кичик қийматларни қабул қилган ҳолда

$$\frac{SB}{D} = \eta^2, C \cdot S/D = \xi^2 \quad (4.48)$$

$$\text{ва } \frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \frac{1}{\tau} + 2S \left(\frac{1}{2B} + \frac{1}{2C} \right) \quad (4.49)$$

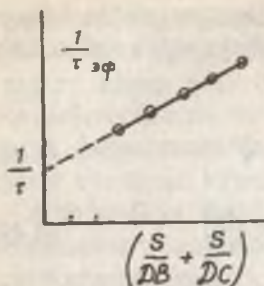
бўлишлигини кўрамыз. Энди бу келтирилган (4.43), (4.49) ифодаларни қўллаб S , τ , D параметрларни тажрибадан аниқлаш устида тўхталамиз. Сирт рекомбинацияси тезлигини (4.49) асосида ўлчаш учун фотоўтказувчанликнинг камайиш жараёнида сиртий рекомбинация асосий аниқловчи жараён, яъни (4.49) да

$$2S \left(\frac{1}{2B} + \frac{1}{2C} \right) \gg \frac{1}{\tau} \quad (4.50)$$

бўлиши керак. Агар намуна ўлчамларидан бири жуда кичик бўлса, $C \ll B$, яъни юпқа пластинка шаклидаги намуна қўлланилса, бунга эришиш мумкин. (4.50) шартни, катта сиртий рекомбинация тезлиги бўлганда қаноатлантириш осон, лекин (4.50) муносабат бажарилмайди, бу ҳолда (4.42) умумий формулани (4.40) билан қўллаш керак.

(4.41) дан кўринадики, $\frac{1}{\tau_{\text{эф}}}$ квадрат қавсдаги кўпайтмага чизикли боғланган. $\frac{1}{\tau_{\text{эф}}}$ функциянинг графиги сиртий рекомбинацияни ўзгармас қийматида тўғри чизик бўлиб, у вертикал ўқни $\left(\frac{1}{\tau} \right)$ да кесадиган унинг оғиш бурчаги тангенс, диффузия коэффициентига тенг бўлади.

$$\operatorname{tg} \varphi = D = \frac{\Delta \left(\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} \right)}{\Delta \left[\frac{n^2}{B^2} + \frac{\epsilon^2}{C^2} \right]} \quad (4.51)$$



4.2-расм. Заряд ташувчилар эффектив яшаш вақти тескари қиймати

$\frac{1}{\tau_{эф}}$ нинг $\left(\frac{S}{DB} + \frac{S}{DC}\right)$ га боғланиши:

S — сирт рекомбинация тезлиги;
 D — заряд ташувчилар диффузия
 коэффициенти; B, C — намуна
 ўлчамлари.

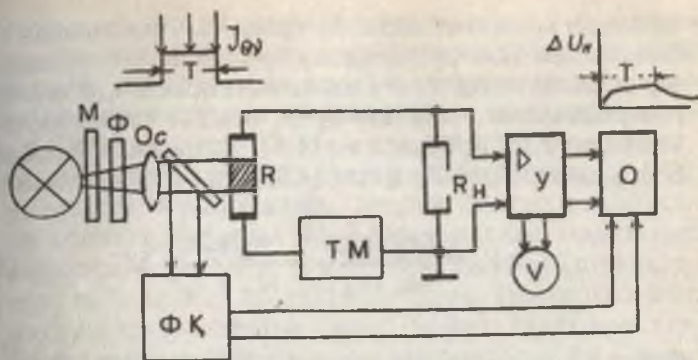
Бу катталиклар қуйидагича топилади: намуна ўрта қисми ёритилган ҳолда, (4.41) га кўра, $\tau_{эф}^{-1}$ ни (4.48) қўллаш билан

$$\frac{1}{\tau_{эф}} = \frac{1}{\tau} + D \left(\frac{\epsilon_1^2}{B^2} + \frac{\xi_1^2}{C^2} \right) = \frac{1}{\tau} + D \left(\frac{S}{DB} + \frac{S}{DC} \right) \quad (4.52)$$

кўринишда ифодалаймиз. Бунда S/D нинг шундай қиймати танланадики, сиртларига бир хил ишлов берилган ҳар хил геометрик ўлчамлардаги намуналарда $\frac{1}{\tau}$ ни ўлчанган қийматларининг нуқталари бир тўғри чизиқда ётсин (4.2-расм). Сўнг тўғри чизиқнинг оғишидан диффузия коэффициенти топилади. D ни ва S/D ни билган ҳолда $\left(\frac{1}{\tau}\right)$ топилади. Шунга ўхшаш график усул билан (4.49) боғланиш асосида τ ва S ни, (4.46) боғланиш асосида эса τ , D ни топиш мумкин. Юпқа намуналар учун ўринли бўлган (4.49) формула учун $C \ll \frac{D}{S}$ шартнинг бажарилиши кремний намуналари учун сиртий рекомбинация тезлигини 10^3 см/с тартибдаги, германий намуналари учун 10^4 см/с тартибдаги қийматлари билан чеклайди.

б. Фотоўтказувчанлик релаксация вақтини ўлчаш қурилмаси ва заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлашдаги хаттоликлар

Фотоўтказувчанлик релаксация вақтини ўлчаш қурилмаларидан бирининг чизмаси 4.3-расмда келтирилган.



4.3-расм. Стационар фотоўтказувчанликни ўлчаш қурилмасининг схемаси. ТМ — ўзгармас ток манбаи, М — модулятор, ОС — оптик система, Ф — фильтр, ФК — фотоқабулқилгич (фотодиод).

Ўзгармас кучланиш (ток) манбаи (ТМ) га қаршилиги R бўлган намуна билан унга кетма-кет бўлган юклама қаршилиқ R_H уланган. Ёруғлик импульси билан намуна ёритилганда, унинг ўтказувчанлиги, G нинг ўзгариши ΔG туфайли, қаршилиқда кучланиш тушувининг ўзгариши (ўзгарувчан кучланиш) ΔV_H вужудга келади. Намуна ёритилмаганда унинг қаршилигини, занжирдан оқаётган I_0 токни, R_H даги кучланишни

$$R = R_0; \quad I_0 = \frac{V_H}{R_0 + R_H}; \quad V_{H0} = I_0 R_H = \frac{V_H R_H}{R_H + R_0}$$

намуна ёритилганда,

$$R = R_0 - \Delta R; \quad I_{\varphi} = \frac{V_H}{R_0 + R_H - \Delta R}; \quad V_{\text{н\acute{e}р}} = \frac{V_H R_H}{R_H + R_0 - \Delta R}$$

бўлишини назарда тутсак, R_H — юклама қаршилиқда кучланиш тушувининг ўзгариши

$$\Delta V_H = V_{H0} - V_{\text{н\acute{e}р}} = (I_{\varphi} - I_0) R_H = \frac{V_H \Delta R \cdot R_H}{(R_0 - \Delta R + R_H)(R_0 + R_H)} \quad (4.53)$$

ифода билан аниқланади. Бу ерда, V_H — ток манбаи (ТМ) клеммалари (қисқичлари)даги кучланиш. Номувозанатий заряд ташувчилар кичик интенсивликдаги ёруғлик билан генерацияланса, $\Delta n, \Delta p \ll n_0 + p_0$ намуна қаршилигининг ўзгариши $\Delta R \ll R_0$ бўлади ва (4.53) махражидаги ΔR эътиборга олинмайди. Бу ҳолда (4.53) ни (4.28) га асосан

$$\Delta V_H = \frac{V_H R_H \Delta R}{(R_0 + R_H)^2} = \frac{V_H R_H R_0^2}{(R_H + R_0)^2} \Delta G \quad (4.54)$$

билан ифодаланишини кўрамиз. Бу ифодадан кўринадики, заряд ташувчиларнинг паст уйғотиш даражасида юклама қаршилиқ R_H нинг исталган қийматида ΔV_H билан намуна фотоўтказувчанлиги ΔG орасида пропорционаллик сақланади. Ихтиёрий уйғотиш даражасида, ΔV_H билан ΔG — орасидаги пропорционаллик $R_H \gg R_0$ бўлгандагина сақланади. Бу ҳолда (4.54) дан

$$\Delta V_H = \frac{V_H R_0^2}{R_H} \Delta G \quad (4.55)$$

бўлади. (4.54) ва (4.55) ифодалар ўринли бўлган ҳолда, ΔG ва унга пропорционал бўлган R_H даги кучланиш импулси ΔV_H ни вақт бўйича сўниши рекомбинация қонунияти бўйича бўлиб, мувозанатдаги қийматига интилади. R_H қаршилиқда ёруғлик импулсидан вужудга келган кучланиш импулсини кенг *поласали* кучайтиргичга, сўнг ундан осциллографга берилади ва фотоўтказувчанлик релаксацияси осциллограмма шаклида қайд қилинади. Осциллограммани турғун ушлаб туриш учун у ташқи сигнал билан *синхронланади*. Бунинг учун намунага тушаётган ёруғлик яримшаффоф кўзгу билан икки қисмга ажратилади. Уларнинг бири кичик инерцияли, тезкор фото қабул қилгич (фотó-электрон кучайтиргич, фотодиод, вакуумли фотоэлемент) орқали электр импулсига айлантирилади ва осциллографнинг синхронлаш блокининг киришига берилади (43-расм).

Осциллограммадан кучланиш импулси ΔV_H нинг камайиш чизигини таҳлил қилиб, унинг экспоненциал со-

ҳасининг вақт доимийси аниқланади ва у орқали заряд ташувчилар яшаш вақти ҳисобланади. Кучланиш импульсининг бошланғич тез камайиш соҳаси, юқори гармоникалар тушишини аниқлаши туфайли, эътиборга олинмайдиган. Одатда бу усул билан τ ни ўлчашда кўтарилиш, тушиш вақтлари кичик бўлган тўғри бурчакли ёруғлик импульслари ишлатилади. Бундай ёруғлик импульсларини олишда Поккельс ва Керр ячейкали модуляторлар, инжекцион лазерлар, $p-n$ — гамо ўтишли ёруғлик диодлари ва бошқалар ишлатилади. Керр, Поккельс ячейкали модуляторлар электро-оптик эффектларга асосланган. Электрооптик эффектни вақт доимийси $\sim 10^{-8}$ с тартибиде, шу эффектга асосланган модуляторлар қўллаш билан импульс фронти $10^{-7} \div 10^{-8}$ сек. бўлган тўғри бурчакли ёруғлик импульслари олиш мумкин. Ёруғлик диодларида $p-n$ ўтиши учун тўғри кучланиш берилганда инжекцияланган номувозанатий заряд ташувчилар рекомбинацияси туфайли, нурланиш содир бўлади. Ёруғлик диодларини, инжекцион лазерларни ўзгарувчан ток импульси билан уйғотиб, улар параметрига мос келадиган ёруғлик импульси олиш мумкин. Нурланиш импульсларини олди ва орқа фронтлари заряд ташувчилар яшаш вақтига боғлиқ бўлиб, у $10^{-7} : 10^{-9}$ сек тартибиде бўлади. Импульсли ёруғлик манбалари сифатида (инерт газлар ксенон, криптон ёки улар аралашмаси тўлдирилган) газли разряд лампалар ҳам ишлатилади. Кучланиш импульси лампанинг ёндирувчи ва ток ўтадиган электродларига берилганда лампадан оқаётган ток тўхтагандан сўнг ҳам бир неча микро секунд разряд давом этади. Бу лампаларда ёруғлик импульсининг минимал сўниш вақти 1 мкс тартибиде бўлиб, у $\tau_{\text{эр}}$ нинг қуйи чегарасини чеклайди. Номувозанатий заряд ташувчилар яшаш вақтини фотоўтказувчанликнинг сўнишига асосланган усули билан аниқлашда катта хатоликка йўл қўймаслик учун бир жинсли бўлмаган намунани ёритишдан (масалан, намуна ток контактлари соҳасини ёритишдан) пайдо бўладиган фотоэлектр юритувчи кучни йўқотиш керак. Бунинг учун намуна биржинслиликка текширилади ва намуна Ом контактларига ёруғликни тушишидан сақлаш керак. Юқорида қайд қилинганидек, Ом контактларидаги рекомбинация жараёнлари фотоўтказувчанликнинг сўнишига таъсир кўрсатмаслиги

учун Ом контактларидан ёритилаётган қисмгача бўлган масофа заряд ташувчилар диффузион узунлигидан бир неча марта катта $l \geq (2 \div 3L)$ бўлиши зарур. Яримўтказгич намуналарида ёпишиш марказлари мавжуд бўлса, уларнинг таъсири туфайли фотоўтказувчанликнинг сўниш қисмида узоқ вақтли ташкил этувчиси бўлади. Буни йўқотиш учун намунани кучсиз ёруғлик билан доимий ёритиб туриш тавсия этилади, чунки бу ҳолда ёпишиш марказлари заряд ташувчилар билан тўлатилган бўлади. Фотоўтказувчанлик релаксациясидан заряд ташувчилар ҳажмий яшаш вақтини аниқлашда сирт рекомбинация жараёни туфайли содир бўлган хатолик, асосан, намуна сиртларининг ишловига ва намуна геометрик ўлчамларига боғлиқ. Буни баҳолаш учун ўлчамлари $a, b \gg d$ бўлган намуналарда заряд ташувчилар диффузия коэффициентига, сиртий рекомбинация S тезлигига, намуна қалинлигига боғлиқ бўлган сиртий яшаш вақти (4.41) ва (4.42) ларга кўра $\left(C = \frac{d}{2}\right)$ га алмаштириб

$$\tau_s = \frac{d^2}{4\xi^2 D} \quad (4.56)$$

ифодадан топилади. ξ — катталиқ

$$\xi_1 \approx \xi_2 = \frac{dS}{D} \quad (4.57)$$

трансдент тенглама ечими. τ_s нинг заряд ташувчиларнинг ҳажмдаги яшаш вақтига таъсирини кремний мисолида кўрайлик. Бунинг учун кремний намуналарининг сиртлари икки хил, яъни: а) механик-кимёвий ишловдан ва б) едириш (кислота ёки ишқорлар билан сиртини ювиш) ишловидан ўтган сиртлардир.

Бу сирт ишловларига мос равишда рекомбинация тезликларининг 10^4 см/с, 10^3 см/с қийматлари тўғри келади. (4.56) ва (4.57) асосида ҳисобланган τ_s нинг ҳар хил қалинликдаги қийматлари 4.1-жадвалда келтирилган.

Кремний намуналарида асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг
сиртдаги яшаш вақтлари.

Намуна, қалинлиги, мм	$\tau_s = \frac{d^2}{4\xi_1^2 D}$			
	p-тип $D_p = 39 \text{ см}^2/\text{с}$		n-тип $D_n = 15,5 \text{ см}^2/\text{с}$	
d	$S = 10^4 \text{ см/с}$	$S = 10^3 \text{ см/с}$	$S = 10^4 \text{ см/с}$	$S = 10^3 \text{ см/с}$
0,4	6	24	12	29
1	31	72	70	110
5	670	880	1700	1960
10	2700	3100	6800	7100
15	5900	6500	10000	11000
20	10500	11000	27000	27000

τ_s нинг қийматлари таҳлилидан кўринадики, τ ни ΔG нинг сўниши бўйича аниқлашда заряд ташувчилар ҳажмий яшаш вақтини 10% дан катта бўлмаган хатолик билан ўлчаш учун, $\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_s}$ га кўра, шундай қалинликдаги намунани танлаш керакки, унда τ_s нинг қиймати τ га нисбатан камида (бир тартибда) ўн марта катта бўлиши керак. Масалан, диаметри ϕ 76 мм, қалинлиги 0,4 мм бўлган кремний намунасида τ ни 10% дан катта бўлмаган хатолик билан ўлчаш учун τ нинг қиймати 1÷2 мкс дан кичик бўлиши керак. Электрон саноати ривожланиши билан кейинги йилларда заряд ташувчилар параметрларини контактсиз аниқлаш усулларига талаб ортди. Шу боисдан бир қанча усуллар яратилди. Бу усуллар асосида намунага инжекцияланган заряд ташувчилар концентрациясининг сўниши билан боғлиқ ҳодисалар ётади. Масалан, ёруғлик импульси билан генерацияланган эркин заряд ташувчиларда ёруғлик ютилиш коэффициентининг сўнишига асосланган усулни кўрсатиш мумкин.

в. Бир жинсли намуналарда заряд ташувчилар яшаш вақтини ўлчашнинг частотавий фаза усуллари

Бу усуллар билан τ ни аниқлашнинг асосида номуво-
занат заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқ маълум бир
чекли қийматга эга бўлиши билан боғлиқ концентрация-
си, фотоўтказувчанликнинг сўниш ва кўтарилиш жара-
ёнлари инерционлиги ётади.

Намунада заряд ташувчилар интенсивлиги синусоиди
бўйича (гармоник) модуляцияланган

$$I_v = I_{0v}(1 + \sin \omega t)$$

ёки комплекс функция кўриниш

$$I_v = I_{0v} + I_{0v} e^{i\omega t}$$

билан ифодаланувчи ёруғлик билан қўзғатилганда наму-
нанинг фотоўтказувчанлиги ва фототоки бироз кечикиш
билан худди ёруғлик интенсивлигини ўзгариши каби со-
дир бўлади. Яъни ёруғлик оқими билан фототок орасида
фаза фарқи пайдо бўлади. Бу фаза силжиши заряд та-
шувчиларнинг ҳажмий яшаш вақтига ёруғлик модуляци-
ясининг частотасига, сиртий рекомбинация тезлигига
боғлиқ. Шундай қилиб, бу икки сигнал орасидаги фаза
фарқини (силжишини) ўлчаш билан τ ни аниқлаш имко-
ни туғилади.

Ёруғликнинг модуляция частотаси ошиши билан фо-
тотокни частотага боғлиқлиги намоён бўла бошлайди.
Фаза силжиши каби фототок амплитудаси τ , ω ларга боғ-
лиқ. Фототок амплитудасининг ёруғлик модуляцияси час-
тотасига боғланишидан τ ни топиш мумкин. Бу усуллар
билан τ ни аниқлаш назариясини қараб чиқамиз. Маса-
лан, соддалаштириш учун заряд ташувчилар намунада
текис генерациялансин, электр майдон кучланганлиги
кичик, намуна сиртларида сиртий рекомбинация бўлма-
син деб фараз қилинганда, (4.9) узлуксизлик тенглама-
нинг дрейф, диффузия билан боғлиқ ҳадлари инобатга
олинмайди. Бу ҳолда заряд ташувчилар генерация тезли-
ги $g_{0v} = \alpha \beta I_{0v}(1 - R_p)$ (4.58) ёки (4.59) га кўра

$$g = \alpha \beta I_{0v}(1 + \sin \omega t)(1 - R_p) = g_{0v} + g_{0v} \sin \omega t \quad (4.60)$$

$$g = \alpha \beta I_{0v}(1 + e^{i\omega t})(1 - R_p) = g_{0v} + g_{0v} e^{i\omega t} \quad (4.61)$$

ифода билан аниқланади. Шундай қилиб, (4.9) узлуксиз-
лик тенгламаси (4.60) га кўра

$$\frac{d\Delta n}{dt} = g_0 + g_0 \sin \omega t - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (4.62)$$

бўлади. Генерация (ҳади) тезлиги икки ҳаддан иборат
бўлгани учун (4.62) даги номувозанатий ортиқча заряд
ташувчилар концентрациясини

$$\Delta n = \Delta n_{cr} + \Delta n(\omega t) \quad (4.63)$$

кўринишда ифодалаймиз. Бу ерда Δn_{cr} — генерациянинг
доимий ташкил этувчиси (g_0) га мос келувчи concentra-
цияси, $\Delta n(\omega t)$ — генерация ҳадини ўзгарувчан ташкил
этувчисига мос келган концентрация, яъни гармоник таш-
кил этувчиси Δn нинг ўзгарувчан ташкил этувчиси. $\Delta n(\omega t)$
нинг узлуксизлик тенгламаси (4.62) дан (4.63) га кўра

$$\frac{d\Delta n(\omega t)}{dt} = g_0 \sin \omega t - \frac{\Delta n(\omega t)}{\tau_n} \quad (4.64)$$

бўлади. Унинг хусусий ечими

$$\Delta n(\omega t) = g_0 + \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} [\sin \omega t - \omega \tau \cos \omega t] \quad (4.65)$$

билан ифодаланади,

$$\sin(\omega t - \theta) = \cos \theta [\sin \omega t + \operatorname{tg} \theta \cos \omega t]$$

бўлишлигини назарда тутсак, уни (4.65) билан солишти-
ришдан

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \omega \tau \\ \theta &= \arctan \omega \tau \end{aligned}$$

билан аниқланишини кўрамиз ҳамда, яъни

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}$$

бўлишлигини эътиборга олсак, (4.65)

$$\Delta n(\omega t) = g_0 \frac{\tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \sin(\omega t - \arctan \omega \tau) \quad (4.66)$$

кўринишни олади. Бу ифоданинг таҳлилидан кўринадики, номувозанат заряд ташувчилар ортиқча концентрациясининг ўзгарувчан (гармоник) ташкил этувчисининг ифодаси (4.66) ўзгарувчан генерация тезлиги $g_0(\omega t)$ каби бўлиб, лекин улар бир-биридан амплитудалари билан ва бир-бирига нисбатан силжиган фазаси билан фарқланади. Намунада сиртий рекомбинация мавжуд бўлганда фотоўтказувчанлик билан уйғотувчи ёруғлик оқими орасида фаза фарқи кўп яримўтказгич параметрларига боғлиқ мурраккаб функция бўлиб, S нинг ортиши θ нинг камайишига олиб келади.

Заряд ташувчилар яшаш вақтини ёруғлик интенсивлигининг модуляциялаш частотасига боғлиқлиги орқали аниқлаш усулини кўрамиз.

4.3.1. бўлимда фототок ΔI , фотоўтказувчанлик (ΔG) га ΔG эса ўз навбатида ΔI га пропорционаллигини кўрган эдик. Интенсивлиги гармоник модуляцияланган ёруғлик билан ёритилган намунада пайдо бўлган фототокнинг ўзгарувчан ташкил этувчисининг амплитудаси $\Delta I_0(\omega t)$ (4.66) га кўра

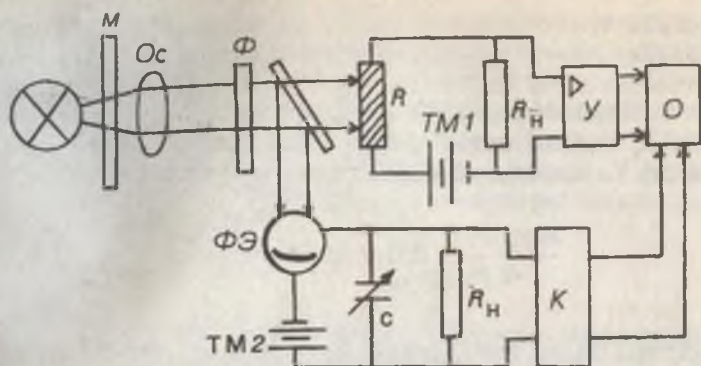
$$\Delta I_0(\omega t) \sim g_0 \frac{\tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

бўлади. Модуляция частотаси камайиб бориши билан фототок амплитудаси ортиб боради ва $\omega \tau \ll 1$ шарт bajarилганда максимумга эришади. Шундай қилиб, модуляция частотаси етарли катта бўлгандаги фототокни, $\omega \rightarrow 0$ даги фототокга нисбати

$$\frac{\Delta I(\omega t)}{\Delta I(0)} = \frac{\Delta n(\omega t)}{\Delta n(0)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (4.67)$$

билан аниқланишини кўрамиз. $\omega \tau = 1$ да

$$\frac{\Delta I(\omega t)}{\Delta I(0)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71 \quad (4.68)$$



4.4-расм. Заряд ташувчилар яшаш вақтини фаза силжишининг компенсация қилиш усули билан ўлчаш қурилмасининг схемаси. ФЭ — вакуумли (тезкор) фотоэлемент; TM1, TM2 — ўзгармас ток манбалари; К — катод такрорлагич.

Демак, номувозанат заряд ташувчилар яшаш вақтини $\Delta I(\omega t)$ боғланишидан аниқлаш учун ёруғликнинг модуляция частотасини ошира бориб, унинг фототок амплитудалари нисбати 0,71 га тенг бўлган қиймати топилади ва у орқали яшаш вақти $\tau = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2\pi\nu}$ ифодадан ҳисобланади. Интенсивлиги синусоиди бўйича модуляцияланган ёруғлик билан τ ни ўлчаш қурилмасининг чизмаси 4.4-расмда келтирилган. Бунда яримшаффоф кўзгу ёруғлик оқимини икки қисмга ажратади. Биринчи қисми намунага тушади ва натижада ток манбаи TM1 га ва намунага кетма-кет уланган юклама қаршилик R_n да кучланиш импулси ΔV_n ни пайдо қилади. Кичик даражали инжекцияда, заряд ташувчилар текис генерацияланганда ва сирт рекомбинацияси тезлиги жуда кичик, эътиборга олмай-диган бўлганда Δn ва унга пропорционал бўлган ΔN ҳам (4.64) узлуксизлик тенгламасидан топилади.

Ёпишиш марказлари йўқ бўлганда $\Delta N = \Delta P$ электро-нейтраллик шarti ўринли бўлганда ΔN билан ΔG , ΔG билан ΔV_n орасидаги боғланишлар чизикли бўлганда (ΔV_n)

$$\frac{d\Delta V_n}{dt} = B(1 + \sin \omega t) - \frac{\Delta V_n}{\tau} \quad (4.69)$$

тенгламадан топилади. B — константа (доимий катталик). Ёруғлик оқимининг иккинчи қисми токнинг тўйиниш режимда ишлайдиган вакуумли фотоэлементга тушади ва ток манбаининг ТМ2 фотоэлемент, ўзгарувчан сифим C ва R_1 қаршилиқдан иборат занжирдан $I = I_0(1 + \sin \omega t)$ ток оқа бошлайди. R_1 қаршилиқдаги кучланиш

$$\frac{d\Delta V_1(\omega t)}{dt} = B_1(1 + \sin \omega t) - \frac{\Delta V_1(\omega t)}{R_1 \cdot C}$$

тенглама билан аниқланади. Бу ерда B_1 — доимий катталик. ΔV_H ва ΔV_1 кучланишлар бир хил кучайтиргичлар орқали осциллограф найчасининг x ва y — пластиналарига берилади.

Бошланғич шартларнинг бир хиллигини ҳисобга олган ҳолда (4.69) ва (4.70) тенгламалардан куринадики, $R_1 C = \tau$ бўлганда, $\Delta V_1(\omega t)$ ва $\Delta V_H(\omega t)$ ларнинг t билан боғланиши бир хил бўлади ва экранда оғма тўғри чизик кузатилади. $\tau \neq R_1 C$ да $\Delta V_H(\omega t)$ ва $\Delta V_1(\omega t)$ орасида фаза силжиши пайдо бўлади ва экранда эллипс кузатилади. У синусоида бўйича модуляцияланган ёруғлик билан ишлайдиган чизма τ ни 10^{-10} с гача ўлчаш имконини беради. Бундай модуляцияланган ёруғликни доира шаклидаги тешиклари бўлган дискни айлантириб ёки электрооптик модуляторлар ёрдамида олиш мумкин.

г. Эпитаксиал қатламларда τ ни аниқлашнинг фазавий усуллари

Бу усулнинг асосида эпитаксиал қатламда олинган Шоттки (контакти) диодининг интенсивлиги гармоник модуляцияланган ёруғлик билан ёритганда пайдо бўлган фототок билан ёруғлик оқими орасидаги силжиш фазасини ўлчаш ётади. τ ни nn^+ — эпитаксиал структураларда ўлчашни кўрайлик (46-расм).

Шоттки контакти (диоди) эпитаксиал структуранинг солиштирма қаршилиги тағлиқка нисбатан катта бўлган қатлам (n) га, тағлик (n^+) томонига эса Ом контакти олинган. Структура тағлик томонидан ютилиш коэффициенти кичик бўлган, интенсивлиги бўйича модуляцияланган монохроматик ёруғлик билан ёритилади. Бу ҳолда заряд

ташувчиларнинг текис генерацияланиши содир бўлади. Ёруғлик билан генерацияланган ноасосий заряд ташувчилар (кавак) Шоттки контакти томон диффузияланади ва фототокни вужудга келтиради. Агар заряд ташувчилар диффузион узунлиги катта бўлса, ҳажмий заряд соҳаси кенглигини инобатга олмаса ҳам бўлади. У ҳолда Шоттки контакти учун қисқа туташув режимида чегаравий шартни

$$\Delta p_1(0)=0 \quad (4.71)$$

кўринишда ёзиш мумкин. Шоттки контактидан ташқарида эпитаксиал қатлам сиртий рекомбинацияси жуда катта деб фараз қилинса, (4.71) чегаравий шарт структуранинг бутун сирти бўйича ўринли бўлади ва масала бир ўлчамли бўлади. Эпитаксиал қатлам сиртида сиртий рекомбинация тезлиги чекли қиймат қабул қилса, нобиржинсли чегаравий шарт ҳисобга олиниши керак ва уч ўлчамли масалани ечиш керак бўлади. Таглик билан эпитаксиал қатлам чегарасида чегаравий шартлар

$$\Delta p_2(d)=\Delta p_1(d)e^{-\frac{qdk}{kT}} \quad (4.72)$$

$$D_1 \left. \frac{d\Delta p_1}{dx} \right|_{x=d} = D_2 \left. \frac{d\Delta p_2}{dx} \right|_{x=d} \quad (4.73)$$

билан ифодаланади. (4.72) шарт эпитаксиал қатлам билан таглик чегарасида потенциал тўсиқ мавжудлигини, (4.73) эса диффузион оқимлар узлуксизлигини англатади.

Юқорида кўрганимиздек, ёруғлик интенсивлиги синусоида бўйича (гармоник) модуляцияланган, шунинг учун генерация тезлиги (4.61) гармоник ҳадининг $g(\omega t) = g_0 \exp(i\omega t)$ кўринишдаги ифодасидан фойдаланамиз. Номувозанат асосий бўлмаган заряд ташувчилар концен-трацияси (4.63) гармоник ташкил этувчисини

$$\Delta p(x, \omega t) = \Delta p(x) e^{i\omega t} \quad (4.74)$$

кўринишда қидирсак, унинг амплитудаси $\Delta p(x)$ таглик ҳамда эпитаксиал қатлам учун бир хил бўлган узлуксизлик тенгламаси

$$i\omega\Delta p(x) = D_p \frac{d^2\Delta p(x)}{dx^2} - \frac{\Delta p(x)}{\tau_p} + g_0 \quad (4.75)$$

билан ифодаланади. Бу тенгламани таглик ва эпитаксиал қатлам учун (4.70)÷(4.72) чегаравий шартларни қаноатлантирувчи $\Delta p_1(x)$ ва $\Delta p_2(x)$ ечимлари топилади. Ҳисобларнинг кўрсатишича, улар асосида топилган қисқа туташув фототоки амплитудасининг ифодаси

$$\gamma_{KT} = -eD_1 \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=0} = -eg_0 L_1 \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{d}{z_1}\right) + \left(\xi \operatorname{sh} \frac{d}{L_1} + \frac{L^2}{L_2}\right) - 1}{\xi \operatorname{ch} \frac{d}{L_1} + \operatorname{sh} \frac{d}{L_1}} \quad (4.76)$$

кўринишда бўлади. Бу ерда,

$$L_1 = \left(\frac{D_1 \tau_1}{1 + i\omega \tau_1} \right)^{1/2}; \quad L_2 = \left(\frac{D_2 \tau_2}{1 + i\omega \tau_2} \right)^{1/2}; \quad \xi = \frac{L_2 D_1}{L_1 D_2} e^{-\gamma \tau / \kappa T} \quad (4.77)$$

Тагликдаги ва эпитаксиал қатламдаги асосий заряд ташувчилар концентрациялари нисбати $\frac{n_2}{n_1} > 10^3$ бўлганда $\exp\left(\frac{e\varphi_k}{KT}\right) > 10^3$, $\xi \gg 1$ бўлади ва ток ифодаси соддалашади.

$$J_{KT} = -eg_0 \left[L_1 \operatorname{tg} \frac{d}{L_1} + L_2 \operatorname{sch} \frac{d}{L_1} \right] \quad (4.78)$$

Бу ифоданинг биринчи ҳади эпитаксиал қатламда генерацияланган заряд ташувчиларнинг иккинчи ҳади тагликдан эпитаксиал қатламга инжекцияланган заряд ташувчилардан йиғувчи контактга етиб келган қисмининг фототокга қўшган ҳиссасини кўрсатади. Шунинг учун

иккинчи ҳадини эътиборга олмаслик мумкин ва фототок амплитудасини

$$j_{KT} = -eg_0 \left(\frac{D_1 \tau_1}{1 + i\omega \tau_1} \right)^{1/2} \text{th} \left[\frac{d}{\left(\frac{D_1 \tau_1}{1 + i\omega \tau_1} \right)^{1/2}} \right] \quad (4.79)$$

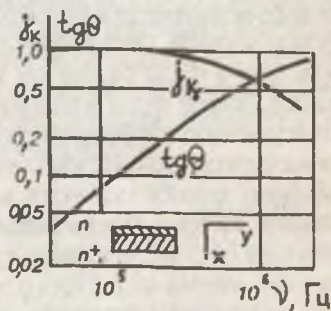
ифодадан ҳисоблаш мумкин. Паст частоталар $\omega \tau \ll 1$ да фототок фазасининг силжиши

$$\text{tg} \theta = -\frac{\omega \tau_1}{2} \left[1 - \frac{2d}{(D_1 \tau_1)^{1/2}} \text{csh} \frac{2d}{(D_1 \tau_1)^{1/2}} \right] \quad (4.80)$$

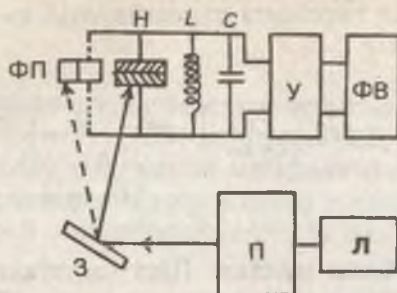
билан аниқланади. Агар $\frac{(D_1 \tau_1)^{1/2}}{d} = 2$ бўлганда (4.80) ни иккинчи ҳади бирга нисбатан анча кичик. Буни эътиборга олмаганда

$$\text{tg} \theta = -\frac{\omega \tau_1}{2}$$

билан аниқланишини кўрамиз 4.5-расмда солиштирма қаршилиги 28 Ом. см, қалинлиги 50,2 мкм, заряд ташувчиларнинг диффузион узунлиги 18,5 мкм бўлган кремний эпитаксиал қатлами учун ҳисобланган $\text{tg} \theta$ ва фототок амплитудасини ёруғлик интенсивлигини модуляция частотасига боғланиш графиги келтирилган. Келтирилган назарий боғланиш тажриба натижалари билан мос тушган. Бу юқорида келтирилган назарий ҳисоблашларда қабул қилинган фаразлар ўринли эканлигидан да-



4.5-расм. Фаза силжиши $\text{tg} \theta$ нинг ва фототок амплитудасининг модуляция частотасига боғланиши.



4.6-расм. Шоттки диодининг фототоки бўйича фазавий усул билан заряд ташувчилар яшаш вақтини ўлчаш қурилмасининг схемаси.

ФП — юқори частотали фотоқабулқилгич (тезкор фотодиод):

П — Поккельс модулятори: Н — намуна: У — кучайтиргич:

Л — лазер: ФВ — фаза сезгир вольтметр: З — ясси кўзгу.

лолат беради. Эпитаксиал структураларда τ ни аниқлаш қурилмасининг чизмаси 4.6-расмда келтирилган. Қурилмада электрооптик Поккельс ячейкаси (П) билан модуляцияланган лазер нури намунанинг таглик томонига туширилади. Ёруғлик оқими навбатма-навбат (галма-гал) кўзгу орқали намуна 0 га, юқори частотали фотоқабулқилгич (ФП) га тушади. Фотоқабулқилгич ФП — стандарт фазали таянч сигнални ҳосил қилади. Намуна ва фотоқабулқилгич томонидан пайдо бўлган сигналлар фазага сезгир вольтметрга берилади. У билан намуна ва фотоқабулқилгичдаги сигналлар амплитудалари нисбати ва улар орасидаги фаза силжиши ўлчанади. Шунини таъкидлаш керакки, лазер нури интенсивлигининг ўзгариши резонанс контурининг сифати модуляция частотасидаги ўлчаш натижаларига таъсир кўрсатмайди. Бу усулнинг ютуғига τ ни осон ҳисоблашликни ва ўлчаш натижасини сирт ишловига кучсиз боғланишини кўрсатиш мумкин, ўлчаш мумкин бўлган — τ нинг қуйи чегараси структура сифими ва унга кетма-кет бўлган қаршилиги билан аниқланадиган максимал модуляция частотасига боғлиқ.

д. Фотолюминесценция орқали τ ни ўлчаш

Фотолюминесценция орқали τ нинг фазавий ўлчаш усули яримўтказгич намуналарида интенсивлиги модуля-

цияланган ёруғлик билан номувозанат заряд ташувчилар уйғотилганда уларнинг нурланишли рекомбинациясидан содир бўлган фотолюминесценция оқими билан уйғотувчи модуляцияланган ёруғлик орасидаги фаза сиёжишини ўлчашга асосланган. Яримўтказгични $x=0$ текислиги интенсивлиги вақт бўйича, $I = I_1 + I_0 \exp(i\omega t)$ қонун билан ўзгарувчан энергияси $\hbar\omega > E_g$ бўлган, яъни интенсивликнинг гармоник ташкил этувчиси бўлган монохроматик ёруғлик билан ёритилсин. Бу ёруғлик оқимининг ютилишидан юзага келган заряд ташувчилар генерация тезлиги

$$g(x,t) = \frac{1-R}{\hbar\nu} [I_1 + I_0 e^{i\omega t}] \alpha \beta e^{-\alpha x} \quad (4.82)$$

билан ифодаланади. Агар ёруғликдан генерацияланган заряд ташувчилар тақсимооти диффузия, дрейф, рекомбинация жараёнлари туфайли пайдо бўлган бўлса, у ҳолда, узлуксизлик тенгламаси (4.10) каби бўлиб, олдин кўрсатилганидек, x ва модуляция частотаси ω га боғлиқ ортиқча номувозанат заряд ташувчилар концентрациясининг гармоник ташкил этувчисининг узлуксизлик тенгламаси

$$i\omega \Delta n(x) = D_n \frac{d^2 \Delta n(x)}{dx^2} - \frac{\Delta n(x)}{\tau_n} + g_0 e^{-\alpha x} \quad (4.83)$$

кўринишда бўлади. (4.83) тенгламанинг (4.75) дан фарқи шундаки, унда заряд ташувчиларнинг нотекис генерацияланиши ҳисобга олинган. Қалин намуналар $d \gg L_n$ да ёритилмаган томонида номувозанат заряд ташувчилар концентрациясини эътиборга олмаслик мумкин. Шунинг учун (4.83) тенгламанинг ёритилган сиртида

$$D_n \left. \frac{d\Delta n(x)}{dx} \right|_{x=0} = S\Delta n(x)|_{x=0}$$

ёритилмаган сиртида

$$D_n \left. \frac{d\Delta n(x)}{dx} \right|_{x=d} = 0$$

$$\Delta n(x) = \frac{g_0 \tau_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1 - i\omega\tau} \left\{ -\exp(-\alpha x) + \frac{S + \alpha D_n}{S + \frac{D_n}{L_n} (1 + i\omega\tau_n)^{1/2}} \right\} \times \\ \times \exp \left[-\frac{x}{L_n} (1 + i\omega\tau_n)^{1/2} \right] \quad (4.84)$$

кўринишда бўлади. Агар намунадан нурланаётган фотонларни қайта ютилиш коэффициенти (α_0 — люминесценция коэффициенти) кичик бўлса, яъни $\alpha_0 L_n \ll 1$ бўлса, у ҳолда нурланаётган фотонлар оқими

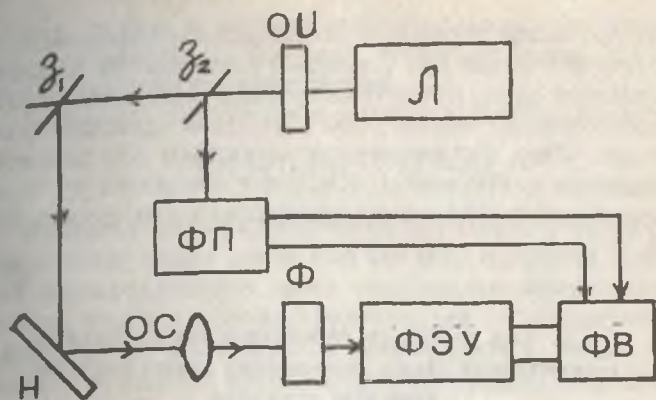
$$I_{ол} = \eta \int_0^{\infty} \frac{\Delta n(x)}{\tau_r} dx \quad (4.85)$$

билан аниқланади. Бу ерда η — фотолюминесценциянинг ташқи квант чизигининг ички квант чиқишига нисбати, τ_r — нурланишнинг яшаш вақти. Паст даражали уйғотишда $\tau_r = \text{const}$ бўлади. Уйғотувчи ёруғликнинг кучли ютилиш соҳасида, яъни $\alpha L_n \gg (1 + i\omega\tau_n)^{1/2}$ бўлганда сиртий рекомбинация тезлиги кичик $\frac{SL_n}{D_n} \ll 1$ бўлганда, ҳисоблашларнинг кўрсатишича, люминесценция оқимининг ифодаси

$$I_{ол} = \eta \frac{g_0 \tau_n}{\alpha \tau_r} \cdot \frac{\alpha L_n}{1 + i\omega\tau_n} = \eta \frac{g_0 \tau_n L_n}{\tau_r} \cdot \frac{1}{(1 + \omega^2 \tau_n^2)} \quad (4.86)$$

кўринишда бўлади. Унинг фаза силжиши тангенс эса $\text{tg} \theta = -\omega\tau_n$, яшаш вақти $\tau_n = -\frac{\text{tg} \theta}{\omega}$ бўлади. Сиртий рекомбинация катта — $\frac{SL_n}{D_n} \gg 1$ бўлганда

$$I_{ол} = \eta \frac{g_0 \tau_n}{\tau_r} \frac{L_n}{(1 + i\omega\tau_n)}; \quad \text{tg} \theta = -\frac{\omega\tau_n}{2}; \quad \tau_n = -\frac{2}{\omega} \text{tg} \theta \quad (4.87)$$



4.7-расм. Фотолюминесценция бўйича фазавий усул билан заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлаш қурилмаси. ОИ — ёруғлик интенсивлиги ўзгартиргичи; Z_1 — ясси кўзгу; ФЭУ — фотоэлектрон кўпайтиргич; Z_2 — яримшаффоф ясси кўзгу.

бўлади. Бурчакларнинг кичик қийматида $\text{tg } \theta \approx \theta$ сиртий рекомбинациясининг иккита чегаравий қийматида, яъни $S=0$ ва $S \rightarrow \infty$ бўлган ҳоллардаги заряд ташувчилар яшаш вақтлари бир-биридан икки мартадан ортиқ фарқ қилмайдилар.

Заряд ташувчилар яшаш вақтини ўлчаш қурилмасининг чизмаси 4.7-расмда келтирилган. Намуна θ асиллиги бўйича модуляцияланган лазер нури билан уйғотилади. Намунага тушаётган ёруғлик интенсивлиги сусайтиргич ОИ орқали бошқарилади. Намунанинг нурланиши оптик филтър (сузгич)лар тўплами Φ га йўналтирилади. Улар орқали фотолюминесценция нурланиши ўтказилади ва фотоэлектрон кучайтиргич ФЭУ га фокусланади. Фотоэлектрон кучайтиргичдан кучланиш фазасезгир вольтметр ФВ ни 1-киришига берилади. ФВ нинг иккинчи киришига фотоқабулқилгич ФПдан таянч кучланиши сигнали берилади. Яримшаффоф кўзгу Z_2 орқали ёруғлик оқимининг бир қисми ФП га йўналтирилади. Кўзгу Z_1 ёруғлик йўналишини ўзгартиришга ишлатилган. Фаза сезгир вольтметр бу кучланишлар орасидаги фаза фарқини ўлчайди. Уйғотувчи лазер нурланиши билан фотодиоддаги таянч кучланиш орасидаги фаза фарқи намунадан

сочилган лазер нуруни, рекомбинацион нурланиши билан бир хил оптик йўл ўтишидан ўлчанади. Бу ўлчаш натижаларига кўра, қўзғатувчи ёруғлик оқими билан фотолюминесценция оқими орасидаги фаза силжиши ҳисобланади. Фаза силжишининг аниқлиги 5% тартибида бўлишлиги келтирилган. Юқорида ёритилган бу усулни арсенид галий эпитаксиал қатламларга ҳам қўллаш мумкин.

4.4 §. Ток импульси инжекциясига асосланган номувозанат заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлаш усуллари

а. τ ни нуқтавий контактда ўтказувчанликнинг модуляцияси бўйича ўлчаш усуллари

Яримўтказгич материалларини, асбобларини ишлаб чиқариш жараёнида монокристалл қуйма (слиток) ўзак (стержень) намуналарида заряд ташувчилар яшаш вақти τ ни ўлчашга тўғри келади. Бундай намуналарда τ ни ўлчаш учун унинг кўндаланг кесимининг сиртига инжекцияловчи металл контакт (зонд) жойлаштирилади. У номувозанат асосий бўлмаган заряд ташувчилар учун эммитер вазифасини бажаради. Намунага бундан ташқари, юзаси катта, қаршилиги кичик омик контакт олинади. Нуқтавий контакт орқали юборилган иккиланган импульсли генератордан ток режимида тўғри йўналишда амплитудаси I_0 , давомийлиги t_0 бўлган тўғри бурчакли ток импульси намунада номувозанат заряд ташувчиларни инжекциялайди ва контакт атрофидаги қаршилиқни камайтиради.

Инжекцияловчи ток импульси тугагандан бироз вақт ўтгач (кечикиш вақти t_1 бўлган), амплитудаси, давомийлиги биринчи импульсни билан бир хил бўлган иккинчи тўғри бурчакли импульс узатилади. Агар икки импульс орасидаги вақт t_2 , яъни иккинчи импульсининг кечикиш вақти t_2 заряд ташувчилар яшаш вақти τ дан кичик ёки унинг тартибида $t_2 \leq \tau$ бўлса, иккинчи импульсининг контактга келиш пайтида номувозанат заряд ташувчилар рекомбинацияланиб улгурмайди ва намуна контакт соҳаси қаршилиги биринчи импульс келгунча бўлган қийматидан кичик бўлади. Шунинг учун иккинчи импульс бош-

ланган пайтда вужудга келган кучланиш импульсининг амплитудаси $I_2(t_3)$ биринчи кучланиш импульс амплитудаси $I_1(\infty)$ дан кичик бўлади.

Кучланиш импульслари амплитудаларининг айирмаси

$$\Delta U(t_3) = U_1(\infty) - U_2(t_3) = f(t_3, t) \quad (4.88)$$

Иккинчи импульсининг кечикиш вақти t_3 га ва заряд ташувчилар яшаш вақти τ га боғлиқ. Нуқтавий контактдан инжекцияланган заряд ташувчилар намуна сиртига томон, ичига томон диффузияланади ва рекомбинацияланади ҳамда ток импульси давомийлиги t_3 ичида электр майдон таъсирида дрейфланади. Натижада, улар қандайдир r_1 масофагача тарқалади. У соҳанинг катталиги ток импульсининг давомийлигига ва ток кучига боғлиқ. $\Delta U(t_3) = f(t_3, \tau)$ нинг назарий боғланишини ҳисоблаш учун металл зонд (контакт)нинг яримўтказгич намунаси билан контактланишнинг сирти радиуси r_0 бўлган яримшардан иборат деб фараз қиламиз.

Биринчи ток импульси бошланиш пайтида контакт атрофида номувозанат заряд ташувчилар бўлмайди. Ўтказувчанликнинг мувозанат заряд ташувчилар концентрацияси аниқлайди. Шунинг учун биринчи кучланиш импульсининг амплитудаси

$$U_1(\infty) = \int_{r_0}^{\infty} \frac{I_0 \rho_0}{2\pi r^2} dr = \int_{r_0}^{\infty} \frac{I_0}{2\pi r^2 \sigma_0} dr = \frac{I_0}{2\pi r_0 \sigma_0} \quad (4.89)$$

билан ифодаланади. Бу ерда: σ_0 — мувозанатий солиштира ўтказувчанлик. Инжекция бошланиши билан контакт қаршилиги камая боради. Инжекцияловчи ток импульсининг амплитудаси I_0 ва мос равишда электр майдон кучланганлиги шундай каттаки, импульс давомийлиги t_3 ичида заряд ташувчиларнинг бикутбий диффузияси эътиборга олинмайди. У ҳолда кичик даражали инжекция $\Delta n, \Delta p \ll n_0 + p_0$ да t_3 вақт ичида заряд ташувчилар радиуслари r_0 дан r_1 гача бўлган (шар) сферик қатламни тўлдирадilar. (4.88) да келтирилган $U_1(\infty)$ инжекцияловчи биринчи ток импульсининг олди фронтига мос келган кучланиш импульсининг (максимал) қийматини, $U_2(t_3)$ — ток импульсининг контактга келиш пайтидаги кучланиш

тушувини англатади. Шундай қилиб, бир хил параметр-ли иккиланган импульслардан вужудга келган $U_1(\infty)$ ва $U_2(t_s)$ кучланишларнинг фарқини, иккинчи импульс бош-ланиш пайтида биринчи ток импульсидан ҳосил бўлган номувозанат заряд ташувчилар билан намуна ўтказувчан-лигини модуляцияланган ҳолатда бўлишлиги билан ту-шунтирилади. Номувозанат заряд ташувчилар тақсимо-ти сферик симметрия бўйича бўлганда (4.88)

$$\Delta U(t_s) = \frac{I_0}{2\pi} \int_{r_0}^{\gamma} \left[\frac{1}{\sigma_0} - \frac{1}{\sigma} \right] \frac{dr}{r^2} \quad (4.90)$$

билан ифодаланади. Бу ерда, $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$ номувозанат со-лиштирма ўтказувчанлик. Кичик даражали инжекцияда Δn , $\Delta p \ll n_0 + p_0$ да $\Delta\sigma \ll \sigma_0$ бўлади. Бу ҳолда (4.90)

$$\Delta U(t_s) = \frac{I_0}{2\pi\sigma_0} \int_{r_0}^{\gamma} \frac{(b+1)\Delta p(r, t)}{n_0 + b \cdot p_0} \frac{dr}{r^2} \quad (4.91)$$

кўринишга келади. Маълумки сиртий рекомбинация но-мувозанат заряд ташувчиларнинг сиртига йўналган диф-фузия оқимини вужудга келтиради ва нуқтавий контакт-дан инжекцияланган заряд ташувчиларнинг сферик сим-метрия бўйича тақсимотининг бузилишига олиб келади.

Заряд ташувчиларнинг намуна ичига йўналган дрейф оқими сиртта йўналган диффузион оқимидан катта, яъни сиртий рекомбинация тезлиги кичик, намунада электр майдон кучланганлиги катта бўлганда уларнинг фазовий сферик симметрия бўйича тақсимо-ти сақланади. Бу шарт намуна сирти учун

$$\mu_p \bar{E} \gg S \text{ ёки } \frac{I_0 \mu_p}{2\pi r_0^2 \sigma_0} \gg S \quad (4.92)$$

кўринишда бўлади. (4.91) даги $\Delta p(r, t)$ нинг назарий ифо-даси заряд ташувчиларнинг биринчи ток импульси даво-мийлиги t_n ичидаги ва иккинчи импульс кечикиш вақти t_s ичидаги тақсимотларини аниқлаш орқали ҳисобланади. Биринчи ток импульси давомийлиги ичида инжекция-

ланган заряд ташувчиларнинг вақт бўйича ўзгаришини (4.92) шарт бажарилганда дрейф, рекомбинация жараёнлари аниқлайди. Шунинг учун сферик симметрия бўйича тақсимланган номувозанат заряд ташувчиларнинг t_u вақт ичида ўзгариши

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\mu_p E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (4.93)$$

узлуксизлик тенгламадан аниқланади. (4.93) тенгламанинг бошланғич

$$\Delta p(r, t)/_{t=0} = 0 \quad (4.94)$$

чегаравий

$$\Delta p(r, t)/_{r=r_0} = \Delta p(r_0) \quad (4.95)$$

шартларни қаноатлантирувчи ечими

$$\Delta p(r, t_u) = \Delta p(r_0) \exp \left[-\frac{2\pi\sigma(r_1^3 - r_0^3)}{3\mu_p I_0 \tau_p} \right] \quad (4.96)$$

бўлади. Ток импульсидан инжекцияланган заряд ташувчиларнинг намунага кириб бориш масофаси r_1 билан импульс давомийлиги t_u орасидаги боғланиш

$$\frac{dr}{dt} = \mu_p E = \frac{\mu_p I_0}{2\pi r^2 \sigma} \quad (4.97)$$

тенгламадан топилади. Бу тенгламани интеграллаб,

$$t_u = \frac{2\pi(r_1^3 - r_0^3)}{3\mu_p I_0 \sigma} \quad (4.98)$$

ёки

$$r_1 = \left[\frac{3\mu_p I_0 \sigma}{2\pi} t_u + r_0^3 \right]^{1/3} \quad (4.99)$$

булишлигини кўрамиз. Шундай қилиб, r_1 — номувозанат ошиқча заряд ташувчилар тўпланиш соҳасининг чегарасини англатади. Демак, (4.96) ифода r ни

$$r_0 < r < \left[\frac{3I_{0\text{сжр}}}{2\pi} t_u + r_0^3 \right]^{1/3} \quad (4.100)$$

соҳасидаги заряд ташувчиларнинг тақсимотини аниқлар экан.

Биринчи ток импульсининг тугашидан иккинчи ток импульси бошлангунча бўлган вақт оралиғида, яъни кечикиш вақти t_u ичида номувозанат заряд ташувчиларнинг вақт бўйича ўзгаришини, уларнинг диффузия, рекомбинация жараёнлари аниқлайди. Шунинг учун t_u ичида асосий бўлмаган заряд ташувчилар тақсимот функцияси

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} + D_p \operatorname{divgrad} \Delta p \quad (4.101)$$

узлуксизлик тенгламаси орқали топилади. Намуна сирт рекомбинацияси тезлиги кичик, зонд контакт соҳасида $S \rightarrow \infty$ бўлади, деб фараз қилсак, (4.101) даги Δp фақат бир координата r билан вақт функцияси бўлади. Заряд ташувчиларнинг сферик симметрия бўйича тақсимооти сақланади. Шунинг учун

$$\Delta p(r, t) = \Delta p_0(r, t) e^{-\frac{1}{\tau_p}} \quad (4.102)$$

кўринишда қидирамиз. (4.101) тенгламанинг

$$\Delta p(r, t) / r = 0 \quad (4.103)$$

чегаравий шартни ва (4.96) билан аниқланган

$$\Delta p(r, t) / r = \Delta p(r_0, t_u) \quad (4.104)$$

бошланғич шартни қаноатлантрувчи ечими топилади, сўнг (4.91) интеграл ҳисобланади. Назарий ҳисоблашлар таҳлили шуни кўрсатадики,

$$r_0 \ll \sqrt{Dt_3} \quad (4.105)$$

ҳамда инжекцияланган заряд ташувчилар кириб борган масофа r_1 кичик

$$\left[\frac{3\mu_p I_0 \sigma}{2\pi} t_n + r_0^3 \right]^{1/3} \ll 2\sqrt{Dt_3} \quad (4.106)$$

бўлганда (4.91) интеграл

$$\Delta I(t_3) = \text{const} \left(\frac{t_3}{\tau_p} \right)^{-3/2} \exp \left(-\frac{t_3}{\tau_p} \right) \quad (4.107)$$

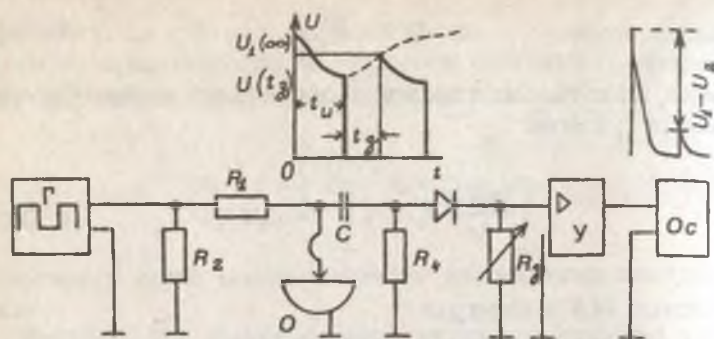
билан ифодаланади. Акс ҳолда ошиқча номувозанат заряд ташувчиларнинг намунага кириб бориш масофаси жуда катта бўлса, $\Delta I(t_3)$ боғланиш экспонента қонуни

$$\Delta I(t_3) = \text{const} \cdot e^{-\frac{t_3}{\tau_p}} \quad (4.108)$$

бўйича бўлади. Амалиётда

$$\frac{2\pi\sigma_0}{3\mu_p I_0 \tau_p} (4Dt_3)^{3/2} \ll \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (4.109)$$

тенгсизлик бажарилганда $\Delta I(t_3)$ нинг ўзгариши (4.109) қаби қонуният бўйича содир бўлади. Одатда, бу шартни катта ток кучида ва кечикиш вақти τ_p дан $3\tau_p$ гача бўлган оралиқда бўлган ҳолда амалга ошириш мумкин. Нуқтавий контактда ўтказувчанликнинг модуляция усули билан τ ни ўлчаш қурилмасининг чизмаси 4.8-расмда келтирилган. Иккиланган импульсли генератор Γ дан инжекцияловчи нуқтавий контактга R_1 қаршилик орқали параметрлари бир хил бўлган иккита ток импульси юборилади. Қаршилиги катта бўлган R_1 қаршилик билан генераторнинг кучланиш импульсини контактдан оқаётган ток импульсига айлантиради. Нуқтавий контактда ҳосил бўлган кучланиш импульси диодли V_D чеклагич орқали



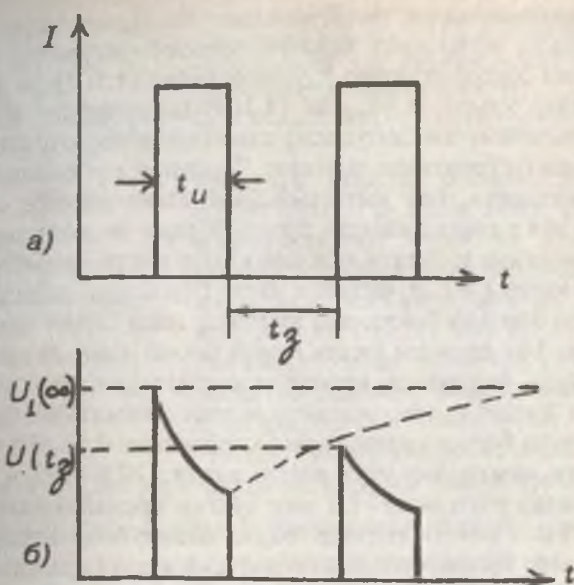
4.8-расм. Нуқтавий контакт ўтказувчанлигини модуляция қилиш усули билан заряд ташувчилар яшаш вақтини ўлчаш қурилмасининг схемаси. Γ — тўғри бурчакли импульс генератори O_c — осциллограф.

кучайтиргич U билан кучайтирилади ва осциллограф O киришига берилади. Иккиланган импульсли генераторнинг синхронловчи импульси осциллограф синхронловчи каналига берилади.

Бу импульс биринчи кучланиш импульсининг келиш пайтида осциллограф ёйилмаси (развертки) ни ишга солади ва осциллограммани тургун ушлаб туради. Иккинчи ток импульсининг кечикиш вақтини $\tau < t_3 < 3\tau$ оралиқда ўзгатириб (4.9-расм), унинг ҳар бир қийматига мос келган контактдаги кучланиш амплитудаларининг қиймати осциллограммадан қайд қилиниб, $\Delta U(t_3) = U_1(\infty) - U_2(t_3) = f(t_3)$ ҳисобланади ва $\ln[U_1(\infty) - U_2(t_3)] = f_1(t_3)$ тўғри чизиқли боғланишининг оғиш бурчаги тангенсидан

$$\tau_p = tg \theta = \frac{\Delta t_3}{\Delta \ln [U_1(\infty) - U_2(t_3)]}$$

заряд ташувчилар яшаш вақти топилади. Номувозанат заряд ташувчиларнинг нуқтавий контактда яхши инъекцияланиши учун $\frac{\Delta U_1}{U_1} \approx 0,1$ тартибда бўлиши керак. U_1 — биринчи кучланиш амплитудаси, ΔU_1 импульснинг модуляцияланган қисми. Буни амалга оширишда p — типдаги



4.9-расм. Намунада ток (а) ва қучланиш импульси (б).

кремний намуналарида фосфорли бронза зонди, n — типдаги намуналарида эса алюминий зонди қўлланилади.

Яхши инжекцияловчи нуқтавий контактни олиш учун одатда контактга ишлов берилади. Бунинг учун контактга қучланиши 300—400 В бўлган ўзгармас ток манбаи қисқа муддатга уланади, бошқача айтганда, сифими катта зарядланган конденсатор контакт орқали разрядланади (зарядсизланади). Одатда, монокристалл қуйма намуналарда τ ни ўлчашда уни ён томонига юзаси 1 см^2 дан кам бўлмаган палладий, никель пардаларини ўтказиш ёки индий-галлий, алюминий-галлий пасталарини суркаш билан Ом контакти олинади.

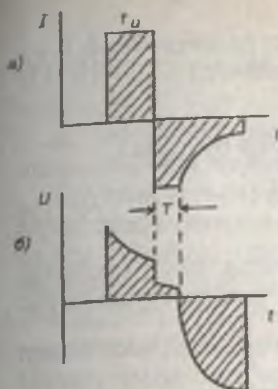
Шайба шаклдаги намуналарда τ ни ўлчашда 4-жадвалда келтирилган заряд ташувчиларнинг сиртий яшаш вақтини эътиборга олиш керак. Қалин шайбаларда бу усул билан ўлчанган τ ҳам намуна сиртий рекомбинация тезлигига қучсиз боғланган. Одатда, импульсларнинг такрорланиш частотаси $50 \div 200$ Гц тартибда олинади. Чун-

ки иккита кетма-кет келаётган импульслар орасидаги вақтда намуна мувозанат ҳолатга эришиб улгуриши керак. Назарий ҳисобларнинг кўрсатишича, (4.107) ва (4.108) ифода-лар ҳамда (4.105) ва (4.109) шартлардан τ га ток импульсининг амплитудаси, давомийлиги, кечикиш вақти таъсир кўрсатиши мумкин. Тажриба натижаларининг тасдиқлашича, ток импульсининг давомийлиги ошиши билан эса τ нинг қиймати ортиб боради ва импульс давомийлигининг қиймати ҳажмий яшаш вақти тартибида ёки ундан катта $t_{\text{н}} \geq 1,5\tau$ бўлса, τ нинг $t_{\text{н}}$ га боғланиши тўхтайди. Ана шундай боғланиш импульс токи билан ҳам кузатилади. Ток ортиши билан τ орта бориб доимий қийматга интилади. Акс ҳолда, кечикиш вақтининг кичик қийматларида ўлчаш τ нинг пасайтирилган қийматини беради.

Бу усул билан солиштирма қаршилиги $0,5 \div 500$ Ом. см p — тип намуналар учун яшаш вақти $\tau > 2,8$ мкс, n — тип намуналар учун эса $\tau > 7,7$ мкс бўлган кремний намуналарида ўлчаш тавсия этилади. Заряд ташувчилар яшаш вақти $\tau < 100$ мкс бўлса, сайқалловчи кукун билан сайқалланган намуналарда τ ни ўлчаш мумкин. Одатда τ ни ўлчаш оралиқ даражали инжекция $\Delta p \sim p_0$ да ўтказилади. Бунда ёпишиш марказлари заряд ташувчилар билан тўлдирилади ва таъсири йўқотилади. Тажриба ўтказишда юқорида қайд қилинган шартлар бажарилганда τ ни ўлчаш хатоси $+20\%$ дан ошмайди. Бу усулнинг бошқа усулларга нисбатан афзалликларига коллектор контактини олиш талаб этилмаслигини, сирт ҳолатига кам сезгирлигини, τ ни температурага боғлиқлигининг енгил ўлчанишини, усулни солиштирма қаршилиги $0,1:100$ Ом. см тартибида бўлган яримўтказгичларда, масалан, кремний, германий, галлий арсенидга қўллаш мумкинлигини кўрсатиш лозим.

б. Р-п ўтиш орқали τ ни заряд ташувчилар инжекциясига асосланган ўлчаш усули

Бу усулни p - n ўтишнинг ўтиш (переходной) тавсифидаги тескари токининг тикланиш вақтини ўлчашга асосланган. Унинг моҳияти шундан иборатки, p - n ўтишга тўғри йўналишда ток юборилади ва бир оз вақтдан сўнг ток қутби кескин ўзгартирилади (тескари йўналишдаги ток импульси уланади). P - n ўтишдан олинган кучланиш ва ток осциллограммалари 4.106, в-расмда келтирилган кўри-



4.10-расм. Ўткинчи жараёнларнинг p - n ўтишдаги ток (а), кучланиш (б) осциллограммаси. t_u — импульс давомийлиги; t_s — импульс кечикиш вақти.

нишдаги шаклда бўлади. Бунда содир бўлган p - n ўтишдаги физик жараёнларни қисқача таҳлил қилайлик. Тўғри йўналишдаги ток импульси берилган пайтда диод ичида (қатламида) асосий бўлмаган номувозанат заряд ташувчилар инжекцияланади. Бир оз вақтдан сўнг диодда стационар ҳолат ўрнатилади. Кичик даражали инжекция

$\Delta n, \Delta p \ll n_0 + p_0$ да узун диодларда заряд ташувчиларнинг тақсимооти $\Delta p(x) = \Delta p(0) l \frac{1}{r}$ билан аниқланади. Токнинг қутбини ўзгартиргандан сўнг инжекцияланган заряд ташувчилар концентрацияси уларнинг рекомбинацияси ва p - n ўтиш орқали тортиб (сўрилиб) олиниши туфайли камаяди. P - n ўтиш соҳасининг яқинида заряд ташувчилар концентрацияси мувозанатий заряд ташувчилар концентрациясидан катта бўлгани учун p - n ўтиш очиқ ҳолатда бўлиб, кучланиш мусбат, ток диодга уланган қаршилиқ билан чекланган бўлади. Вақт ўта бошлаши билан p - n ўтиш ёпила бошлайди, бу жараён тескари токнинг тўйиниш токига тенг бўлгунча давом этади. Номувозанат заряд ташувчиларнинг яшаш вақти қанча катта бўлса, уларнинг йўқолиши шунча кўп вақт давом этади. Назарий ҳисоблашларнинг, тажриба натижаларининг кўрсатишича, диоддаги тўғри йўналишдаги токнинг тескари йўналишдаги токка уланишдан ҳосил бўлган кучланиш, ток зинапоялари давомийлиги T заряд ташувчилар яшаш вақти τ , тўғри ток I_{np} ва тескари ток $I_{обp}$ билан қуйидаги муносабат билан боғланган:

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{T}{\tau}} = \frac{I_{np}}{I_{np} + I_{обp}} \quad (4.110)$$

Бу ерда:

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{T}{\tau}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\sqrt{\frac{T}{\tau}}} \exp(-\xi^2) d\xi \quad (4.111)$$

Тўғри ток тескари токка тенг $I_{\text{пр}} = I_{\text{обр}}$ бўлганда,

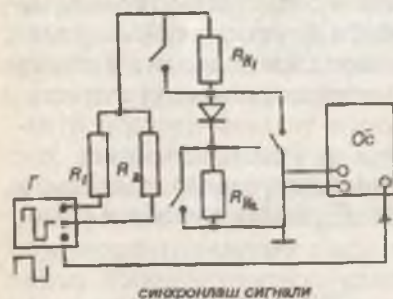
$$T = 0,23\tau \quad (4.112)$$

бўлади. Бу усулни нисбатан катта бўлган заряд ташувчилар яшаш вақти τ ни аниқлашга ҳам татбиқ қилиш мумкин. Ҳисоблаш формуласи (4.110) ни $\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} \leq 2$ тенгсизлик бажарилган ҳолда фойдаланиш мумкин.

Бу усул билан τ ўлчаш қурилмасининг чизмаси 4.11-расмда келтирилган. Биринчи иккинчисининг кетидан кетувчи мусбат, манфий қутблик ток импульсини олиш имконини берадиган иккиланган импульсли (масалан, Г-5-7А, ГИС-2 типидagi) генератор қўлланилади. Генератордан мусбат ва манфий қутбли бўлган иккиланган ток импульси p - n ўтишга берилганда осциллограф 0 билан кучланиш, ёки ток осциллограммаси қайд қилинади.

Осциллограф генераторнинг синхронловчи импульси билан кутиш ёйилмаси режимида ишлайди, бу билан осциллограммани осциллограф экранида турғун тутган бўламин.

Усулни бошқа бир вариантда кичик заряд ташувчилар



4.11-расм. P - n ўтишда инжекция-экстракция усули билан τ -ни аниқлаш қурилмасининг схемаси.

лар яшаш вақтини ўлчаш учун p - n ўтишга тескари йўналишда доимий кучланиш қўйилган бўлади, қандайдир вақтда (фурсатда) генератордан орқа фронти тик бўлган қисқа импульс берилади. Бу усул билан бир неча наносекунддан то 10^{-4} с гача бўлган заряд ташувчилар яшаш вақтини ўлчаш мумкин.

4.5 §. Номувозанат заряд ташувчилар параметрларини ўлчашнинг стационар усуллари

а. Стационар фотоўтказувчанликдан заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлаш усуллари

Ёруғлик таъсирида яримўтказгичларда номувозанат заряд ташувчиларни генерацияланиши, яъни фотоинжекцияси туфайли, уларнинг қаршилигини ёки ўтказувчанлигининг ўзгаришини (фотоқаршилиқ) фотоўтказувчанлик эффекти (ҳодисаси) деб аталади. Зоналараро электрон ўтишлари билан боғлиқ фотоўтказувчанликнинг узун тўлқин чегараси, хусусий ютилиш чегарасига мос келиб, кўп яримўтказгичларда, масалан, кремний, германий, A_3B_5 туркумидаги яримўтказгичлар учун ёруғлик спектрининг кўзга кўринадиган ва инфрақизил соҳасида ётади.

Узунлиги a , эни b , қалинлиги d бўлган намуна $z=0$ сирти фотон энергияси $h\nu \geq E_A$ бўлган ёруғлик оқими билан ёритилган бўлсин (4.1-расм). Намунада номувозанатий заряд ташувчиларнинг нотекис генерацияланиши содир бўлади ва генерация тезлиги $g = \alpha \beta I_{ph}(1-R)/h\nu$ билан аниқланади. Намунада $a > b \gg d$ бўлсин деб қарасак, унинг эркин ён сиртларидаги рекомбинацияни ҳисобга олмаслик мумкин ва намуна Om контактларидан $(2 \div 3)Z$ масофада бўлган қисми ёритилганда масала бир ўлчамли бўлади ва унинг z — ўқига тик йўналишдаги фотоўтказувчанлик (4.26) га кўра ёпишиш марказлари бўлмаганда, электр нейтраллик шарт $\Delta N = \Delta P$ бажарилган ҳолда

$$\Delta G = \frac{eb}{a}(\mu_p + \mu_n)\Delta P \quad (4.113)$$

кўринишни олади. Бу ерда,

$$\Delta P = \int_0^d \Delta p(z) dz \quad (4.114)$$

Номувозанат заряд ташувчиларнинг ўртача концентрациясини

$$\Delta p_{cp} = \frac{1}{d} \int_0^d \Delta p(z) dz = \frac{\Delta P}{d} \quad (4.115)$$

билан белгиласак, у ҳолда (4.113)

$$\Delta G = \frac{ebd}{a} (\mu_n + \mu_p) \Delta p_{cp} \quad (4.116)$$

билан ифодаланади. Ўзгармас ток манбаига уланган намунадан ўзгармас ток (ток генератори) режимида ток ўтказилганда, фотоинжекцияланган заряд ташувчилардан содир бўлган намунадаги кучланиш тушувининг ўзгариши

$$\Delta V = \Delta R \cdot I = R_0 \Delta G = \frac{\rho^2 ea}{bd} (\mu_n + \mu_p) \Delta p_{cp} \quad (4.117)$$

кўринишда бўлади. (4.114) даги $\Delta p(z)$ ни ёруғлик генерацияси, заряд ташувчиларнинг ҳажмий, сиртий рекомбинациялари ва диффузияси жараёнлари аниқлайди. Шунинг учун $\Delta p(x)$ қуйидаги бир ўлчамли стационар узлуксизлик қуйидаги тенгламанинг ечимидан топилади.

$$\frac{d^2 \Delta p}{dz^2} - \frac{\Delta p}{D_p \tau_p} + \frac{\alpha \beta I_{av} (1 - R_v)}{D_p} e^{-\alpha z} = 0 \quad (4.118)$$

Унинг умумий ечими

$$\Delta p(z) = A \exp\left(\frac{z}{L_p}\right) + B \exp\left(-\frac{z}{L_p}\right) + \frac{D_0 \tau_p e^{-\alpha z}}{1 - \alpha^2 L_p^2} \quad (4.119)$$

кўринишда бўлади. Интеграллаш доимийлари A ва B

$$D_p \left. \frac{d\Delta p(z)}{dz} \right|_{z=0} = S \Delta p(0); \quad D_p \left. \frac{d\Delta p(z)}{dz} \right|_{z=d} = -S \Delta p(d) \quad (4.120)$$

чегаравий шартлардан топилади. Топилган A ва B ларни (4.119) га қўйиб, (4.115) дан Δp_{cp} ҳисобланади. Умуман олганда Δp_{cp} ни ифодаси катта, тажриба натижаларини таҳлил қилишга мураккаблик қилади. Лекин унинг асосида кўп хусусий ҳолларни таҳлил қилиш мумкин ва амалиётда татбиқ қилиш учун қулай соддалашган ифодаларни олиш мумкин. Буларнинг баъзи бирини кўрайлик.

1. Ёруғликни кучли даражадаги ютилиш $h\nu \geq E_g$ соҳасида номувозанат заряд ташувчиларнинг сиртий генерацияси

цияси содир бўлади. Бу соҳада сиртий генерация тезлиги g_s , см²/с $\alpha d \gg 1$, $\alpha L \gg 1$; $\alpha \gg \frac{S}{D_p}$ бўлади. Булардан ташқари, намуна юпқа $d/Z_p \ll 1$ деб фараз қилсак, унда

$$\Delta p_{cp} = \frac{g_s}{d} \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_p} + \frac{2S}{d} \right)} \quad (4.121)$$

кўринишга келади. Фотоўтказувчанликда ҳажмий рекомбинация аниқловчи жараён бўлса, $\frac{1}{\tau} \gg \frac{2S}{d}$ бўлади. У ҳолда

$$\Delta p_{cp} = g_s \tau_p / d \quad (4.122)$$

билан ифодаланади. Агар фотоўтказувчанликка сирт рекомбинациясининг таъсири ҳажмий рекомбинацияга нисбатан катта, яъни сирт рекомбинацияси тезлиги катта, намуна юпқа бўлса, $\frac{2S}{d} \gg \frac{1}{\tau}$ бўлади ва Δp_{cp} нинг ифодаси

$$\Delta p_{cp} = g_s / 2S \quad (4.123)$$

кўринишга келади.

2. Намунада ёруғликни кучсиз ютилиш соҳасида номувозанат заряд ташувчиларнинг ҳажмий генерацияси, яъни текис генерацияланиши содир бўлади. Бу ҳолда ҳажмий генерация тезлиги $g_0 = \alpha \beta I_{0v} (1 - R_v) \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ $\alpha Z_p \ll 1$, $\alpha d \ll 1$, қалин намуна $d \gg Z_p$ учун эса

$$\Delta p_{cp} = g_0 \tau_p \quad (4.124)$$

бўлади, намуна юпқа $d \ll Z_p$ сирт рекомбинацияси тезлиги катта бўлганда,

$$\Delta p_{cp} = \frac{g_0 d^2}{12 D_p} \quad (4.125)$$

кўриниш олади. Энди юқорида келтирилган муносабатлар асосида тажрибадан τ ва S ни аниқлашни кўрайлик.

Тажрибада ёритилган намунада фотоўтказувчанликдан содир бўлган кучланиш тушувининг ўзгаришини ўлчаб, (4.117) дан τ ни S ни аниқлаш мумкин. Стационар фотоўтказувчанликни қайси параметрлар (τ , s) аниқлашини текшириш учун ҳар хил қалинликдаги намуналарда ўлчов ўтказиш мақсадга мувофиқ бўлади. Агар сигнал ΔV намуна қалинлиги d ни камайиши билан $\frac{1}{d^2}$ бўйича ортиб

борса, (4.117) ва (4.122) ларга кўра, ΔV га асосий таъсир кўрсатувчи параметр τ бўлади. Агар асосий таъсир кўрсатувчи параметр S бўлса, намуна қалинлигининг камайиши билан сигнал ΔV (4.117) ва (4.123) га кўра $\frac{1}{d}$ бўйича ортиб боради.

Ўлчанган ΔV бўйича τ ёки S ни аниқлаш учун бундан ташқари заряд ташувчиларнинг сиртий ёки ҳажмий генерация тезликларини билиш керак бўлади. Коэффициентлари α β маълум бўлган яримўтказгичлар учун намунага тушаётган ёруғлик интенсивлиги I_0 ни билиш етарли бўлади. Бунинг учун ёруғлик спектрининг тегишли соҳасига сезгир, олдиндан даражаланган исталган фотоқабул қилгичларни қўллаш мумкин. α ва β коэффициентлари ноаниқ бўлган ҳолларда генерация тезлиги g ни аниқлаш учун текширилаётган материаллардан ясалган потенциал тўсиқли (p - n ўтиш, p - i - n ва Шоттки диодлари) фотоқабулқилгичларни қўллаш мақсадга мувофиқдир. Бу фотоқабулқилгичлар бирга яқин ўзгартириш коэффициенти билан квант оқимини заряд ташувчилар оқимига, яъни токка айлантиради, яъни

$$\frac{I}{e} = gV_0 \quad (4.126)$$

бўлади. Бу ерда, V_0 — фотоқабулқилгичнинг ёруғликка сезгир соҳасининг ҳажми. (4.126) дан фототок I ва ҳажми V_0 ни билган ҳолда g аниқланади. Заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини аниқлашда, булардан ташқари, уларнинг ҳаракатчанлиги, намунанинг геометрик ўлчамларини билиш керак бўлади. Бу усулда ҳар хил намуналарда ўлчанган кўп параметрларнинг қатнашиши туфайли, юқори бўлмаган аниқликда 20—30%, баъзан ундан катта бўлган

хатолик билан t , ни аниқлаш мумкин. Лекин бу усул билан заряд ташувчиларнинг жуда кичик яшаш вақтларини 10^{-9} — 10^{-10} с гача ўлчаш мумкин. Стационар фотоўтказувчанлик усули билан t , ни ўлчашдаги асосий хатолик манбаи сифатида ёпишиш марказларининг таъсирини кўрсатиш мумкин. Ёпишиш марказининг таъсири германийда 273 К дан, кремнийда 400 К дан паст температураларда намоён бўлади. А, В, бирикмаларида ёпишиш марказларининг сатҳи оддий элементар яримўтказгичларникидан юқори. Шунинг учун уларга бу усулни қўллаш чекланган. Маълумки, яримўтказгичларда ёпишиш маркази мавжуд бўлса, электрон, ковак яшаш вақтлари тенг бўлмайди. Агар ёпишиш марказлари томонидан ушланган электрон концентрациясини Δn , билан белгиласак, электр нейтраллик шарти

$$\Delta p = \Delta n + \Delta n_2 \quad (4.127)$$

кўринишда бўлади. Электрон, ковакнинг рекомбинация тезликларининг бир-бирига тенглигидан

$$\frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{\Delta p}{\tau_p} = \frac{\Delta n + \Delta n_2}{\tau_p} \quad (4.128)$$

$$\frac{\tau_p}{\tau_n} = 1 + \frac{\Delta n_2}{\Delta n} \quad (4.129)$$

бўлишлигини кўрамиз. Бу стационар фотоўтказувчанликнинг ўзгаришига ҳамда ностационар фототокнинг ўсиши ва пасайишига таъсир кўрсатади. Бу ҳолда янги характеристик катталиқ фотоўтказувчанликнинг эффектив стационар яшаш вақти тушунчаси киритилади. Стационар фотоўтказувчанликни

$$\Delta \sigma_{\text{ст}} = e\mu_n g\tau_n + e\mu_p g\tau_p = e\tau_{\text{эф}}(\mu_n + \mu_p)g \quad (4.130)$$

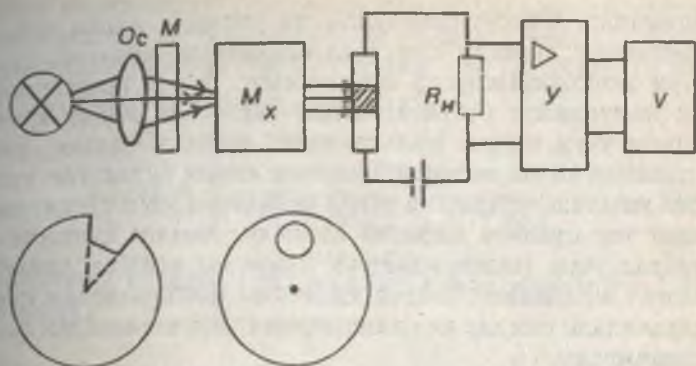
ифодасидан, $\tau_{\text{эф}}$ ни

$$\tau_{\text{эф}} = \frac{\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p}{\mu_n + \mu_p}$$

билан аниқланишини кўрамиз. Стационар фотоўтказувчанликдан топилган заряд ташувчилар яшаш вақти умумий ҳолда электрон, ковак яшаш вақтларига, ҳаракат-

чанликларига боғлиқ. Агар ёпишиш марказларининг концентрацияси кичик $\Delta l_3 \ll \Delta l$ бўлса, уларнинг таъсирини эътиборга олмаслик мумкин. У ҳолда $\tau_{\text{эф}} = \tau_n = \tau_r$ бўлади. Стационар фотоўтказувчанликни ўлчаш усулига асосланган τ ни аниқлаш қурилмаларидан бирининг чизмаси 4.14-расмда келтирилган. Одатда, фотоўтказувчанлик сигнали ΔV кичик даражали инжекцияда $\Delta G \ll G_0$ ўлчанади. ΔV ни ўлчаш шундай режимда ўтказилиши керакки, ΔV билан ΔG орасидаги боғланиш чизиқли бўлсин. Юклама қаршилиқ R_n намуна қаршилиги $(\Delta G + G_0)^{-1}$ дан катта $R_n \gg (\Delta G + G_0)^{-1}$ бўлганда, занжирдан оқётган ток намуна ёритилганда ҳам ўзгармас сақланади. Бу ўзгармас ток (ток генератори) режими деб юритилади. Бунда намунада ўлчанган ΔV билан ΔG орасидаги боғланиш чизиқли $\Delta V \sim \Delta G$ бўлади. Юклама қаршилиқ R_n намуна қаршилиги $(\Delta G + G_0)^{-1}$ дан кичик бўлганда, R_n дан ўлчанган кучланиш тушувининг ўзгариши ΔV билан фотоўтказувчанлик орасидаги боғланиш ҳам чизиқли бўлади. Бу режимда намунани ёритиш намуна ва юклама қаршилиқ орасида муҳим даражада кучланиш (электр майдоннинг) қайта тақсимланишига олиб келмайди, бинобарин, намунага қўйилган электр майдони қоронғида ва ёритилганда ҳам ўзгармас сақланади. Шунинг учун у ўзгармас майдон (кучланиш) режими деб юритилади. Стационар фотоўтказувчанликнинг ёки бошқа фотоэлектрик ҳодисаларни ўлчашда интенсивлиги бўйича тўғри бурчакли модуляцияланган ёруғлик импульсининг давомийлиги оралиғидаги вақт ичида фотоэлектрик жараёнлар стационар ҳолатга эришиб ва иккита кетма-кет ёруғлик импульси орасидаги вақт ичида намуна термодинамик мувозанат ҳолатига келиб улгуриши керак.

Бу шартнинг бажарилиши учун импульс давомийлиги ва икки импульс оралиғидаги вақт фотоэлектрик ҳодисалар (эффектлар)нинг характеристик релаксация вақти t_n , $t_3 > \tau_{\text{рел}}$ дан катта бўлиши керак. Лекин бунда ёруғлик импульсининг кўтарилиш, пасайиш фронтларининг вақтига ҳеч қандай чеклашлар қўйилмайди. Агар ўлчашда синусоида бўйича модуляцияланган ёруғликдан фойдаланилса, унинг даври шундай катта бўлиши керакки, натижада исталган ҳар бир вақтда жараёнларни квазистационар деб ҳисоблаш мумкин бўлсин. Кўпинча ΔV



4.12-расм. Стационар фотоўтказувчанликни ўлчаш схемаси;
 V — вольтметр, M_x — монохраматор; $У$ — кучайтиргич.

уйғотувчи ёруғлик интенсивлигининг $\frac{1}{\tau_p}$ га нисбатан етарли кичик модуляция частоталарида ўзгарувчан сигнал кучайтиргичлари билан ўлчанади. Бу ўлчаш жараёнини осонлаштиради, кичик сигналларга сезгирлигини оширади ва τ_p ни ўлчаш чегарасини кичик қийматлар томонга кенгайтиради. Етарлича катта давомийликли тўғри бурчакли ёруғлик импульсини ҳосил қилиш учун турли модуляторлар қўлланилади. Секторли кўринишда ёриқлари бўлган диск айланганда ёруғлик оқимини даврий равишда дискнинг секторлари ёпиб туради, унинг интенсивлигини модуляциялайди. (4.12-расм): унда тўғри бурчакли ёруғлик импульси ҳосил қилинади. Кўзгусимон модуляторларда айланувчи кўзгудан қайтган ёруғлик нури оптик тизим кириш тирқишини кесиб ўтиб, тўғри бурчакли ёруғлик импульсини шакллантиради. Электродинамик затворли модулятор электр токи ўтиб турган ғалтак билан магнит майдоннинг таъсирлашишига асосланган. Агар ғалтакдан ток импульси ўтказилса, у магнит майдонида силжийди ва ёруғлик оқимини тўсиб турган пардани ҳаракатга келтиради. Бу модуляторлар билан олинган ёруғлик импульсларининг қўтарилиш ва пасаиш вақтларига нисбатан катта (10^{-4} : 10^{-5})С бўлгани учун фотоэлектрик жараёнлар кинетикасини ўрганишга қўлла-

нилмайди. Фотоўтазувчанликни ўлчашда манба нурланишининг керакли спектрал оралиғини ажратиб олиш учун монохроматорлар ишлатилади. Заряд ташувчиларни намунанинг бутун ҳажмида бир текис пайдо қилиб туриш учун оптик филтрлардан фойдаланилади, улар ёрдамида ютиш коэффициентини кичик бўладиган хусусий ютилиш чегарасига тўғри келадиган узун тўлқинларнинг тор оралиғи ажратиб олинади. Амалда кўпинча бу мақсад учун текшириладиган намунада ясалган яримўтказгич модданинг ўзидан қилинган филтрлардан фойдаланилади ёки ҳар хил лазерларнинг нурланишидан фойдаланилади.

б. Фотоўтазувчанликнинг спектрал боғланишидан яримўтказгичлар параметрларини аниқлаш усуллари

Фотоўтазувчанлик ΔG нинг спектрал (ёруғлик тўлқин узунлигига) боғланиши бўйининг узунлиги a , энининг узунлиги b , қалинлиги d дан катта $a > b \gg d$ бўлган пластина шаклидаги намуна стационар фотоўтазувчанлик (4.113) ифодасига кирган (4.114) билан ифодаланган ΔP нинг таҳлили асосида ўрганилади. Номувозанат заряд ташувчилар тақсимооти $\Delta p(z)$ узлуксизлик тенглама (4.11)сининг чегаравий шартлари (4.120) ни қаноатлантирувчи ечимидир.

Ютилиш коэффициенти (тўлқин узунлиги) ҳар хил бўлган ёруғлик орқали яримўтказгични уйғотиш билан, унинг ҳажмида, сиртида заряд ташувчиларнинг диффузия, рекомбинация жараёнлари учун ҳар хил шароит яратиш мумкин. Тажриба натижаларидан, назарий текширишлардан маълумки, ёруғликнинг хусусий ютилиш чегарасининг кичик спектрал оралиғи $\Delta h\nu = 0,1 \div 0,2$ эВ да ютилиш коэффициенти зоналар тузилишига қараб 0 дан то 10^5 см^{-1} гача ўзгаради. Ёруғликнинг хусусий ютилиш спектрининг қисқа тўлқин узунлик соҳасида ютилиш коэффициенти катта, шунинг учун заряд ташувчиларнинг сиртий генерацияланиши содир бўлади. Ҳисоблашларнинг кўрсатишича $ad \gg 1$ бўлганда, (4.114) ифода

$$\Delta P = \frac{g_0 \tau}{\alpha} \left[\frac{1 + \frac{sZ}{D} \frac{1}{1 + \alpha Z}}{1 + \frac{sZ}{D} - \text{cth} \frac{d}{2Z}} \right] \quad (4.131)$$

билан аниқланади. Ёруғликни намунадан қисман қайтишини ҳисобга олганда генерация тезлиги $g_0 = \alpha \beta I_0 (1 - R_p) / h\nu$ кўринишда бўлади. Намуна қалин $d \gg 2L$ бўлса, ($d > 4Z$ етарли), $\text{cth} \frac{d}{2L} \approx 1$ бўлади ва (4.131)

$$\Delta P = \frac{g_0 \tau}{\alpha} \frac{1}{1 + sL/D} \cdot \left(1 + \frac{sL}{D} \frac{1}{1 + \alpha L} \right) \quad (4.132)$$

кўринишда бўлади. Ёруғликнинг кучли ютилиш $\alpha Z \gg 1$ соҳасида

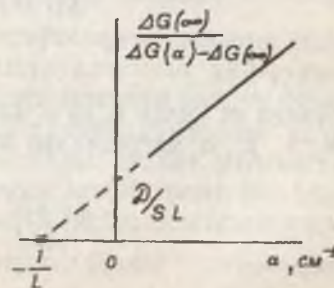
$$\Delta P = \frac{g_0 \tau}{\alpha} \frac{1}{(1 + sL/D)} \cdot \left(1 + \frac{s}{D} \frac{1}{\alpha} \right) \quad (4.133)$$

билан ифодаланadi. ΔP ютилиш коэффициентининг ортиши билан α га боғлиқ бўлмаган, лекин сиртий рекомбинация тезлигига боғлиқ бўлган асимптотик қийматга интилади. $\alpha \rightarrow \infty$ да

$$\Delta P(\infty) = \frac{I_0 \beta}{h\nu} \frac{1}{(1 + sL/D)} \quad (4.134)$$

кўринишни олади. Хусусий ютилиш спектрининг узун тўлқини узунлик соҳасида ютилиш коэффициенти α камайиши туфайли, фотоўтазувчанлик ΔG кескин камаяди. Шундай қилиб, хусусий ютилиш соҳасида ΔG максимумга эришади (4.13-расм). (4.131) ва (4.134) ифодалар билан аниқланadиган стационар фотоўтазувчанлик ΔG

4.13-расм. $\frac{\Delta G(\infty)}{\Delta G(\alpha) - \Delta G(\infty)}$
нисбатнинг ёруғликни ютилиш
коэффициенти α га боғлиқлиги.



нинг ифодаси (4.113) га тўғридан-тўғри фотон энергияси ёки ёруғлик тўлқин узунлиги кирмаган бўлса ҳам $\Delta G(h\nu)$ ёки $\Delta G(\lambda)$ боғланиш мавжудлигини кўрамиз. ΔG нинг бу спектрал боғланиши ёруғликнинг ютилиш коэффициенти α ни, заряд ташувчилар квант чиқиш коэффициенти β ни, ёруғликнинг намунадан қайтиш коэффициенти R ни ёруғлик тўлқин узунлигига боғлиқлиги туфайли намоён бўлади. Фотоўтказувчанликнинг спектрал боғланиши $\Delta G(\alpha)$ ёки $\Delta G(\lambda)$ ни уч соҳага ажратиш мумкин. ΔG ни $\frac{1}{\alpha}$ билан чизикли боғланиш соҳасига ΔG ни асимптотик қиймат $\Delta G(\infty)$ га эришиш соҳасига ҳамда α нинг камайиши билан ΔG ни камайиш соҳасига ажратиш мумкин. ΔG нинг $\frac{1}{\alpha}$ билан боғланиш соҳаси (4.133) ифодага кўра,

$$\Delta G\left(\frac{1}{\alpha}\right) = h_1 \left(1 + \frac{1}{a_1} \frac{1}{\alpha}\right) \quad (4.135)$$

билан ифодаланиши мумкин. Бу боғланишдан h_1 ва $a_1 = \frac{D}{S}$ катталиклар топилади. Бунинг учун ёруғлик инъекциясининг тегишли соҳасидаги ҳар хил тўлқин узунликда ҳар хил ютилиш коэффициенти α да ΔG нинг ўлчаб $\Delta G = f\left(\frac{1}{\alpha}\right)$ боғланиш чизилади. Агар намунанинг бошқа томонида сиртий рекомбинация тезлиги S_2 бўлса, бу томонини ёритишдаги фотоўтказувчанлик

$$\Delta G' = h_2 \left(1 + \frac{1}{a_2} \frac{1}{\alpha}\right) \quad (4.136)$$

бўлади ва ундан h_2 ва a_2 катталиклар топилади. Топилган h_1 , h_2 , a_1 , a_2 катталиклар асосида диффузион узунлик Z_D

$$L_D th\left(\frac{d}{2L}\right) = \frac{h_2 - h_1}{h_1/a_1 - h_2/a_2} \quad (4.137)$$

формула билан ҳисобланади. Агар қарама-қарши томон-лариди $S_1 = S_2$ бўлса, у ҳолда намуна сиртига икки хил иш-лов берилади. Икки хил ишловдан ўтган намуна фото-ўтказувчанликдан топилиган a_2, a_1 катталиклар орқали Z ни

$$L_D \cosh\left(\frac{d}{2L}\right) = \frac{h_2 - h_1}{h_1/a_1 - h_2/a_2} \quad (4.138)$$

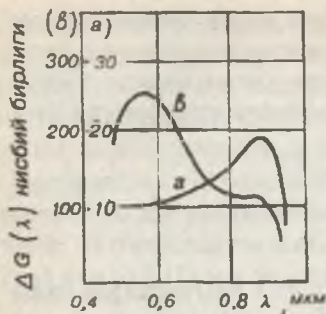
ифода билан топилади. Қалин $\frac{d}{2Z_D} \gg 1$ намуналарда икки ҳолатда ҳам

$$Z_D = \frac{h_2 - h_1}{h_1/a_1 - h_2/a_2} \quad (4.139)$$

формула билан топилади. Бу усул билан Z_D ни топишда ΔG ни мутлақ қийматини билиш шарт эмас ҳамда Z_D ни ҳисоблашга керакли маълумотлар битта тажрибадан оли-нади. (4.133) ва (4.134) формулалар асосида

$$\frac{\Delta G(\infty)}{\Delta G(\alpha) - \Delta G(\infty)} = \frac{\Delta P(\infty)}{\Delta P(\alpha) - \Delta P(\infty)} = \frac{D}{S} (1 + \alpha L) \quad (4.140)$$

кўринишдаги боғланишни оламиз. Ундан фойдаланиш учун тажрибада аниқланган фотоўтказувчанлик $\Delta G(\alpha)$ нинг спектрал боғланишидан $\frac{\Delta G(\infty)}{\Delta G(\alpha) - \Delta G(\infty)}$ нисбатнинг α га боғланиш графиги чизилади. Бу боғланишнинг го-ризонтал ўқ билан кесишиш кесмасидан $L = -\frac{1}{\alpha}$ верти-кал ўқ билан кесишишидан $\frac{D}{SL}$ лар қиймати топилади (4.14-расм). Шундай қилиб, фотоўтказувчанликнинг спек-трал боғланишидан заряд ташувчиларнинг диффузион узунлигини, агар диффузия коэффициентини маълум бўлса, сиртий рекомбинация тезлигини аниқлаш мумкин. Ёруғ-ликнинг ютилиш коэффициентининг тўлқин узунлигига боғланиши юпқа намуналарнинг шаффофлик коэффи-циентидан ўлчаниши мумкин. (4.135) боғланишдан ярим-ўтказгич параметларини аниқлашда ΔG нинг $\frac{1}{\alpha}$ га боғланиш



4.14-расм. Солиштира
қаршилиги $r=150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ n -тип
кремний намунаси зоналарида
эгриланиш кичик (а) ва катта
(б) бўлганда
фотоўтказувчанликнинг
спектрал тақсимооти.

графикда унинг чизиқли боғланиш ҳамда асимптотик соҳаси мавжуд бўлишligини, α , β , R_s ларни текшириладиган спектрал соҳасида тўлқин узунлигига, сиртий ишловига кучсиз боғланишда бўлишligини назарда тутиш лозим. Шунинг эслатиб ўтиш жоизки, юқорида ёритилган фотоўтказувчанликнинг спектрал боғланишидан яримўтказгичлар параметрларини аниқлаш усули намуна ҳажмида сиртида электр нейтраллик шартини бажариладиган ҳолдаги стационар фотоўтказувчанлик таҳлилига асосланган.

Бошқача айтганда, сиртга яқин соҳадаги ҳажмий, заряд ташувчилар рекомбинациясига ва фотоўтказувчанликка таъсир кўрсатмайдиган, сиртий ҳолат эса сиртий рекомбинация тезлиги билан аниқланадиган ҳолат кўрилган эди. Сиртий рекомбинация тезлигини киритишда сиртдаги заряд ташувчилар билан ҳажмдаги заряд ташувчилар орасида квазимувозанат мавжуд деган фараз ётади. Энди баъзи бир ҳолатларда намуна сирт соҳасида пайдо бўладиган энергиявий зоналар эгриланишини фотоўтказувчанликнинг спектрал боғланишига таъсирини кўрайлик.

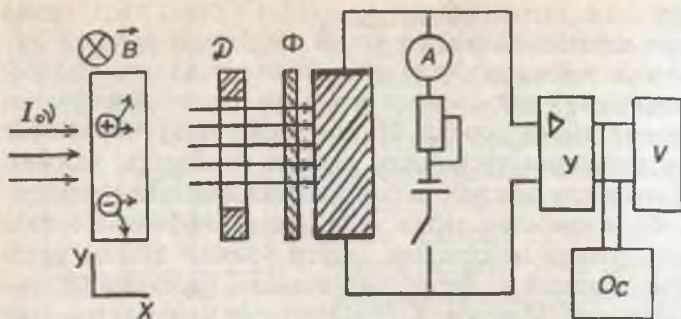
Сирт яқинида заряд ташувчилар энергиясидан катта бўлган энергиявий зоналарнинг эгриланиши сиртдаги кичик интенсивликдаги рекомбинация жараёни мувозанатнинг бузилишига ва фотоўтказувчанликни сифатий ўзгаришига олиб келади. Энергиявий зоналар эгриланиши катта бўлган ҳолда фотоўтказувчанликнинг люкс-ампер спектрал, кинетик характеристикаларида муҳим ўзгаришлар кузатилади. Бу хусусиятларни заряд ташувчиларнинг квазимувозанатига асосланган фотоўтказувчанликнинг назарияси билан тушунтириб бўлмайди. Улар намуна сиртидаги ва ҳажмий заряд соҳасидаги заряд ташувчилар ре-

комбинация жараёнларини ўзгариши билан, яъни заряд ташувчиларнинг эффектив яшаш вақтининг ортиши билан тушунтирилади. Ҳажмий заряднинг электр майдон ёки энергиявий зоналарнинг эгриланишидан ҳосил бўлган потенциал тўсиқ асосий бўлган заряд ташувчиларнинг сиртга келишига тўсқинлик қилади ва сиртда, ҳажмий заряд соҳасида рекомбинация интенсивлигини камайтиради. Бу жараёнлар заряд ташувчилар эффектив яшаш вақтини электр нейтраллик шарти ўринли бўлган ҳолга нисбатан ошиши ва фотоўтказувчанлик хоссаларига таъсир кўрсатади. Маълумки, яримўтказгич намуналарининг сиртий қатламига яқин соҳасида энергиявий зоналар эгриланиши (изгиб) сиртнинг маълум бир кимёвий ишловларидан, электр майдон таъсиридан, электролитларда кутбланишдан пайдо бўлиши мумкин. Энергиявий зоналар эгриланиши катта бўлган кремнийда фотоўтказувчанликнинг спектрал боғланишида катта ўзгариш кузатилган, хусусий ютилишнинг қисқа тўлқин узунлиги соҳасида одатдаги хусусий ютилиш чегарасида кузатиладиган максимумдан катта бўлган янги максимум пайдо бўлади (4.13, в-расм). Буни энергиявий зоналар эгриланиши мавжуд бўлганда сирт соҳасида рекомбинация тезлигининг камайиши билан, яъни заряд ташувчилар эффектив яшаш вақтининг катталашishi билан тушунтирилади. Фотоўтказувчанлик ΔG нинг спектрал боғланиши ҳам 4.12-расмда келтирилган қурилмадан фойдаланиб ўлчанади. Бу ерда шуни назарда тутиш керакки, ҳар хил тўлқин узунликда ёки ҳар хил α га мос келган ΔG ни ўлчашда уларни бир хил интенсивликдаги ёруғлик оқимига келтиради.

↳ $\Delta G(\lambda)$ ни ўлчаш тартиби стационар фотоўтказувчанлик ΔG ни ўлчаш тартибидан фарқ қилмайди.

4.6-§. Номувозанат заряд ташувчилар параметрларини фотоэлектромагнит ҳодисаси (Кикоин-Носков эффекти) дан фойдаланиб аниқлаш усули

Магнит майдонига жойлаштирилган яримўтказгич намунани кучли даражада ютиладиган ёруғлик оқими билан ёритилганда магнит майдони, ёруғлик оқими йўна-



4.15-расм. Фотоэлектромагнитик ҳодисасини электр юритувчи кучи (ЭЮК) ва қисқа туташув токини ўлчаш қурилмасининг схемаси. D — диафрагма; A — амперметр, $B \otimes$ — магнит майдон индукция вектори.

лишларига тик йўналишда кўндаланг электр юритувчи куч ЭЮК (кўндаланг потенциаллар айирмаси) вужудга келади. Бу ҳодиса Кикоин-Носков эффекти ёки фотоэлектромагнит ҳодисаси деб юритилади. Фотоннинг энергияси $\hbar\omega \geq E_g$ бўлган X ўқи йўналишдаги ёруғлик оқими билан намуна ёритилганда, унинг сиртий қатламида ҳосил бўлган ортиқча электронлар ва каваклар намуна ичкари-сига томон X ўқи йўналишида диффузияланади. Z ўқи йўналишида магнит майдони пайдо қилинганда диффузияланувчи электронлар ва коваклар Лоренц кучи $\vec{F}_n = -e[\vec{V}\vec{B}]$; $\vec{F}_p = e[\vec{V}\vec{B}]$ таъсирида y ўқи томон ўз йўналишидан мос равишда θ_n , θ_p бурчакка (холл бурчакларига) оғадилар (4.15-расм) ва электрон, кавакнинг магнитодиффузион (холл) токлари j_{ny} , j_{py} ҳосил бўлади. Бу токлар U ўқига тик кўндаланг кесимларининг бирида мусбат, иккинчисига манфий зарядларнинг тўпланишига олиб келади. U ўқи йўналишидаги магнитодиффузион ток зичликлари j_{ny} , j_{py} нинг холл бурчаклари орқали боғланиши

$$j_{ny} = j_{nx} \operatorname{tg} \theta_n; \quad j_{py} = j_{px} \operatorname{tg} \theta_p \quad (4.141)$$

билан ифодаланади. Бу ерда

$$\operatorname{tg} \theta_n = -\mu_n B = -r_n B \mu_n; \quad \operatorname{tg} \theta_p = \mu_p B = r_n \mu_p B \quad (4.142)$$

Бундаги μ_n, μ_p — электрон, кавакларнинг холл ҳаракатчанликлари, μ_n, μ_p дрейф ҳаракатчанликлари мос равишда $r_n = \frac{\mu_n H}{\mu_n}$ холл омили (унинг қиймати бирга яқин сочилиш механизмига боғлиқ). Электрон, кавакни тула магнитодиффузион ток зичлиги (4.141) ва (4.142) лар кўра

$$j_y = j_{ny} + j_{py} = r_n B (\mu_n j_{nx} - \mu_p j_{px}) \quad (4.143)$$

бўлади. X ўқи йўналишидаги диффузион тоқлар зичликлари ёпишиш маркази бўлмаганда ($\Delta n = \Delta p$)

$$j_{nx} = -j_{px} = -e D_{\text{эф}} \frac{\partial \Delta n}{\partial x} = e D_{\text{эф}} \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \quad (4.144)$$

бўлади, чунки $j_{nx} + j_{px} = 0$ деб ҳисобланади. $D_{\text{эф}}$ — эффектив диффузия коэффициенти бўлиб, магнит майдони мавжуд бўлганда

$$D_{\text{эф}} = (n+p) \left[(1 + \theta_n^2) \frac{n}{D_n} + (1 + \theta_p^2) \frac{p}{D_p} \right]^{-1} \quad (4.145)$$

билан ифодаланади. Кучсиз магнит майдонида, оғиш бу чаги кичик бўлганда

$$\operatorname{tg} \theta_n \approx \theta_n = r_n B \mu_n \ll 1$$

$$\operatorname{tg} \theta_p \approx \theta_p = r_n B \mu_p \ll 1$$

бўлади. Бу ҳолда эффектив диффузия коэффициенти б қутбий диффузия коэффициентига тенг бўлади, яъни $B=0$ ҳолидаги қийматига тенг бўлади. Масалан, P — типли яримўтказгичда $p \gg n$ бўлгани учун (4.145) дан, $D_{\text{эф}} = D_p$ — типда $n \gg p$ бўлгани учун (4.145) дан $D_{\text{эф}} = D_n$ бўлиш лигини кўраимиз. (4.143) га (4.144) ни қўйсак, тула магнитодиффузион ток зичлигининг ифодаси

$$j_y = j_{ny} + j_{py} = -r_n e B D_{\text{эф}} (\mu_n + \mu_p) \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \quad (4.146)$$

кўринишни олади. Намуна ён сиртларида сиртий рекомбинация тезлиги кичик, бинобарин, ён сиртлардаги рекомбинацияни ҳисобга олмаслик мумкин деб фараз қилсак, заряд ташувчиларнинг ортиқча концентрацияси фақат X нинг функцияси бўлади. Шунинг учун (4.146) ни

$$j_y = -r_H e B \cdot D_{\text{эф}} (\mu_n + \mu_p) \frac{\partial \Delta p(x)}{\partial x} \quad (4.147)$$

кўринишда ёзиш мумкин. Занжир узук бўлганда тўла магнитодиффузион ток J фэм ифодаси

$$I_{\text{фэм}} = b \int_0^d j_y dx = -e r_H b B D_{\text{эф}} (\mu_n + \mu_p) [\Delta p(l) - \Delta p(d)] \quad (4.148)$$

кўринишда бўлади. Мувозанат шароитида бу ток ташқи занжирда фотемагнитик электр юритувчи куч (ЭЮК)нинг ҳосил қиладиган тўла ўтказувчанлик (қисқа туташув) токи I_G га тенг бўлади. Агар фотемагнитик ЭЮК ни $U_{\text{фэм}}$ билан, тўла ўтказувчанликни $G = G_0 + \Delta G$ билан белгиласак, у ҳолда қисқа туташув фототокининг ифодаси

$$I_G = U_{\text{фэм}} G = U_{\text{фэм}} (G_0 + \Delta G) = -I_{\text{фэм}} \quad (4.149)$$

кўринишда бўлади. Намунанинг мувозанатдаги (қоронгликдаги) ўтказувчанлиги $G_0 = \frac{1}{R_0} = \sigma_0 \frac{bd}{a}$ бўлади. Фотоўтказувчанлик ΔG электронейтраллик шарти $\Delta n = Dp$ бажарилганда (4.113) га кўра

$$\Delta G = \frac{be(\mu_n + \mu_p)}{a} \int_0^d \Delta p(x) dx \quad (4.150)$$

билан ифодаланади. G_0 ва ΔG ларнинг ифодаларини (4.149) га қўйиб, аниқланган $U_{\text{фэм}}$ ифодаси

$$U_{\text{фэм}} = \frac{r_H a B D_{\text{эф}} e (\mu_n + \mu_p) [\Delta p(0) - \Delta p(d)]}{\sigma_0 d + e(\mu_n + \mu_p) \int_0^d \Delta p(x) dx} \quad (4.150)$$

кўринишда бўлади. Кучсиз магнит майдонида ($\mu^2 B^2 \ll 1$) ўзгаришлар фақат бир X ўқи йўналишида содир бўлганда

кавакнинг узлуксизлик тенгламаси (4.118) кўринишда бўлади. Унинг сиртларида ўринли бўлган чегаравий шартлар (4.120) ни қаноатлантирувчи ечими ёруғликни кучли даражада ютилиши кузатилганда $\alpha d \gg 1$ ва намуна қалин $d \gg L_p$ бўлса,

$$\Delta p(x) = \frac{\alpha I_v \beta (1 - R_v) \tau_p}{h\nu} \left[\frac{\alpha^2 L}{L + S\tau_p} e^{-\frac{x}{2L}} - e^{-\alpha x} \right] \quad (4.151)$$

кўринишда бўлади. Қалин намунада ёритилмаётган сиртда $\Delta p(d)=0$ деб олиш мумкин. У ҳолда қисқа туташув токи $I_{\text{фэм}}$ (4.148) $\Delta p(0)$ билан аниқланиб,

$$J_{\text{фэм}} = \frac{e(\mu_n + \mu_p) \beta B (1 - R_v) \alpha L}{h\nu \left(\frac{SL}{D} + 1 \right) (\alpha L + 1)} \quad (4.152)$$

кўринишга келади. Ютилиш коэффициенти ортиб бориши билан $\alpha L \gg 1$ тенгсизлик ўринли бўла бошлаганда қисқа туташув токи (4.152) ютилиш коэффициентиға боғлиқ бўлмаган доимий қийматга интилади:

$$I_{\text{фэм}} = eB(\mu_n + \mu_p) \frac{I_{\text{ов}} \beta (1 - R_v)}{h\nu} eB(\mu_n + \mu_p) \frac{Z}{(1 + SZ/D)} \quad (4.153)$$

Намунанинг сирт рекомбинацияси тезлиги кичик $S \ll \frac{D_p}{L_p}$ ва паст даражали уйғотиш Δn , $\Delta p \ll n_0$, p_0 ёки $\Delta G \ll G_0$ да (4.153) ифода

$$I_{\text{фэм}} = e(\mu_n + \mu_p) B \frac{I_{\text{ов}} \beta (1 + R_v)}{h\nu} L \quad (4.154)$$

кўринишни олади. Намунанинг сирт рекомбинацияси тезлиги катта $S \gg \frac{D_p}{L_p}$ бўлганда,

$$I_{\text{фэм}} = e(\mu_n + \mu_p) B \frac{I_{\text{ов}} \beta (1 - R_v)}{h\nu} \cdot \frac{D}{S} \quad (4.155)$$

бўлишлигини кўрамиз. Тажрибада ўлчанган қисқа туташув токи бўйича диффузион узунликни аниқлашда (4.153) ва (4.154) формулалар қўлланилади. L ни аниқлашда, $I_{\text{фэм}}$, V ларни ўлчашдан ташқари, заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанликларини, ёруғлик интенсивлигини ва бошқа катталикларни бошқа тажрибалардан топишга ёки адабиёт манбаларидаги натижалардан фойдаланишга тўғри келади. Агар заряд ташувчилар яшаш вақти ва сирт рекомбинацияси тезлиги доимий катталиклар бўлса, (4.154) формула юқори даражали инжекция Δn , $\Delta p \gg n_0$, p_0 да ҳам ўринли бўлади. Кучли даражали инжекция Δn , $\Delta p \gg n_0$, p_0 да диффузия коэффициенти (4.145) ни заряд ташувчиларнинг концентрациясига боғлиқлиги тўхтайди:

$$D = \frac{2 D_n D_p}{(1 + \vartheta_n^2) D_n + (1 + \vartheta_p^2) D_p} \quad (4.156)$$

Шуни назарда тутиш керакки, юқори даражали инжекцияда (4.154) формула билан аниқланган диффузион узунлик бир қийматли маънога эга бўлади, қачонки намунанинг исталган нуқтасида, ёритилмаётган сирти яқинида ҳам Δn , $\Delta p \gg n_0$, p_0 бўлса. Акс ҳолда уйғотиш даражаси бўйича ўрталаштирилган қандайдир қийматни беради, энди $I_{\text{фэм}}$ ни спектрал боғланишдан яримўтказгич параметрларини аниқлашни кўрайлик. Фотомагнитик ток $I_{\text{фэм}}$ нинг спектрал боғланишини (4.152) ва (4.153) ифодалар асосида таҳлил қилиш мумкин. Ёруғликнинг хусусий ютилиш чегарасида ёруғлик тўлқин узунлигининг камайиб бориши билан ютилиш коэффициенти ортади ва фотомагнитик токнинг ўсишига олиб келади. Лекин фотоўтказувчанликка нисбатан фотомагнитик токнинг ўсиши катта фототок энергиясида бошланади ва тикроқ бўлади. Фотомагнитоэлектрик ҳодисасининг пайдо бўлиши учун нафақат заряд ташувчиларнинг генерацияланиши, балки яна улар концентрациясининг градиенти пайдо бўлиши керак. Бу фақат ёруғлик намуна сирт соҳасида ютилган ҳолдагина кузатилади. (4.152) ва (4.153) формулалардан кўринадики, ҳар қандай сирт рекомбинацияси тезлигида $\alpha L = 1$ да қисқа туташув токи $\alpha \rightarrow \infty$ даги қийматидан икки марта кичик бўлади. Фотоўтказувчанликнинг, $I_{\text{фэм}}$ дан

фаркли ўлароқ, икки марта камайиши бошқа параметрларга боғлиқ бўлган αL ни қийматида кузатилади. Тўлқин узунлиги ўзгариши билан ютилиш коэффициентининг катта ўзгарадиган спектр соҳасида қайтиш коэффициенти R квант чиқиш коэффициенти тўлқин узунлигига кучсиз боғланган. (4.152) формуладан

$$\frac{1}{I_{\text{фэм}}} = \frac{(1 + SL/D)}{e(\mu_n + \mu_p)BL} \frac{h\nu}{\beta I_{0\nu}(1 - R_r)} \left(1 + \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{\alpha}\right) \quad (4.157)$$

боғланишни оламир. Ундан кўринадики, $\frac{1}{I_{\text{фэм}}}$ билан $\frac{1}{\alpha}$ орасидаги боғланиш чизиқли бўлади. Тажирибадан олинган натижаларнинг $I_{\text{фэм}} \left(\frac{1}{\alpha}\right)$ кўринишдаги графигини чизиб, горизонтал, абсцисса ўқлари билан кесишгунча давом эттирилади ва у горизонтал ўқни кесишидан $\left(L = \frac{1}{\alpha}\right)$ топилади. Фотоэлектромагнит токи $I_{\text{фэм}}$ нинг спектрал боғланишидан диффузион узунликни ўлчаш усули фотоўтказувчанликнинг спектрал боғланишидан ўлчаш усулига нисбатан аниқроқ натижа беради, чунки ютилиш коэффициенти катталаши билан $I_{\text{фэм}}$ тез тўйинади ва $I_{\text{фэм}}(\alpha^{-1})$ боғланиши (4.157) α ни катта ўзгариш соҳасида чизиқли бўлади. Энди $U_{\text{фэм}}$ ни ўлчашга асосланган усулни кўрайлик. Қалин $d \gg L$ намуна учун, кичик сирт рекомбинацияси тезлиги $S \ll \frac{D}{L}$ да, паст даражали инжекция $\Delta G \ll G_0$ ёки $\Delta p, \Delta n \ll n_0, p_0$ да ёруғликнинг кучли ютилиши соҳаси $\alpha L \ll 1$, $\alpha d \ll 1$ да (4.150) формула

$$U_{\text{фэм}} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)Ba}{\sigma d} \frac{\beta I_r(1 - R_r)}{h\nu} L \quad (4.158)$$

кўринишга келади. Агар юқори даражали уйғотишда фотоўтказувчанлик ΔG мувозанатдаги ўтказувчанлик G_0 дан катта $\Delta G \gg G_0$ бўлса, кучли ютилиш соҳасида $\alpha L \gg 1$ бўлганда (4.150) формула

$$U_{\text{фэм}} = \frac{aBD}{L} = \frac{aBD}{\sqrt{D\tau}} \quad (4.159)$$

билан ифодаланади. Намуна юпқа $d \ll L$ бўлганда сиртий рекомбинация тезлигининг жуда катта бўлмаган қийматида аниқланади. Бу ифодалар ҳар хил шароитда ўлчанган $U_{\text{фэм}}$ қиймати бўйича яримўтказгич параметрларидан τ , L , S ни аниқлаш имконини беради. Шунини таъкидлаш керакки, (4.150) формула бўйича аниқланган сиртий рекомбинация тезлиги $S_1 \neq S_2$ да ёритилмаган сиртники бўлади. Амалиётда заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлашда фотомагнитик ток ва фотоўтказувчанликни, аниқроғи, улар нисбатини аниқлашга асосланган усул кўпроқ қўлланилади. Намуна ёритилиб, унда сиртий генерация содир бўлганда, яъни $\alpha L \gg 1$, $\alpha d \gg 1$, $\alpha \gg \frac{S}{D}$ тенгсизликлар ўринли бўлганда (4.134) ва (4.154) формулаларга кўра $I_{\text{фэм}}/\Delta G$ нисбат

$$\frac{I_{\text{фэм}}}{\Delta G} = B \frac{L}{\tau} = B \left(\frac{D}{\tau} \right)^{1/2} \quad (4.160)$$

билан ифодаланади. Бу формулага генерация тезлигини аниқловчи катталиклар (β , I_s , R_s) кирмаган. Тажриба ўтказиш нуқтаи назаридан бу бирмунча қулай, чунки ёруғлик интенсивлигининг мутлақ қийматини ўлчаш, квант чиқиш коэффициентини билиш талаб этилмайди. Бундан ташқари, у сиртий рекомбинация тезлигига боғлиқ эмас. Шунинг учун бу ифодани ҳар қандай ишловдаги намунага қўллаш мумкин. Юпқа намуналар учун $Z > \frac{D}{S} \gg \frac{d}{2}$ тенгсизлик ўринли бўлганда

$$\frac{Z_{\text{фэм}}}{\Delta G} = \alpha BS \quad (4.161)$$

содда бўлиб, у намунанинг ёритилмаган сиртидаги нисбат сиртий рекомбинацияни аниқлашга имкон беради. Фотозлектромагнитик эффектининг электр юритувчи

кучи $U_{\text{фэм}}$ ни ва қисқа туташув токи $I_{\text{фэм}}$ ни ўлчаш қурил-
масининг чизмаси 4.15-расмда келтирилган. Ёруғлик ман-
баидан ёруғлик оқими, (монохроматик) фокусловчи оп-
тик система ОС ва фильтр Ф орқали намунага йўналти-
рилади. Тўғри бурчакли пластина шаклидаги намуна
ўзгармас ток манбаи ТМ ўзгарувчан қаршилик ва милли-
амперметр mA дан иборат электр занжирга уланади. Ёруғ-
лик интенсивлиги кичик частоталарда модуляцияланади.
Намунадан фототок ва фотомагнитик ток ўтишидан ҳосил
бўлган ўзгарувчан кучланиш селектив кучайтиргич билан
кучайтирилади ва вольтметр ёки осциллограф билан қайд
қилинади. Қисқа туташув токини ўлчаётганда ташқи куч-
ланиш нолга тенг бўлади. Агар намуна қаршилиги шун-
чалик кичик бўлса, қисқа туташув шартини бажариш
мумкин бўлмаса, у ҳолда фотомагнитик ЭЮК ўлчанади
ва магнит майдонда жойлаштирилган намуна ўтказувчан-
лиги ўлчанади ва қисқа туташув токи

$$I_{\text{фэм}} = U_{\text{фэм}} \cdot G \quad (4.161, 6)$$

дан топилади. $I_{\text{фэм}}$ ва $U_{\text{фэм}}$ ларни ўлчашда модомики жа-
раёнларнинг стационарлик шарти назарда тутилар экан,
ёруғликнинг модуляция частотаси шундай бўлиши керак-
ки, фотомагнитик ЭЮК импульс давомийлиги ичидаги
вақтда мувозанат ўрнатилишига, импульслар орасидаги
вақтда нольга тушиб улгириши керак. (4.160) ва (4.161)
муносабатлар асосида τ , L , S ларни аниқлашда фотомаг-
нитик токни ўтказувчанликнинг фототоки билан компен-
сация қилиб, ўлчаш усули тажрибада бирмунча қулайлик
туғдиради. Бу усул билан ўлчаш тартибини кўрайлик. Ин-
тенсивлиги модуляция қилинган ёруғлик билан ёритил-
ган намунадан оқаётган ток ўтказувчанлик ва қисқа туташув
токлари йиғиндисидан иборат бўлади:

$$I = I_{\text{фэм}} + U(\Delta G + G_0) \quad (4.162)$$

$U\Delta G$ ёруғлик интенсивлигига боғлиқ бўлган намуна фото-
ўтказувчанлиги токи (фототок). Унинг ёруғлик оқимининг
модуляция частотаси билан ўзгариши фотомагнитик ток
 $I_{\text{фэм}}$ каби бўлади. Ташқи кучланиш ишораси ва каттали-
гини шундай танлаш керакки, фототок билан қисқа ту-
ташув токини компенсациялаш мумкин бўлсин, яъни:

$$I_{\text{фэм}} + U \cdot \Delta G = 0 \quad (4.163)$$

Шундай қилиб, $\frac{I_{\text{фэм}}}{\Delta G}$ нисбатни аниқлаш учун намунадан оқаётган токнинг ўзгарувчан ташкил этувчиси нольга тенг бўлгани ҳолда намунага қўйилган ўзгармас компенсация кучланишини ўлчаш керак. Кичик ёруғлик интенсивлигида ва кучсиз магнит майдонида компенсация кучланиши U_H фотомангнетик ЭЮК дан анча катта бўлади:

$$\frac{U_K}{U_{\text{фэм}}} = \frac{G_0 + \Delta G}{\Delta G} = 1 + \frac{G_0}{\Delta G} \quad (4.164)$$

Ёруғликнинг катта интенсивлигида компенсацияловчи кучланиш фотомангнетик ЭЮК га яқин бўлади. Одатда, фотомангнетик ЭЮК кичик, бирқанча ҳолларда $10^{-8} : 10^{-9} \text{ В}$ ва ундан кичик бўлиши мумкин. Шу сабабли, уни ўлчашда юқори даражада бир жинсли бўлган намуна танлаш ҳамда магнит майдони бўлмаганда намунани ёритганда ҳажмий фото ЭЮК йўқлигини текшириш керак. Фотоэлектромангнит эффекти заряд ташувчилар яшаш вақтини кенг оралиқда 10^{-4} дан то 10^{-9} с 30—35% хатолик билан аниқлашда қўлланилади. Бу усул, асосан A_3B_5 ва A_2BV бирикмаларда номувозанат заряд ташувчиларнинг кичик яшаш вақтини аниқлашда қўлланилади. A_3B_5 ва A_2B_6 бирикмаларда бу усулни чекловчи омиллар бўлиб, уларга оддий яримўтказгичларга нисбатан катта концентрацияли ёпишиш марказларининг ҳамда сирт қатламидаги ҳажмий заряд соҳасининг таъсирини кўрсатиш мумкин.

4.7 §. Яримўтказгич параметрларини номувозант заряд ташувчилар тақсимоидан (тўғридан-тўғри) фойдаланиб аниқлаш усуллари

Ёруғлик зондининг қўзғатиладиган усули

Бу усул намунани узун, энсиз (ингичка) фотон энергияси $\hbar\omega \geq E_g$ бўлган ёруғлик зонди билан ёритилганда генерация, рекомбинация ва диффузия жараёнларидан юзга келган номувозанат заряд ташувчилар тақсимоидини

ўрганишга асосланган бўлиб, у асосан асосий бўлмаган заряд ташувчилар диффузион узунлигини ўлчашда қўлланади. Бунинг учун намуна сиртига металл зонд (тўғриловчи нуқтавий контакт-коллектор) ўрнатилади ёки планар технология билан кичик юзали p - n ўтиш, шоттки тўсиғи (барьер) олинади ва унга ёпувчи йўналишда тескари кучланиш берилади. Намуна остига ёки ён сиртига юзаси катта омик контакт олинади. Намунада ёруғлик таъсирида генерацияланган заряд ташувчилар намуна сирти бўйлаб, ички томон бўйлаб диффузияланади ва бу контактларга етиб келиб, биринчи яқинлашишда асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрациясига пропорционал бўлган фототокни ёки фото ЭЮК ни ҳосил қилади. Демак, фототокни ёки фото ЭЮК ни ёруғлик зонди билан коллектор контакти орасидаги ҳар хил масофа X да ўлчанган қийматлари $\Delta p(x)$ нинг тақсимотини ифодалайди. Кўрилатган усулнинг назарияси ёруғлик зонди билан генерацияланган заряд ташувчилар концентрацияси $\Delta p(x)$ нинг тақсимотини аниқловчи ифодасини топишга асосланган. Бунинг учун намуна n -тип бўлсин, яримчексиз (жуда қалин) унинг бир томони ясси сиртдан иборат ва ёруғлик зонди энсиз, чексиз узун (ингичка) бўлсин, деб фараз қилинган ҳолни кўрайлик. Агар ёруғлик зонди ён сиртларидан ($2:3$) L дан катта бўлган масофада жойлашган бўлса, ён сиртлардаги рекомбинацияни ҳисобга олинмайди ва масала бир ўлчамли бўлади. Бу ҳолда номувозанат асосий бўлмаган заряд ташувчилар (кавак) тақсимооти цилиндрик симметрия бўйича содир бўлади. Шунинг учун узлуксизлик тенглама (4.118) нинг цилиндрик координата системасида

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\Delta p}{dr} \right) - \frac{\Delta p}{\tau_p D_p} + \frac{\alpha \beta I_v (1 - R_v) e^{-\alpha r}}{h\nu D_p} = 0 \quad (4.165)$$

куринишда бўлади. Бу ерда r ёруғлик зонди (чизиғи)дан коллектор контактигача бўлган (масофа) цилиндр радиуси. (4.165) тенгламанинг ечими нолинчи тартибдаги мавҳум аргументли Ханкел функцияси билан ифодаланади.

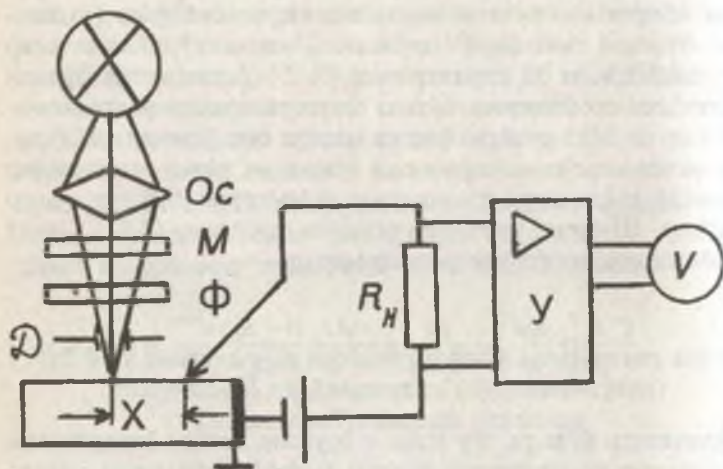
$$\Delta p(r) = \Delta p(0) i H_0'(ir/Z) \quad (4.166)$$

Масалани умумий ҳолда, яъни ёруғлик зонди маълум бир чекли ўлчамларга эга (узунлиги l , эни W) бўлган ҳол деб қаралганда, ҳисоблашларнинг кўрсатишича, координата r нинг $5w < r < \frac{l}{4}$ оралиғида умумий ечимининг апроксимацияси ҳам (4.166) билан ифодаланади. r/L ни катта қийматларида Ханкел функцияси ўша аргументнинг экспоненциал функциясига ўтади. Координата боши ёруғлик зонди билан кўзгалгани учун намуна сиртида $r = x$ деб қараб, қалин $d \gg L$ яримчексиз намуна учун x ни $5w < r < \frac{l}{4}$ оралиқдаги қийматлари учун (4.166) формула

$$\frac{\Delta p(x)}{\Delta p(0)} = \frac{\exp(x/L)}{\sqrt{(x/L)}} \quad (4.167)$$

(4.167) кўринишни олади. Юпқа намуна $d \gg L$ учун эсаномувозанат заряд ташувчилар концентрациясининг тақсимооти

$$\Delta p(x) = \Delta p(0) \exp\left(-\frac{x}{L}\right)$$



4.16-расм. Асосий бўлмаган заряд ташувчилар диффузион узунлигини ўлчаш қурилмаси схемаси: (Вальдес усули): D — диафрагма; K — металл зонд — коллектор контакти; R_H — юклама қаршилик; Y — кўчайтиргич; V — вольтметр.

булади. X нинг ҳар хил қийматларини олиш учун ёруғлик зонди коллектор контактига нисбатан қўзғатилади (силжитилади) ва ўлчаш вақтида ёруғлик зонди тинч ҳолатда туради. Диффузион узунлик L ни ўлчаш қурилмаларидан бирининг чизмаси 4.16-расмда келтирилган. Ёруғлик манбаидан ёруғлик оқими фокусловчи оптик система OC , фильтр Φ , модулятор M , тирқишли диафрагма D орқали намунага тушади. Тирқишли диафрагма D ёрдамида ёруғлик зондининг кенглигини $50 \div 500$ мкм оралиқда ўзгартириш мумкин. Интенсивлиги бўйича модуляцияланган ёруғлик чети сектор шаклида қирқилган ёки доира шаклида тешикли дискни айлантириш билан ҳосил қилинади. Модуляцияланган ёруғликни қўллаш катта коллектор токидан номувозанат заряд ташувчилар диффузияси туфайли, юзага келган кичик қисм фототокни қайд қилиш имконини беради. Ёруғликнинг импульсли модуляциясида импульснинг давомийлиги, частотаси ҳамда интенсивлиги синусоида бўйича ўзгарувчи ёруғликнинг модуляция частотаси номувозанат заряд ташувчилар концентрациясининг стационарлик шартидан танланади. Импульсли модуляцияда импульснинг давомийлиги t_u қуйидаги тенгсизликни

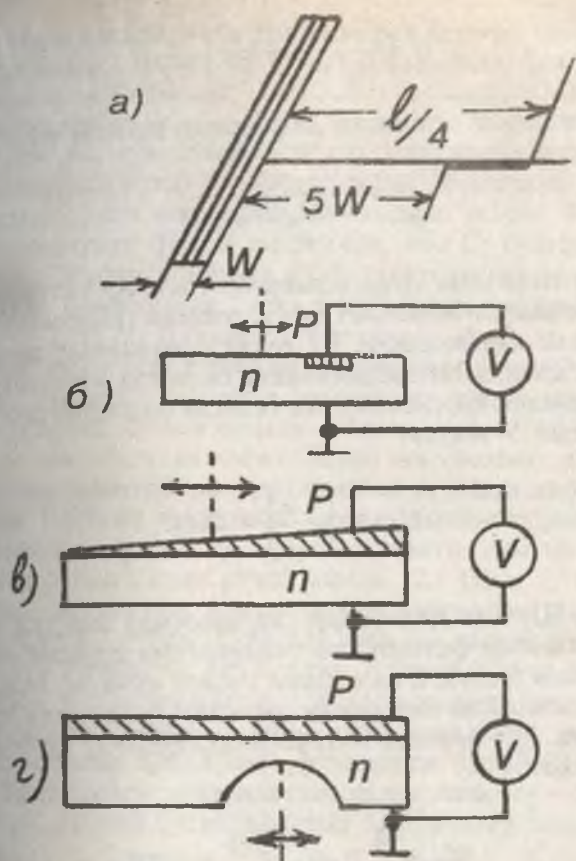
$$t_u \gg \pi\tau \text{ ва } t_u > \frac{r^2}{4D}; \quad t_u > \frac{r}{(D/\tau)^{1/2}}$$

қаноатлантириши керак. Ёруғлик оқимининг модуляция частотаси $50 \div 300$ Гц тартибида бўлади. Модуляция частотаси $\frac{1}{\tau}$ га нисбатан анча кичик бўлиши керак. Юқорида таъкидланганига кўра, коллектор контактига тескари йўналишдаги кучланиш қўйилади ва коллектор занжирига уланган юклама қаршилик R_H дан кучланишнинг ўзгарувчан ташкил этувчиси орқали фототок ўлчанади.

R_H дан ўзгарувчан кучланиш тушуви селектив кучайтиргич орқали кучайтирилади ва синхрон детектор ва вольтметр орқали қайд қилинади. Синхрон детекторни қўллаш қурилманинг ўлчаш сезгирлигини оширади. Яримўтказгич намуна кристалл тутгичга қотирилади ва манипулятор (микрометр) билан ёруғлик зондига нисбатан коллектор контактининг ҳолати ўзгартирилади. Металл

зонд намунанинг исталган жойига ўрнатилиши мумкин ва у намуна билан бирга силжийди. Курилманинг шовқин даражасини камайтириш учун контактнинг турғунлигини ошириш учун контактга ток импульси билан ишлов берилади. Ток импульсининг амплитудаси керакли сигнал-шовқин нисбатига эришгунча ошириб борилади. Ўлчанаётган сигнал катталиги шовқин кучланишига яқинлашгунча ёки (4.166) ифодани қўлаш шарти бузилгунча давом этади. Бу усул, асосан германий намуналарида диффузион узунликни ўлчашда қўлланилган, чунки германийда L анча катта, бундан ташқари, қисиладиган металл зонд билан потенциал тўсиқли контактни олиш нисбатан енгил. Бу усулни кремний намуналарида сирт рекомбинация катта, шовқин даражаси юқори, коллектор контактида ВАХни ночизигий бўлиши, сирт яқинида инверсион қатлам (ҳосил) вужудга келиши туфайли кремнийда L ни ўлчашда кенг қўлланилмаган. L ни ўлчашда иложи борича сирт рекомбинацияни ҳар хил ишловлар билан камайтириш керак. Масалан, германийни $M10$ ва $M14$ сайқалловчи кукунларда сайқаллаш ва 30% ли H_2O_2 (водород пероксидида) кимёвий ишлов бериш тавсия этилади. Агар n -тип германийда ўлчаш ўтказиладиган бўлса, вольфрам зонди p -типда эса кумуш қотишмасининг зонди ишлатилади. Бу усул асосий бўлмаган заряд ташувчилар диффузион узунлигини 0,1 дан то бир неча миллиметрча бўлган ораликда 15—20% хатолик билан ўлчашга имкон беради. Тор зонали яримўтказгич бирикмалари A_3B_5 да кичик диффузион узунликларни ўлчаш учун планар технология билан олинган p - n ўтишли ёки шоттки тўсиқли намуналар тайёрланади. Қўзғалувчан зонд усулига 4.17 б, в, г-расмда келтирилган ҳолларни ҳам кўрсатиш мумкин. Бу ҳолда асосий бўлмаган заряд ташувчилар коллектори вазифасини p - n ўтиш ўтайди. Ёруғлик зонди бир томонга нишаб ёки шар шлифлари бўйича қўзғатилади. Бу усулларда заряд ташувчиларнинг p - n ўтишини йиғиш коэффициенти

$$Q_n + Q_p = \frac{I_{\text{кст}}}{(I_{\text{кст}})_{\text{max}}}$$



4.17-расм. Диффузион узунликни қўзғалувчан ёруғлик (электрон) зонди билан ўлчаш усуллари: а) Вальдес усули билан ўлчаш соҳаси; б) p - n ўтишни; в) нишаб сферик сиртларни қўллаш усуллари.

диффузион узунликка, ёруғликни ютиш коэффициентига ва S/D нисбатга боғлиқ. Назарий ҳисоблашларнинг кўрсатишича, шлиф сиртидан то p - n ўтишгача бўлган етарлича катта (диффузион узунлик L га нисбатан) масофа $x > x_{\text{кр}}$ да $x_{\text{кр}} \alpha > 1$, $x_{\text{кр}} > L_p$ ва $\alpha L > 1$ тенгсизлик ўринли соҳада йиғиш коэффициенти $\exp\left(-\frac{x}{L}\right)$ ҳад билан аниқланади.

$$Q = \frac{I_{\text{кр}}}{(I_{\text{кр}})_{\text{max}}} \sim \exp\left(-\frac{x}{Z}\right)$$

боғланишнинг оғишидан диффузион узунликни

$$L = \frac{\Delta X}{\ln(I_{\text{кр}}/(I_{\text{кр}})_{\text{max}})}$$

орқали топилади. Агар коллектор токи Δp катталиқ билан ночизигий боғланган бўлса, доимий (ўзгармас) фототок усули қўлланилади. Бу ҳолда номувозанат заряд ташувчиларнинг генерацияланиш соҳасида концентрация $\Delta p(0)$ ёруғлик интенсивлигига чизиқли боғланган деб фараз қилинади. У вақтда

$$AI_{0v} \exp\left(-\frac{x}{Z}\right) = \text{const}$$

бўлади. Шундай қилиб, ҳар хил масофада бир хил ўзгармас коллектор фототокини таъминловчи ёруғлик интенсивлигини билиб, L ва τ ларни топиш мумкин. Масалан, иккита масофада бир хил фотосигналларни ҳосил қилувчи I_{0v1} ва I_{0v2} ёруғлик интенсивликларининг қийматини билган ҳолда

$$AI_{0v1}e^{-\frac{x_1}{Z}} = AI_{0v2}e^{-\frac{x_2}{Z}} = \text{const} \quad (4.173)$$

ифодадан диффузион узунлик $L = \frac{X_2 - X_1}{\Delta \ln\left(\frac{I_{0v1}}{I_{0v2}}\right)}$ билан топи-

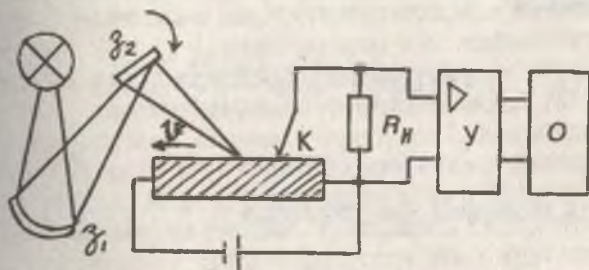
лади. Δp ёки $\ln I_{0v}$ ларни x га боғланишининг оғишидан L ни бу усул билан аниқлашда ҳеч қандай қўшимча параметрларни билиш талаб этилмайди. τ ни аниқлаш учун D ни билиш талаб қилинади. Амалиётда ёруғлик зондининг қўзғалувчан усули билан диффузион узунликни $L > 50$ мкм соҳада ўлчаш мумкин. Диффузия коэффиценти $D = 40$ см²/с n -тип кремнийда, яшаш вақтининг $\tau = 10^{-6}$ сек қий-

мати тўғри келади. Кейинги йилларда ёруғлик манбаи сифатида лазер нурларидан фойдаланилмоқда, фокусловчи оптик тизим сифатида микроскоп (масалан, МБИ—11) қўлланилади.

б. Ёруғлик нури (зонди)нинг ҳаракатланувчи усули

Яримўтказгичлар параметрларини ўлчашнинг бу усули намуна ясси сирти бўйлаб ўзгармас тезлик V билан ҳаракатланувчи фотон энергияси $h\omega \geq E_g$ бўлган узун, ингичка ёруғлик (зонди) нури генерациялаган асосий бўлмаган номувозанат заряд ташувчиларнинг тақсимооти $\Delta p(x, y, z, t)$ ни ўрганишга асосланган. $\Delta p(x, y, z, t)$ ни тескари кучланиш берилган, тўғриловчи яримўтказгич-металл нуқтавий контакти (зонди) ёки кичик юзали p - n ўтиш, шоттки тўсиғи орқали қайд қилинади (4.18-расм).

Ёруғлик зондидан ҳосил бўлган номувозанат заряд ташувчилар намунанинг ёритилмаган қисмига диффузияланади. Ёруғлик зондининг ҳаракатланиши туфайли, заряд ташувчиларнинг фазодаги тақсимооти намуна бўйлаб ёруғлик зонди билан кучиб юради. $\Delta p(x, y, z, t)$ нинг назарий ифодасини аниқлашда яримўтказгич намунаси n -тип бўлсин, унинг бўйи (a), эни (b) қалинлиги d дан катта $a > b \gg d$ бўлсин, деб оламиз. У ҳолда намуна ён сиртларидаги рекомбинация ҳисобга олинмайди ва номувозанат заряд ташувчилар концентрацияси фақат икки x, z координаталар ҳамда вақт функцияси бўлади. Намунанинг ёритилмаган соҳасида генерация тезлиги $g = 0$ бўлгани учун, асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентра-



4.18-расм. Номувозанат заряд ташувчилар параметрларини ҳаракатланувчан ёруғлик зонди усули билан ўлчаш қурилмасининг схемаси.

циясининг намуна қоронғи қисмидаги тақсимоти $\Delta p(x, z, t)$

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = D_p \operatorname{div}(\operatorname{grad} \Delta p) - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (4.174)$$

узлуксизлик тенгламанинг

$$\begin{aligned} D_p \frac{\partial \Delta p}{\partial z} \Big|_{z=0} &= -S \Delta p \\ D_p \frac{\partial \Delta p}{\partial z} \Big|_{z=d} &= S \Delta p(d) \end{aligned} \quad (4.175)$$

чегаравий шартларни қаноатлантирувчи ечими орқали топилади. Ёруғлик зонди билан бирга ҳаракатланувчи координата системасида

$$\begin{aligned} \xi &= x + vt \\ \eta &= z \end{aligned} \quad (4.176)$$

номувозанат заряд ташувчиларнинг тақсимоти вақтга боғлиқ бўлмайди, яъни стационар бўлади. (4.174) тенглама янги координата системасида ўзгарувчанларни ажратиш усули орқали ечилади, сўнг қўзғалмас координата системасига ўтилади. (4.174) тенгламанинг қўзғалмас координата системасида ёруғлик нурининг ўнг томонидаги ечими

$$\Delta p(x, z, t) = C_1 \exp\left(-\frac{x}{l_1}\right) \exp\left(\frac{vt}{l_1}\right) \left(\frac{S_1}{D_1} \sin \alpha_1 z + \cos \alpha_1 z\right) \quad (4.177)$$

ёруғлик нурининг чап томонида

$$\Delta p(x, z, t) = C_2 \exp\left(-\frac{x}{l_2}\right) \exp\left(\frac{vt}{l_2}\right) \left(\frac{S_2}{D_2} \sin \alpha_2 z + \cos \alpha_2 z\right) \quad (4.178)$$

кўринишда бўлади. C_1, C_2 — интеграллаш доимийлари

$$\begin{aligned} I_1 &= \left\{ \left[\left(\frac{v}{2D_p} \right)^2 + L_{a1}^{-2} \right]^{1/2} + \frac{v}{2D_p} \right\}^{-1} \\ I_2 &= \left\{ \left[\left(\frac{v}{2D_p} \right)^2 + L_{a1}^{-2} \right]^{1/2} - \frac{v}{2D_p} \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (4.179)$$

$$I_1 \cdot I_2 = L_{a1}^{-2}$$

Z_{a1} ва α_1 катталиклар

$$\frac{1}{D_p \tau_p} = \frac{1}{L_p^2} = Z_{a1}^{-2} - \alpha_1^2 \quad (4.180)$$

ифода билан боғланган. Интеграллаш доимийларини топилганда (4.175) чегаравий шартларни қўллаш

$$\left(D_p \alpha + \frac{S^2}{D_p \alpha} \right) \operatorname{tg} \alpha d = 2S \quad (4.181)$$

кўринишдаги трансдент тенгламага олиб келади. Бу трансдент тенглама α нинг кўп илдизлари α_n га эга, бунга мос келган L_{a1}, I_1, I_2 ларнинг ҳам кўп қийматлари мос келади. Бу тенглама илдизларининг таҳлили кўрсатишича, I_1 ва I_2 ларнинг қиймати n -ортиши билан тез камайиб (боради) кетади. Шунинг учун I_{12} ва I_{22} дан катта масофада (4.177) ва (4.178) кўринишдаги ечими ўринли бўлади. Ҳақиқатда, агар ёруғлик нури x ўқи бўйича чапдан ўнгга кўча, намуна сиртига жойлашган бирор нуқтадаги заряд ташувчилар концентрацияси унга ёруғлик нури яқинлашиши билан ортади. Бу ўзгариш (4.177) дан кўринадикки, вақт доимийси $\frac{I_1}{v}$ бўлган экспонента қонуни билан содир бўлади. Ёруғлик нури y нуқтадан ўтиб кети-

ши билан заряд ташувчиларнинг концентрацияси вақт бўйича камая бошлайди. Δp нинг камайиши вақт доимийси $\frac{l_2}{v}$ бўлган экспонента қонуни билан бўлади. Агар ўлчаш зондини, яъни коллектор контактини намунанинг координаталари x_1, z_1 бўлган нуқтасига жойлашган деб қарасак, номувозанат заряд ташувчиларнинг шу нуқтадаги ҳаракатланувчи ёруғлик зонди ҳосил қилган концентрациясининг вақт бўйича ўзгаришини (4.178) ва (4.179) ларга кўра

$$\Delta p(x, z, t) = \text{const} \cdot \exp\left(\frac{v}{l_1} t\right) \quad (4.182)$$

$$\Delta p(x, z, t) = \text{const} \cdot \exp\left(\frac{v}{l_2} t\right) \quad (4.183)$$

кўринишдаги формулалар билан ифодалаш мумкин. Шундай қилиб, намуна сирти бўйлаб U тезлик билан ҳаракатланувчи ёруғлик зонди (нури) координатаси (x, y, o) бўлган нуқтага жойлашган коллектор контактига яқинлашганда Δp га пропорционал равишда фототок ёки фото ЭДС (юклама қаршиликка тушган ўзгарувчан кучланиш) орта боради, контактга етиб келганда максимумга эришади ва ундан ўтгандан сўнг камая боради. Демак, бу фотосигналнинг вақт бўйича ўзгариши муайян белгиланган нуқтадаги заряд ташувчилар концентрациясининг вақт бўйича ўзгариш қонуниятини кўрсатади. Ёруғлик нури тезлиги v ни билган ҳолда фотосигналнинг вақтга боғланишидан l_1 ва l_2 топилади ва улар орқали диффузия коэффициенти

$$D_p = \frac{l_1 l_2}{l_1 - l_2} v \quad (4.184)$$

формула билан ҳисоблаб топилади. Сирт рекомбинация ва диффузион узунликни аниқлаш учун сирт рекомбинацияси тезликлари бир хил бўлган икки хил қалинликдаги намуналарда ўлчаш ўтказилади ва ҳар бир намуна учун l_1 ва l_2 топилади ва D_p ни билган ҳолда

$$\left(D_p \alpha_1 - \frac{S^2}{D_p \alpha_1} \right) \operatorname{tg} \alpha_1 d = 2S \quad (4.185)$$

$$\left(D_p \alpha_2 - \frac{S^2}{D_p \alpha_2} \right) \operatorname{tg} \alpha_2 d_2 = 2S$$

трансдент тенгламалар системасидан биринчи илдиэлари α_1 ва α_2 ҳамда S топилади. a_1 ва α_2 , l_1 ва l_2 лар ни билган ҳолда

$$\frac{1}{L_p^2} = \frac{1}{l_1 l_2} + \alpha_1^2 \quad (4.186)$$

$$\frac{1}{L_p^2} = \frac{1}{l_1 l_2} + \alpha_2^2$$

ифодалар орқали диффузион узунлик L_p ҳисобланади. Сирт рекомбинацияси тезлиги кичик $S \ll D_p \alpha_1$ бўлганда, $\operatorname{tg} \alpha$, $\alpha_1 \approx \alpha_1 d_1$ бўлади ва сирт рекомбинацияси тезлиги

$$S = \frac{D_p}{2} \frac{d_1 d_2}{d_1 - d_2} (L \alpha_2^{-2} - L \alpha_1^{-2}) \quad (4.187)$$

дан ҳисобланади. Топилган S бўйича диффузион узунлик

$$L_p = \left(\frac{L_{a1}^2 D_p d_1}{D_p d_1 - 2SL_{a1}^2} \right)^{1/2} \quad (4.188)$$

$$L_p = \left(\frac{L_{a2}^2 D_p d_2}{D_p d_2 - 2SL_{a2}^2} \right)^{1/2}$$

бўйича ҳисобланади. D_p ва L_p ларни билган ҳолда заряд ташувчиларнинг яшаш вақти

$$\tau = L_p^2 D_p^{-1} \quad (4.189)$$

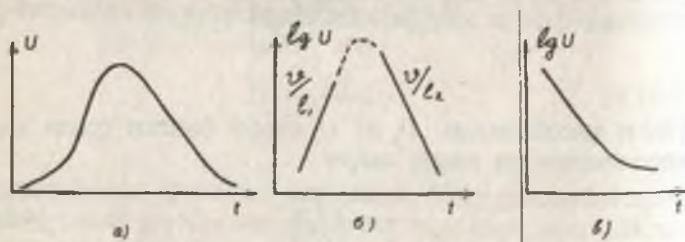
билан, бикутбий диффузион ҳаракатчанлик Эйнштейн муносабатидан

$$\mu = D \frac{e}{kT} \quad (4.190)$$

топилади. Агар сирт рекомбинациясини эътиборга олмаслик мумкин бўлса, масаланинг ечими соддалашади. Ҳақиқатда $S = 0$ да чегаравий шартлар (4.175) дан фойдаланишга ҳожат қолмайди ва масала бир ўлчамли бўлади. Трансдент тенглама ечими $\alpha_1 = 0$ бўлади. У вақтда диффузион узунлик

$$L_p = (l_1 l_2)^{1/2} \quad (4.191)$$

билан, диффузия коэффиценти (4.184) билан, заряд ташувчиларнинг яшаш вақти $\tau = \frac{l_1 - l_2}{u}$ формулалар билан ҳисобланади. Ёруғлик нурунинг ҳаракатланувчи усули билан номувозанат заряд ташувчилар параметрларини ўлчаш қурилмасининг чизмаси 4.19 а, б-расмда келтирилган. Монохроматик ёруғлик оқими S_1 ва S_2 кўзгулар, тирқишли диафрагма Д ёрдамида намуна сиртига йўналтирилади. Ёруғлик оқимининг кенглиги 10^{-2} дан то 1 мм гача ўзгаради. Ёруғлик нурунинг намуна сирти бўйлаб ҳаракати айланувчи кўзгудан ёруғликнинг қайтиши орқали пайдо қилинади. Коллектор токига пропорционал бўлган кучланиш юклама қаршилик R_H дан кучайтиргич U га ва осциллографга берилади. Осциллограмма ўлчаш зондини контактланиш нуқтасидаги заряд ташувчиларнинг вақт бўйича (4.182) ва (4.183) ифодалар билан аниқланадиган тақсимотини кўрсатади. Осциллограммадан $\ln V_k = f(t)$ бог-



4.19-расм. Коллектор фото ЭЮК нинг чизикли (а) яримлогарифмик (б, в) масштаблардаги осциллограммаси.

ланиш чизилади ва унинг тўғри чизикли боғланиш соҳасидан $\frac{V}{I_1}$ ва $\frac{V}{I_2}$ лар, ёруғлик нуридан ўнгда

$$\frac{\Delta \ln U_k}{\Delta I} = \frac{\Delta \ln \Delta p}{\Delta I} = \frac{V}{I_1}$$

ва ёруғлик нуридан чапда

$$\frac{\Delta \ln V_k}{\Delta I} = \frac{V}{I_2}$$

экспонентанинг вақт доимийлари топилади. Намуна сирти бўйлаб ҳаракатланувчи ёруғлик зондининг тезлиги V ни аниқлаш учун биринчи коллектор зондидан қандайдир масофа, иккинчи коллектор зонд ўрнатилади. Икки зонд орасидаги масофани ёруғлик зонди босиб ўтган вақтга нисбати V ни беради. Бу усул олдин германий, кейинчалик кремний, индий, сурьма ($InSb$) ва бошқа яримўтказгич намуналарининг параметрларини ўлчашда қўлланилган. Ўлчаш давомида индий, сурьма ва германий намуналарида ёпишиш марказларининг таъсири кучлироқ намоён бўлган. Бу марказлар томонидан эркин заряд ташувчиларнинг тутилиши осциллограмманинг горизонтал ўқ билан бироз чўзилишига ва нихоят экспонента вақт доимийсининг ошишига олиб келган. Шунинг учун осциллограмманинг бу соҳасига температура ўзгаришининг ва кучсиз ёритишнинг таъсири кўрсатилган. Юқорида муҳокама қилинган ёруғлик зондининг қўзғалувчан, ҳаракатланувчи усулларидаги ёруғлик зондининг ўрнига электрон зондини қўллаш орқали диффузион узунлиги кичик бўлган A_3B_5 ва A_2B_6 яримўтказгич бирикмаларини текшириш ва уларда диффузион узунликни ўлчаш имкони туғилди.

Диффузион узунликни электрон зонди усули билан ўлчашда, одатда намунанинг электрон зондига тик ёки параллел сиртларида планер технология билан кичик юзали p - n ўтиш ёки шоттки тўсиғи олинган структуралар қўлланилади.

Электрон концентрацияси 10^{17} см^{-3} бўлган n -тип $CdTe$ да заряд ташувчилар диффузион узунлигини ўлчаш учун

намуна сиртига шоттки тўсиғи олинган ва шоттки тўсигидан $0,1 \div 14$ мкм масофада энергияси $5 : 25$ кэВ бўлган электрон нури билан асосий бўлмаган заряд ташувчилар (кавак) уйғотилган. Шоттки тўсигига $0,1$ В дан ортиқ бўлмаган кучланиш уланган. Бу диффузион узунликни $0,4 \div 3$ мкм оралиқда ўлчаш имконини беради. Электрон зонди усулининг кенг қўлланишини чекловчи бир неча омиллари мавжуд бўлиб, улардан муҳимлари сифатида қуйидагиларни кўрсатиш мумкин:

1. Электрон зонди билан номувозанат асосий бўлмаган заряд ташувчилар генерацияланиш соҳаси энининг чекли бўлиши. Электронни $5 \div 30$ кВ кучланиш билан тезланрилганда заряд ташувчилар генерацияланиш соҳаси $0,1$ дан то $2,1$ мкм гача ўзгарган. Электрон зонди усули, ёруғлик зонди усули каби, $x > L$ да яхши натижалар беради. Бу шартни юпқа эпитаксиал қатламларда қаноатлантириш қийин, шунинг учун бу ҳолда электрон зондининг қўзғалувчан усули қўлланилмайди.

2. Кенг тақиқланган зонали яримўтказгичларни, масалан, кремнийни сирт соҳасида маълум бир шароитда камбағаллашган ёки инверсион қатламнинг ҳосил бўлиши. Бу ҳолда ҳажмий заряд соҳасининг электр майдони ва p - n ўтишга, шоттки тўсигига уланган ташқи майдон сирт бўйича тарқалиши мумкин ва асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг дрейф ташкил этувчисини юзага келтиради, натижада ўлчанаётган диффузион узунликнинг ортишига олиб келади. Бундан ташқари, p - n ўтишнинг йиғувчи юзасининг ортишига ва, ниҳоят ҳисоблашда хатоликнинг ошишига олиб келади. Атроф муҳитни ўзгартириб, сиртий потенциални бошқариш орқали бу чекловчи омилнинг таъсирини йўқотиш мумкин. Намуна сиртида “ясси зона” ёки заряд ташувчилар билан кучсиз бойиган режими амалга оширилиши мақсадга мувофиқ бўлади.

3. Рекомбинацион нурланиш кучли намоён бўладиган тўғри зонали яримўтказгичларда асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг коллектори яқинида рекомбинацион нурланиш фотонининг қайта ютилиши.

Бу бир неча диффузион узунликдаги (бирламчи асосий бўлмаган заряд ташувчилар томонидан) юзага келган кичик коллектор сигналидан аниқланадиган диффузион узунлик қийматининг ортишига олиб келади (4.19в-расм).

Кўзгалувчан, ҳаракатланувчи электрон зондини олишда растрли электрон микроскопнинг исталган типи ишлатилиши мумкин.

4.8-§. *P*-*n* ўтишининг ва Шоттки тўсиғининг қисқа туташув фототокини ўлчашга асосланган диффузион узунлиқни аниқлаш усули

Бу усул билан олдин *p-n* ўтиш (эпитаксиал структура)-нинг таркибий қисми бўлмиш эпитаксиал қатламда заряд ташувчиларнинг диффузион узунлигини ўлчашни кўрайлик.

Аниқлик киритиш учун *n*-типдаги тагликка қалинлиги *W* бўлган *p*-типдаги эпитаксиал қатлам ўстирилган ва намунани эпитаксиал қатлам томонидан $x=0$ текислиги фотон энергияси $h\omega \geq E_g$ бўлган ёруғлик оқими билан ёритилган бўлсин деб олайлик. Умуман олганда, ёруғлик оқими эпитаксиал қатламда, *p-n* ўтишининг ҳажмий заряд соҳасида, тагликда номувозанат электрон-кавак жуфтларини генерациялайди ва фототокка ҳар бир соҳадаги номувозанат асосий бўлмаган заряд ташувчилар ўз ҳиссаларини қўшади. Шунинг учун *p*-тип эпитаксиал қатлам учун асосий бўлмаган номувозанат заряд ташувчилар (электрон) концентрациясининг тақсимооти Δn ни ва у билан боғлиқ фототок ифодасини таҳлил қилайлик. *P*-тип эпитаксиал қатламда рекомбинацион нурланишни ва уни қайта намунада ютилишини ҳисобга олмаганда, номувозанат электроннинг концентрацияси $a > b \gg w$ да бир ўлчамли

$$D_n \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{\tau_n} + g_0 e^{-\alpha x} = 0$$

узлуксизлик тенгламанинг

$$D_n \left. \frac{d\Delta n}{dt} \right|_{x=0} = S \Delta n(0)$$

$$D_n \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=d} = 0$$

чегаравий шартларини қаноатлантирувчи ечими орқали топилади. Бу ҳолда қисқа туташув фототоки фақат p -тип эпитаксиал қатламда генерацияланган асосий бўлмаган заряд ташувчилар бўлмиш электроннинг диффузион ток зичлиги

$$j_{x,\tau} = eD_n \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=w} \quad (4.193)$$

билан аниқлашни кўрамиз. Ҳисоблашларнинг курсати-
шича, $j_{x,\tau}$ нинг ифодаси

$$j_{x,\tau} = \frac{eg_0 L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \left\{ - \frac{(S + \alpha D_n) \operatorname{sech}(w/L_n)}{L_n + \operatorname{sth} \frac{w}{L_n}} + \right. \\ \left. + \left[\alpha Z_n \frac{S + L_n(\tau_n) \operatorname{th}(w/L_n)}{(L_n/\tau_n + \operatorname{sth} w/L_n)} \right] e^{-\alpha w} \right\} \quad (4.194)$$

кўринишни олади. Агар эпитаксиал қатлам қалинлиги етарлича катта, ёруғлик кучли ютилсин, сирт рекомбина-
цияси тезлиги кичик бўлсин деб фараз қилсак, яъни

$$\alpha w > 3 \quad (4.195a)$$

$$\alpha Z_n > 3 \quad (4.195b)$$

$$S = 0 \quad (4.195b)$$

да шартлар ўринли бўлади. (4.194) ифоданинг иккинчи
ҳадини ташлаб юбориш мумкин. У вақтда (4.194) содда-
лашади ва $j_{x,\tau}$ нинг ифодаси

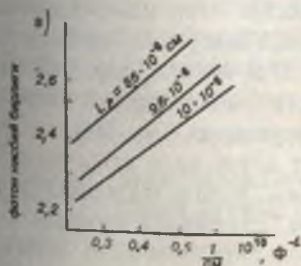
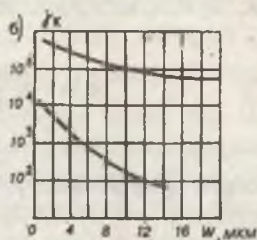
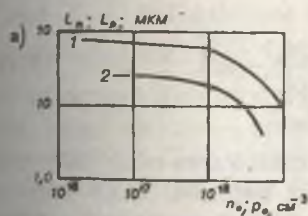
$$j_{x,\tau} = \frac{e(1-R_v)}{h\nu} \operatorname{sech}\left(\frac{w}{L_n}\right) \quad (4.196)$$

кўринишга келади. (4.195 а, б, в) шартларни арсенид-гал-
лий эпитаксиал қатлам мисолида баҳолаб кўрайлик. Эпи-
таксиал қатлам гелий-неон лазер нури $h\nu = 1,96 \text{ эВ}$ ($\lambda = 0,6328$
мкм) билан ёритилган бўлсин. Ёруғликнинг бу тўлқин узун-
лигидаги хусусий ютилиш коэффициенти $\alpha \approx 4,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$
бўлади. (4.194а) шартни қаноатлантирувчи эпитаксиал

қатлам қалинлиги $1 \div 10$ мкм, (4.1956) шартни қаноатлантирувчи заряд ташувчилар диффузион узунлиги $L_n > 1$ мкм бўлиши керак. Агар (4.1956) шарт бузилиб, $L_n < 1$ мкм, $\alpha L_n < 3$ бўлганда $j_{\text{к.т.}}$ қисқа туташув фототоки (4.194) дан

$$j_{\text{к.т.}} = \frac{e I_{0v} (1 - R_v)}{h\nu} \frac{\alpha^2 L_n^2}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \operatorname{sech} \left(\frac{w}{L_n} \right) \quad (4.197)$$

ифода билан аниқланишини кўрамиз. Суюқлик эпитаксия технологияси билан ўстирилган, қалинлиги $1 \div 10$ мкм оралиқда бўлган GaAs эпитаксиал қатламда L_n ни ўлчаш натижалари, унинг заряд ташувчилар концентрациясига боғлиқлигини кўрсатди. Асосий заряд ташувчилар концентрациясининг $P_0 = (10^{16} : 10^{19}) \text{ см}^{-3}$ оралиғида Z 0,1 дан то 1 мкм гача ўзгарган (4.20а-расм). Сирт рекомбинацияси тезлигини камайтириш мақсадида одатда эпитаксиал қатлам устига шу типдаги GaAlAs қатлам ўстирилади. Тажрибадан аниқланган L_n қийматлари учун (4.194) му-



4.20-расм. а) GaAs эпитаксиал қатламида электрон-ковак диффузион узунликларининг асосий заряд ташувчилар концентрациясига боғланиши. 1 — германий билан легирланган p — GaAs учун, 2 — қалай билан легирланган n — GaAs учун. б) GaAs ли p - n ўтиш қисқа туташув фототокининг p -қатлам қалинлигига боғланиши. 1- $p = 1,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $L_n = 5,5 \text{ мкм}$; 2- $p = 6,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $L_n = 200 \text{ мкм}$; в) Шоттки диоди фототокининг тескари сифимига боғланиши.

носабатнинг таҳлили шуни кўрсатадики, (4.195а) ва (4.195б) тенгсизликлар сирт рекомбинациясининг $S < 10^4 \text{ см/с}$ қийматларида ўринли бўлар экан. Бундан (4.195в) шартни $S < 10^4 \text{ см/с}$ билан алмаштириш мумкинлиги кўрсатилган. Тажирибадан L_n ни аниқлашда p - n ўтишнинг юзаси $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, юклама қаршилик 1 Ом бўлган ёруғлик манбаи сифатида гелий-неон лазери қўлланилган. L_n ни аниқлашда қисқа туташув фототок ўлчашдан ташқари, ёруғлик интенсивлигини, ёруғликни намунадан қайтиш коэффициентини билиш лозим. Эпитаксиал қатлам қалинлиги шар ёки қия (нишаб) шлиф усули билан ёки тўғридан-тўғри растрли электрон микроскоп билан аниқланиши мумкин.

Диффузион узунлик p - n ўтиш қисқа туташув фототокининг эпитаксиал қатлам қалинлигига боғлиқлигидан ҳам аниқланиши мумкин.

$\alpha w > 1$ ва $\alpha L_n > 1$ да p - n ўтиш қисқа туташув фототоки (4.197) дан

$$j_{\text{кт}} \sim [e^{w/L_n} - \kappa e^{-w/L_n}]^{-1} \quad (4.198)$$

бўлади. Бунда коэффициент:

$$\kappa = \frac{(S/D_n - 1/L_n)}{(S/D_n + 1/L_n)} < 1 \quad (4.199)$$

Қалинлиги диффузион узунликдан катта $w > L_n$ эпитаксиал қатламлар учун (4.198) нинг биринчи ҳади устунлик қилади. Шунинг учун $j_{\text{кт}}$ нинг W га чизикли боғланиш графигидан L_n ни ҳисоблаш мумкин. Агар намуна қалинлиги диффузион узунлик тартибида ёки ундан кичик $w \leq L_n$ бўлса, қисқа туташув фототоки S/D_n ва $1/Z_n$ ларга боғлиқ бўлади. Бу ҳолда тажирибадан аниқланган ҳамда назарий ҳисобланган $j_{\text{кт}}$ (w) боғланишларининг бир-бирига мос тушиш шартидан коэффициент κ -ни ва у орқали S/D_n аниқланади. D_n нинг қийматини p -тип материалларда электрон ҳаракатчанлиги орқали боғланиши мумкин. Бунинг учун p -типдаги электрон ҳаракатчанлиги, шундай концентрациядаги заряд ташувчиларга эга бўлган n -типдаги электрон ҳаракатчанлигига тенг деб қаралади. Энди

p - n ўтишда ва шоттки тўсиғида ҳажмий заряд соҳасининг кенглиги диффузион узунлиги L_n тартибида бўлган яримўтказгичлар учун L_n ни аниқлашни кўрайлик. Юқори Омли намуналарда олинган $p^+ - n$, ёки $n^+ - p$ ўтишлар ёки шоттки тўсиқларидир. Бу структураларнинг фотозффе́кт на-зариясига кўра қисқа туташув фототоки

$$j_{\kappa\tau} \sim \frac{\alpha(w + L_n)}{(1 + \alpha L_n)} = f(\alpha, w, L_n) \quad (4.200)$$

бўлади. Бу ифодани қўлаб, L_n ни тажрибадан аниқлаш асосида қисқа туташув фототокининг ҳажмий заряд соҳаси кенглигига боғлиқлиги ётади. Маълумки, потенциал тўсиқли структураларда ҳажмий заряд соҳасининг кенглиги унга қўйилган кучланишга боғлиқ. P - n ўтишни ҳажмий заряд соҳа кенглигининг кучланиш билан ўзгариши ўз навбатида потенциал тўсиқ сифимининг ўзгаришига олиб келади. Бундан p - n ўтиш ва Шоттки тўсиқлари қисқа туташув фототокларининг ҳажмий заряд соҳаси қалинлигига қараб ўзгаришини потенциал тўсиқнинг сифим ўзгариши орқали ифодалаш мумкинлиги кўринади. Тўсиқ сифимининг ҳажмий заряд соҳаси кенглиги W билан $C(u) = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{w} A$ боғланишда бўлишлигини назарда тутсак, (4.198) ифодани $\frac{\epsilon \epsilon_0 A}{C(u)}$ билан тўғри чизиқли боғланишда бўлишлигини кўраимиз. Бу ерда A - p - n ўтиш ёки Шоттки тўсиғининг юзаси ϵ — яримўтказгичнинг диэлектрик сингдирувчанлиги $C(u)$ ҳар хил кучланишдаги тўсиқ сифими.

Шундай қилиб, p - n ўтиш ва шоттки тўсиқларининг қисқа туташув фототоки орқали диффузион узунликни аниқлашнинг иккинчи усулида уларга қўйилган ҳар хил кучланишларда бир вақтда бир хил интенсивликдаги ёруғлик билан ёритишдан ҳосил бўлган қисқа туташув фототокининг сўниш сифими ўлчанади ва ўлчанган $j_{\kappa\tau}$ нинг $\frac{\epsilon_0 \epsilon}{C(u)} A$ га боғланиши чизилади. (4.20 в-расм). Бу боғланишнинг тўғри чизиқли соҳасини абсцисса ўқи билан кесишгунча давом эттириб, у кесма узунлигидан диффузион узунлик топилади $L_n = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{C(u)}$. Бундай ўлчашни ўтка-зишда ёруғликнинг $\alpha w < 1$ тенгсизлик ўринли бўлган спектрал соҳаси танланади. Бундан ташқари, заряд та-

шувчилар яшаш вақти ҳажмий заряд соҳасининг дрейф вақтидан катта бўлиши кераклиги кўрсатилган. GaP учун $t_{др} \approx 10^{-12} \text{C}$. Сигим $C(u)$ намуна ёритилган ҳолатда 1 МГц частотада ўлчанган. Юқорида изоҳланганлардан кўринадики, бу усул эпитаксиал қатламларда номувозанат асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг кичик диффузион узунлигини ўлчаш мумкин. Ҳамда ҳар хил шароитда ҳар хил қалинликда ўтказилган тажриба натижалари диффузия коэффицентини, сирт рекомбинацияси тезлигини, заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлашга имкон беради.

ЧУҚУР САТҲЛИ МАРКАЗЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ ЎЛЧАШ УСУЛЛАРИ

5.1-§. Чуқур сатҳли марказларнинг параметрлари

Яримўтказгич материалларининг тақиқланган зоналарида чуқур энергия сатҳларини ҳосил қиладиган кристалл панжара нуқсонлари чуқур сатҳли марказ (тутқичлар) деб юритилади. Бу нуқсонларга киришма атомларини, радиацион нуқсонларни, термик ишлов жараёнларида пайдо бўлган термик нуқсонларни кўрсатиш мумкин. Чуқур сатҳли марказлар рекомбинация марказлари ёки тутқич марказлари каби бўладилар. Биринчи ҳолда чуқур сатҳлар заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини, диффузион узунлигини камайишига олиб келади ва яримўтказгич асбобларининг характеристикаларига кучли таъсир кўрсатади. Чуқур сатҳ (ЧС) лар рекомбинацион марказлар сифатида лазер ва ёруғлик (свето) диодларининг нурланиш интенсивлигини камайтиради. Чуқур сатҳли марказлар тутқич марказлари сифатида заряд тўпланишига таъсир қилиши мумкин. Назорат остида киритилган чуқур сатҳли марказ (ЧСМ)лар бир қанча ҳолларда яримўтказгичларда керакли хусусиятлар ҳосил қилиши мумкин. Масалан, арсенидгаллий ($GaAs$) га киритилган хром киришма атоми юқори Ом ли (қаршилиги катта бўлган) намуналар олишга имкон беради. Кремнийни тилла (Au), платина (Pt) киришма атомлари билан легирлаб, заряд ташувчилар яшаш вақтини бир неча тартибга камайитиришга эришилди ва у намуналар асосида саноатда тезкор импульсли диод ва тристорлар ишлаб чиқариш йўлга қўйилди. Демак, яримўтказгичларда ЧСМлар мақбул ва номақбул ҳодисаларни содир қилар экан. Шунинг учун чуқур сатҳлар хоссаларини ўрганиш, технологик жараёнларда пайдо бўлишлигини назорат қилиш, улар табиатини аниқлаш яримўтказгичлар физикасида муҳим ўрин тутати.

Заряд ташувчилар бўлмиш электронни, ковакни ЧСларга тутиб олгунча, тутгандан сўнг қандай зарядланган ҳолатида бўлишига қараб, саёз сатҳлар каби, чуқур марказ донор ёки акцептор характериға эға бўлиши мумкин. Чуқур сатҳлар хоссалари тақиқланган зонадағи ҳолати E_c концентрацияси N_d дан ташқари, электронни, ковакни мос равишда сатҳдан термик чиқариш коэффициентлари e_n , e_p ҳамда электронни, ковакни сатҳға тутилиш кесимлари S_n , S_p билан аниқланади. Электрон, ковакни марказға тутилиш коэффициентлари γ_n , γ_p тутилиш кесимлари S_n , S_p орқали қуйидағи

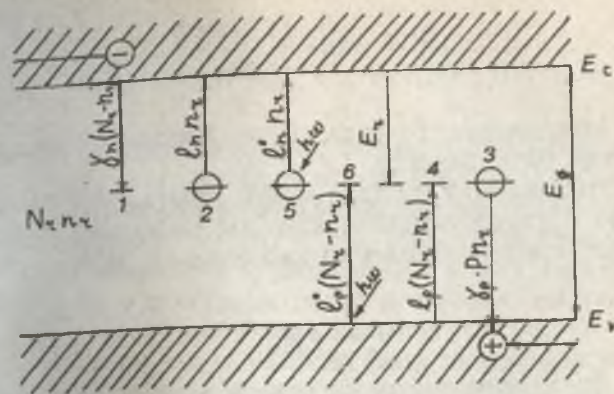
$$\gamma_n = S_n v_t; \quad \gamma_p = S_p v_t \quad (5.1)$$

муносабатлар билан боғланган. Бу ерда: v_t — заряд ташувчилар ўртача тезлиғи бўлиб, унинг қиймати

$$v_t = (KT/\pi m)^{1/2} \quad (5.2)$$

ифодадан топилади. Маълумки, заряд ташувчиларнинг E_c сатҳға тутилиш кесими чуқур марказнинг қандай зарядланган ҳолатда бўлишиға боғлиқ.

Зарядланган марказ кулон тортишиш маркази бўлганда тутилиш кесими 10^{-14} см², кулон итарувчи маркази бўлганда тутилиш кесими 10^{-19} см², марказ нейтрал бўлганда тутилиш кесими 10^{-16} : 10^{-17} см² тартибида бўлади. Баъзан, ЧСМларда тутилиш кесимлари юқорида келтирилган қийматларидан катта фарқ қилиши мумкин. Шундай қилиб, чуқур энергия сатҳлари E_c , N_d , e_n , e_p , S_n , S_p параметрлар орқали аниқланар экан. Бу параметрларни ўлчаш усуллари устида тўхташдан олдин уларнинг боғланишларини аниқловчи баъзи бир муносабатларни кўриб чиқайлик. Яримўтказгич n -тип бўлсин ва унда саёз сатҳли концентрацияси N_{cd} бўлган донор марказидан ташқари концентрацияси N_d тақиқланган зонада энергия сатҳи E_c бўлган ЧСМлар бўлсин ҳамда электр нейтраллик соҳаси (ЭНС)да $F - E_c > 4kT$ тенгсизлик бажарилсин. Бундай намуналарда чуқур сатҳда электрон концентрациясининг вақт бўйича ўзгаришиға олиб келадиган жараёнларни кўрайлик (5.1-расм).



5.1-расм. Яримўтказгич чуқур сатҳида электрон концентрациясининг ўзгаришиға олиб келувчи жараёнлар (электрон утишлар схемаси).

1. Ўтказувчан зонадағи электроннинг чуқур сатҳға тутилиш жараёни. Бу жараёнда сатҳдағи электронлар концентрацияси ошади ва унинг ўсиш тезлиғи

$$g_n = \gamma_n (N_d - n) n \quad (5.3)$$

билан аниқланади. Бу ерда, n — чуқур сатҳдағи электрон концентрацияси, n — электроннинг ўтказувчан зонадағи концентрацияси: $N_d - n$ электрон билан тўлатилмаган бўш чуқур марказ коцентрацияси, γ_n — электроннинг марказға тутилиш коэффициенти.

2. Чуқур сатҳдан ўтказувчан зонаға электронни термик чиқариш жараёнида E_c сатҳдағи электрон коцентрацияси n камаяди ва унинг тезлиғи

$$r_n = -e_n n_r = -\gamma_n n_1 n, \quad (5.4)$$

билан аниқланади. Бу ерда, e_n — электронни сатҳдан термик чиқариш коэффициенти Шокли — Рид статистикасига кўра, $e_n = \gamma_n n_1$ ифодадан топилади.

n_1 — ферми сатҳи F чуқур сатҳ E_c га мос келганда, ўтказувчан зонадағи электрон коцентрацияси бўлиб, унинг қиймати

$$n_1 = N_c \exp \left[- \frac{(E_c - E_r)}{\kappa T} \right] \quad (5.5)$$

билан аниқланади. Бу ерда, N_c — ўтказувчан зонадаги эффектив ҳолат зичлиги.

3. Электронни E_r сатҳдан валент зонага ўтиш (ёки ковакнинг E_r сатҳга тутилиш) жараёни. Бу жараён сатҳдаги электрон концентрациясини камайтиради ва унинг тезлиги

$$r_p = -\gamma_p p n_r \quad (5.6)$$

ифода билан аниқланади. Бу ерда, p — ковак концентрацияси, γ_p — ковакнинг сатҳга тутилиш коэффициенти.

4. Валент зонадан электронни E_r сатҳга (ёки ковакни E_r сатҳдан валент зонага) термик чиқариш жараёни. Бу жараён F_r сатҳдаги электрон концентрациясини оширади ва унинг тезлиги

$$g_p = e_p (N_r - n_r) = \gamma_p p_1 \cdot (N_r - n_r) \quad (5.7)$$

ифода билан топилади. Бу ерда, P_1 — электр нейтраллик соҳасида Ферми сатҳи, E_r билан мос келганда валент зонадаги ковак концентрацияси. Унинг қиймати

$$P_1 = N_v \exp \left[- \frac{(E_r - E_v)}{\kappa T} \right] \quad (5.8)$$

ифодадан топилади. N_v — валент зонадаги эффектив ҳолат зичлиги. Шундай қилиб, E_r ЧС электрон концентрациясининг вақт бўйича ўзгариш тезлиги Шокли-Рид статистикасига кўра

$$\frac{dn_r}{dt} = \gamma_n (N_r - n_r) n - \gamma_n n_1 n_r - \gamma_p p n_r + \gamma_p p_1 (N_r - n_r) \quad (5.9)$$

узлуксизлик тенгламаси орқали ифодаланади. Стационар ҳолатда $\left(\frac{\partial n_r}{\partial t} = 0 \right)$ электроннинг стационар концентрацияси (5.9) тенгламага кўра

$$n_c = N_r \frac{\gamma_n n_c + \gamma_p p_1}{\gamma_n (n_c + n_1) + \gamma_p (p_c + p_1)} = \frac{\gamma_n n_c + e_n}{\gamma_n n_c + e_n + \gamma_p p_c + e_p} \quad (5.10)$$

кўринишда бўлади. n_1 ва p_1 концентрациялар ($E_c - E_v$) ва ($E_c - E_v$) энергияларга экспоненциал боғланган бўлгани туфайли, улар бир-биридан камида бир тартибда фарқ қилдилар. Одатда $e_n \gg e_p$, ёки $e_p \gg e_n$ тенгсизлик уринли бўлади. Агар тутилиш коэффициентлари γ_n ва γ_p бир-биридан катта фарқ қилмасалар, п-тип материалларда тақиқланган зона ярмининг юқори қисмида жойлашган E_c сатҳ учун $e_n \gg e_p$ бўлади ва у асосий заряд ташувчилар учун тутқич марказ бўлади. Агар E_c сатҳ тақиқланган зона ярмининг куйи қисмида бўлса, $e_p \gg e_n$ бўлади ва асосий бўлмаган заряд ташувчилар учун тутқич марказ бўлади. Р-тип материал учун эса тескари тенгсизликлар уринли бўлади. ЧСнинг электронлар билан тўлдирилганлик даражасининг ўзгариши (ЧС)ни фотоионланиши, яъни ЧС билан ўтказувчан ёки валент зоналар орасидаги оптик ўтишлар туфайли содир бўлиши мумкин (5,6-ўтишлар). Бу ҳолда сатҳдан электронни ва ковакни оптик чиқариш коэффициентлари $e_n^* = \chi_n I_v$, $e_p^* = \chi_p I_n$ киритилади (χ_n, χ_p — фотоионланиш кесими, I_n — ёруғлик интенсивлиги) у вақтда уларнинг E_c сатҳдан чиқариш коэффициентлари $e_n^* + e_n$ ёки $e_p^* + e_p$ га тенг бўлади. Шундай қилиб, намуна фотон энергияси $h\nu \gg \Delta E_c$ ёруғлик билан ёритилганда (5.9) узлуксизлик тенглама

$$\frac{dn_r}{dt} = \gamma_n (N_r - n_r) n - \gamma_n n_1 n_r + \gamma_p p_1 (N_r - n_r) - \chi_n n_r I_v + \chi_p (N_r - n_r) I_v \quad (5.10a)$$

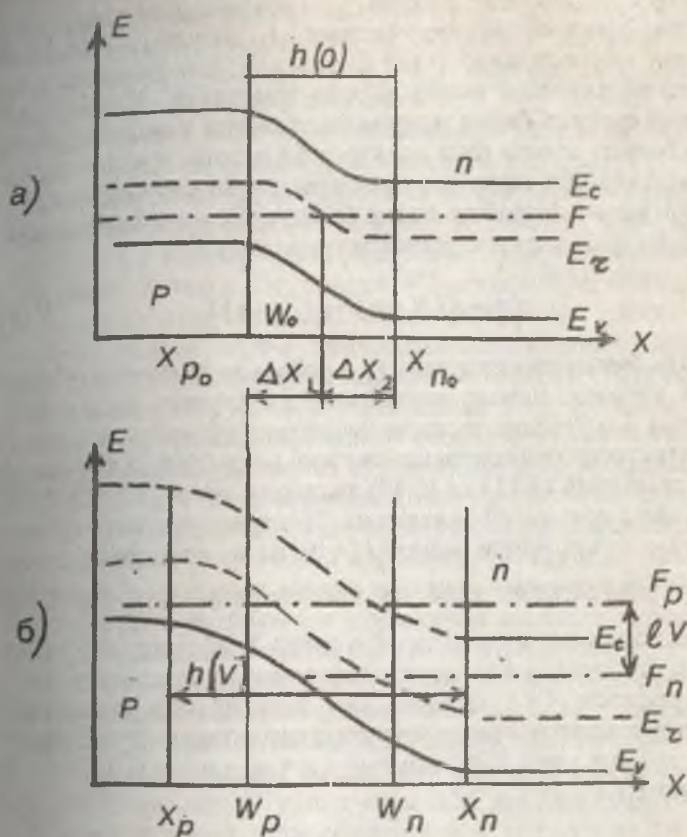
билан ифодаланади. Паст температураларда термик чиқариш тезлиги унча катта бўлмаган шароитда оптик ўтишларда чиқариш тезлиги температурага боғлиқ бўлмасдан ёруғлик интенсивлигига боғлиқ бўлганлиги туфайли $e_n^* \gg e_n$ ёки $e_p^* \gg e_p$ шарт осон бажарилади.

ЧС — нинг электрон билан тўлдирилганлик даражасини оптик усул билан ўзгартириш орқали чуқур сатҳ энергиясини тўғридан-тўғри фотон энергияси бўйича

аниқлаш мумкин. Буни унинг афзаллиги сифатида кўрсатиш мумкин. Шундай қилиб, юқорида келтирилган изоҳлардан кўринадики, чуқур E_v сатҳни электронлар билан тўлдирганлик даражаси, сатҳнинг тақиқланган зонадаги ва ферми сатҳига нисбатан қандай вазиятда бўлишига, материал типига, сатҳни донор ёки акцептор характериға эға бўлишига, концентрацияси N , га ҳамда ташқи таъсир (температура, ёруғликнинг фотон энергияси $h\nu$ ва интенсивлиги)га боғлиқ.

5.2-§. P-n ўтишда чуқур сатҳларнинг электронлар билан тўлдирилганлиги

Оҳиста p - n ўтишда саёз сатҳли донор ва акцепторлардан ташқари, энергия сатҳи E_v , концентрацияси N , бўлган ЧСМ бўлсин, шу билан бирга, чуқур марказ атоми битта электронни қабул қилиши ёки бериши мумкин бўлсин (бир зарядли). Бу ҳолда ҳажмий заряд соҳаси (ХЗС)да чуқур сатҳ электрон концентрациясининг вақт бўйича ўзгаришини кўрайлик. Электр нейтраллик соҳаси (ЭНС)-да, яъни ХЗС дан ташқарида чуқур марказ концентрацияси N_v саёз марказ концентрацияси N_{cd} билан бир тартибда, лекин $N_v < N_{cd}$ бўлсин, деб олайлик. P - n ўтишнинг n соҳасида $N_c = N_{cd} - N_{ca}$ ва p — соҳасида $N_c = N_{ca} - N_{cd}$ билан аниқланади (N_{cd} — саёз донор концентрацияси, N_{ca} — саёз акцептор концентрацияси). Бундан ташқари, n соҳанинг ЭНС да $F - E_v > 4kT$ p — соҳанинг ЭНС да эса $E_v - F > 4kT$ тенгсизликлар бажарилади деб қараймиз. Ҳисоблашларни соддалаштириш учун p - n ўтишга кучланиш қўйилмаган ($V=0$) да стационар ҳолатда ферми сатҳидан пастда $x > w_0$ соҳада жойлашган чуқур сатҳ E_v ни электрон билан тўлатилган, а ферми сатҳидан юқорида $x > w_0$ соҳада жойлашган E_v сатҳни электрон билан тўлатилмаган деб қабул қиламиз (5.2а-расм). P - n ўтишга тескари кучланиш уланганда E_v сатҳда электрон концентрациясининг ўзгаришини кўрайлик (5.2б-расм). P - n ўтиш тескари кучланишда мувозанатда бўлмаса ҳам E_v сатҳни тескари кучланиш уланган p - n ўтишга ёруғлик туширилганда n , ни қўшимча ўзгаришига олиб келадиган қуйидаги оптик ўтиш жараёнлари кузатилади. P - n ўтишга фо-



5.2-расм. Оҳиста (равон) p - n ўтишда энергетик зоналарнинг жойланиши ва чуқур сатҳларнинг кучланиш қўйилмаган $U=0$ да (а) ва тескари кучланиш қўйилган $U \neq 0$ да электрон билан тўлиши.

тон энергияси $E_c - E_v > \hbar\omega > E_c - E_v$ бўлган монохроматик ёруғлик билан ёритилганда E_c сатҳни фотоионланиш жараёни содир бўлади, яъни сатҳдан электрон ўтказувчан зонага чиқади. Шунинг учун бу жараёнда сатҳда электроннинг концентрацияси камаяди ва унинг тезлиги

$$r_n^0 = -e_n^0 n_r = \chi_n I_{0v} n_r \quad (5.11)$$

билан ифодаланади. Бу ерда, χ_n — чуқур марказдаги электронда фотонни тутилиш кесими, I_0 намунага тушаётган фотон интенсивлиги (вақт бирлигида, юза бирлигига тушаётган квантлар сони). Фотон энергияси $E > \hbar\omega > E_c - E_v$ бўлган ёруғлик билан намуна ёритилганда ковакни E_c сатҳдан валент зонага (ёки электронни валент зонадан E_v сатҳга) чиқариш жараёни кузатилади, яъни ковакнинг фотоионланиш жараёни содир бўлади. Бу жараёнда сатҳдаги электрон концентрацияси ортади ва у

$$g_p^* = -e_p^*(N_v - n_v) = \chi_p(N_v - n_v)I_0 \quad (5.12)$$

ифода билан аниқланади. χ_p — ковакда фотоннинг тутилиш кесими. Демак, монохроматик ёруғлик билан ёритилган p - n ўтишга тескари кучланиш қўйилганда сатҳдаги электрон концентрациясининг вақт бўйича ўзгариши ўнг томонида (5.11) ва (5.12) ҳадларни ҳисобга олган (5.9) тенглама орқали ифодаланади. Тескари кучланиш қўйилган p - n ўтиш ёритилмаган ($I_0 = 0$) да ва стационар ҳолат $\frac{\partial n_r}{\partial t} = 0$ да сатҳдаги электрон концентрацияси n_n ҳам (5.10)

ифода билан аниқланади. p - n ўтиш ХЗС нинг $x < w_n$ қисмида ўтказувчан зонадаги электроннинг стационар концентрацияси $n_c < n_1$ бўлади, $x > w_p$ қисмида эса ковакнинг валент зонадаги стационар концентрацияси $P_c < P_1$ бўлади, шунинг учун ХЗС нинг $w_p < x < w_n$ қисмида (5.10) ни тахминан

$$n_n = N_v \frac{\gamma_p P_1}{\gamma_n n_1 + \gamma_p P_1} = N_v \frac{e_p}{e_n + e_p} \quad (5.13)$$

кўринишда ифодалаш мумкин. Тескари кучланишнинг катта қиймати $V \gg V_k$ да (5.13) ифода ҳамма қисмида ўринли бўлади. (5.10) да $\gamma_n n_c$ ва $\gamma_p P_c$ ҳадларни ташлаб юборишлик электронни ўтказувчан зонадан, ковакни валент зонадан E_c сатҳга тутилишини инобатга олмасликни англади. (5.13) ифодани

$$e_n n_n = e_p (N_v - n_v)$$

кўйилишида ифодалаймиз. Бундан кўринадик, стационар ҳолатда электроннинг E_r сатҳдан ўтказувчан зонага термик чиқариш тезлиги ($e_n \cdot n_n$) электронни валент зонадан термик чиқариш тезлиги $e_p(N_r - n_r)$ га тенг бўлади. Чукур E_r сатҳ учун $e_n > e_p$ тенгсизлик ўринли бўлсин. Бу тенгсизлик, юқорида кўрганимиздек, одатда тақиқланган зона ярмининг юқори қисмида жойлашган сатҳлар учун бажарилади (қачонки γ_n ва γ_p лар жуда катта фарқ қилмасалар). Бу сатҳлар учун (5.13) дан $n_n \ll N_r$ бўлишлигини кўрамиз. Яъни $x < w_n$ соҳада ЧС деярли бўш бўлади. p - n ўтишнинг $x > w_n$ соҳасида сатҳ электронлар билан батамом тўлатилган. $e_p \gg e_n$ тенгсизлик одатда тақиқланган зона кенглиги ярмининг қуйи қисмида жойлашган сатҳлар учун бажарилади. Бу ҳолда p - n ўтишнинг $x > w_p$ соҳасида (5.13) дан $n_n = N_r$ бўлишини, яъни бу соҳада чуқур сатҳ электрон билан деярли (батамом) тўлатилган, $x < w_p$ соҳадаги сатҳ эса бўш бўлишини кўрамиз. Энди ностационар жараёнда ХЗС даги чуқур сатҳдаги электрон концентрациясининг вақт бўйича ўзгаришини кўрайлик. Маълумки, p - n ўтишнинг ХЗСда кучли электр майдони мавжудлиги туфайли бу соҳада электроннинг ўтказувчан зонадаги, ковакнинг валент зонадаги стационар концентрациялари ЧС даги электроннинг стационар концентрациясига нисбатан тез қарор топади. Бу ўтказувчан зонадаги электронни ҳамда валент зонадаги ковакни ХЗС даги кучли электр майдон томонидан ташқари соҳага тез чиқариб юбориш билан тушунтирилади. Шунинг учун ХЗС да электрон концентрациясини $n = n_c$, ковакникини $p = p_c$ деб қабул қилса ХЗС да E_r сатҳдаги электрон концентрациясининг вақт бўйича ўзгариши (5.9) дан

$$\frac{d\Delta n_r}{dt} = -[\gamma_n(n_c + n_1) + \gamma_p(p_c + p_1)]\Delta n_r \quad (5.14)$$

узлуксизлик тенглама билан аниқланишини кўрамиз. Бу ерда, $\Delta n_r(t) = n_r(t) - n_{nc}$ тенгламанинг ечими

$$\Delta n_r(t) = \Delta n_{nc} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.15)$$

кўринишда бўлади. Бундан кўринадики, сатҳни электрон билан тўлдириш вақт доимийси

$$\tau = [\gamma_n(n_c + n_i) + \gamma_p(p_c + p_i)]^{-1} \quad (5.16)$$

бўлган экспотенциал қонуни бўйича бўлади. τ сатҳнинг бошланғич ҳолатда қандай тўлдирилганлигига, чуқур марказ концентрациясига боғлиқ бўлмай, у n_c ва p_c лар x га боғлиқ бўлгани учун координатага боғлиқ. ҲЗС нинг четларида τ ўрта қисмига қараганда кичик. Вақт доимийси τ ни сатҳнинг тўлдириш релаксацияси вақти ҳам деб юритилади. ҲЗС нинг $w_n > x > w_p$ қисмида (5.16) ифода

$$\tau = (\gamma_n n_i + \gamma_p p_i)^{-1} = (e_n + e_p)^{-1} \quad (5.17)$$

кўринишни олади. Катта тескари кучланиш $v > v_c$ да (5.17) ифода ҲЗС нинг ҳамма қисмида ўринли бўлади. Агар чуқур марказ тортувчи марказ бўлса, кучли электр майдони унинг атрофидаги потенциал тўсиқ (барьер)ни камайтиради ва у электронни термик чиқишини осонлаштиради, яъни Пул-Френкел эффекти юзага келади. Бу ҳодисани мувозанатдаги система статистикаси асосида олинган. (5.17) ифодада ҳисобга олинмаган. $v = 0$ да ҲС ли диодга тескари ҲС стационар тўлатилган бўлсин ва $e_n \gg e_p$ бўлган кучланиш уласак, ҲЗС нинг Δx қатламидаги сатҳдан электрон ўтказувчан зонага $\tau = e_n^{-1}$ вақт доимийси билан чиқа бошлайди, сўнг улар электр майдон таъсирида ЭНС га кетказиб юборилади. Оқибатда p - n ўтишининг n — соҳасига жойлашган ҲЗС нинг Δx_i қатламида ҲС ни ионланиши туфайли ҳажмий заряд зичлиги чуқур марказ донор ёки акцептор бўладими, бундан қатъи назар ортади. Вақт доимийси $\tau = (e_n)^{-1} = (\gamma_n n_i)^{-1}$ га (5.5) ифодани қўйсак ва (5.1) ни назарда тутсак уни

$$\tau = (S_n V_i N_c)^{-1} \exp \left[\frac{E_c - E_r}{kT} \right] = (S b_n T^2)^{-1} \exp \left[\frac{E_c - E_r}{kT} \right] \quad (5.18)$$

билан ифодаланишини кўрамыз. Бу ерда, b_n — яримўтказгич параметри, германий учун $b_n = 3,6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-2}$

кремний учун $b_n = 6,6 \cdot 10^{-21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-2}$ ни қабул қилади (5.18) формуладан кўринадик, сатҳни электрон билан тўлдириш релаксация вақти температура ошиши билан кескин камая бошлайди. (5.18) ни логарифмлаб

$$\ln(\tau T^2) = \ln(S_n b_n) + \frac{E_c - E_f}{kT} \quad (5.19)$$

кўринишга келтирамиз. Марказнинг ионланиш энергияси ($E_c - E_f$) ни ва электроннинг марказга тутилиш кесими S_n ни температурага боғлиқлигини ҳисобга олмасак $\ln(T\tau)$ нинг $\frac{1}{kT}$ боғланиши тўғри чизиқни беради. Унинг оғиш бурчаги тангенс чуккур марказнинг ионланиш энергиясини, ордината ўқининг кесишидан ҳосил бўлган $-\ln(b_n S_n)$ га тенг кесма узунлигидан электронни тутилиш кесими S_n топилади. Энди ЧС ни тўлдирилганлиги стационар ҳолатга эришгандан сўнг тескари кучланишни нолгача камайтирганда n , ўзгаришини кўрайлик. Кучланишни учирган ($v \rightarrow 0$) дан сўнг ΔX_1 қатлам соҳасидаги ЧС τ_{Tn} вақт доимийси билан тўла бошлайди. τ_{Tn} нинг қиймати

$$\tau_{Tn} = [\gamma_n (n_c + n_1)]^{-1} = (e_n + \gamma_n n_1)^{-1} \quad (5.20)$$

формула билан топилади.

Вақт доимийси $\tau > 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ с}$ бўлганда $n_1 \ll n_c$, $\tau_{Tn} \ll \tau$ тенгсизлик бажарилади. Бошқача айтганда, E_f сатҳни электрон билан тўлдириш, сатҳдан электронни термик чиқаришга нисбатан тез содир бўлади. Лекин юқори Ом ли намуналардан ясалган диодларда улар бир тартибда бўлиши мумкин.

P - n ўтишга тескари кучланиш берилгандан ($0 \rightarrow V$) сўнг P — соҳадаги жойлашган ҳажмий заряд соҳасининг ΔX_2 қисмидаги $e_p \gg e_n$ бўлган сатҳни $\tau = e_p^{-1}$ вақт доимийси билан электрон тўлдира бошлайди. Бу ΔX_2 қатламда сатҳни донор ёки акцептор бўлишидан қатъи назар ҳажмий заряд зичлиги ортади.

Вақт доимийси $\tau = e_p^{-1} = (\gamma_p p_1)^{-1}$ нинг қиймати (5.8) ни назарда тутсак,

$$\tau = (S_p V_i N_v)^{-1} \exp \left[\frac{E_r - E_v}{kT} \right] = (S_p b_p T^2)^{-1} \exp \left(\frac{E_r - E_v}{kT} \right) \quad (5.21)$$

билан аниқланади. Бу ерда b — яримўтказгич параметри, германий учун $b = 1,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-2}$, кремний учун $b = 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-2}$. Юқорида қўрилгандек, (5.21) ни логарифмлаб, ундан ЧС ионланиш энергияси ($e_r - E_v$) ни ҳамда ковакни ЧС да тутилиш кесими S ни топиш мумкин. Тескари кучланишни ўчиргандан сўнг ΔX_2 қатламдаги сатҳдан электрон

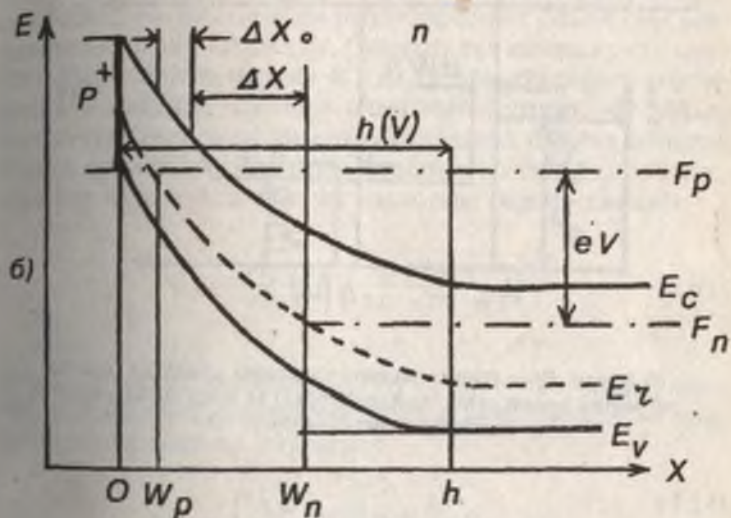
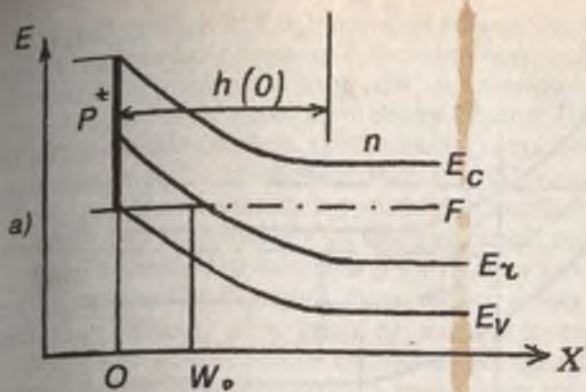
$$\tau_{\text{тп}} = [(p_1 + p_c) \gamma_p]^{-1} = (e_p + \gamma_p p_c)^{-1}$$

вақт доимийси билан кета бошлайди (бошқача айтганда, сатҳ ковак билан тўла бошлайди). Бу ҳолда ҳам $\tau_{\text{тп}} \ll \tau$ бўлади. Юқорида изоҳланган усул билан E_r сатҳнинг ионланиш энергиясини, сатҳда электрон, ковакнинг тутилиш кесимларини аниқлашдаги асосий хатолик уларнинг температурага боғлиқлигини (5.9) да ҳисобга олмаслик туфайли содир бўлган.

Ҳисобларнинг кўрсатишича, сатҳнинг ионланиш энергияси $\pm KT$ тартибдаги хатолик билан S_v ва S_p ларни эса катталиклар тартибдаги хатолик билан ўлчанар экан. Сатҳ энергиясини аниқлашда шуни назарда тутиш керакки, ҳар қандай нуқсон ёки киришма атоми тақиқланган зонада иккита (ёки ундан ортиқ) сатҳ ҳосил қилиши мумкин. Бу сатҳлардан қайси бирини намоён бўлиши ферми сатҳининг вазиятига боғлиқ. Бунга мисол сифатида тилла киришма атоми билан Si ни легирланганда юзасига келадиган сатҳни кўрсатиш мумкин. У ўтказувчан зона тубидан 0,56 эВ пастда акцептор, валент зона шипидан 0,45 эВ юқорида донор сатҳини ҳосил қилади.

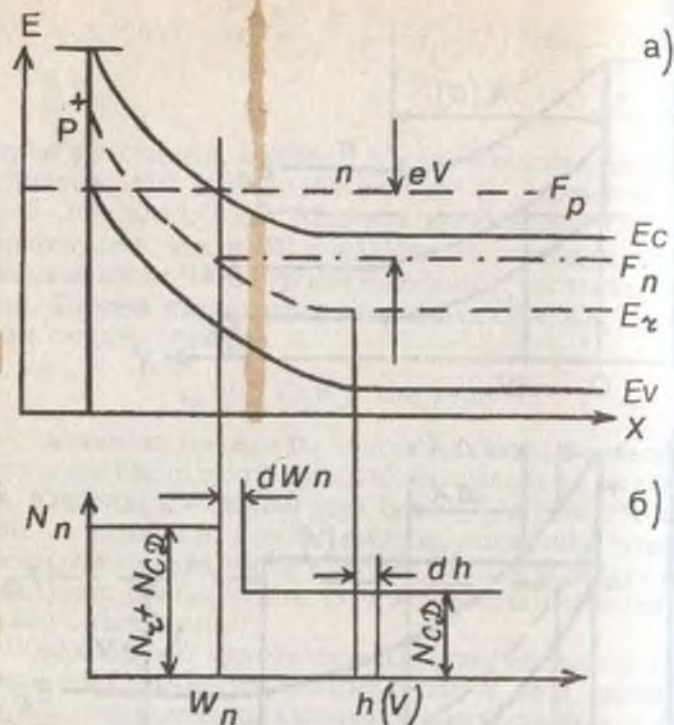
5.3 §. Чуқур марказли диодларнинг барьер сифими

Чуқур марказ (ЧМ)ли диодларнинг сифими хоссаларини p - n — ўтиш мисолида кўрайлик. P^+ - n диод базаси (асосида) концентрацияси $N_{c,d}$ бўлган саёз сатҳли донордан ташқари, энергиявий сатҳи E_r концентрацияси $N_{r,d}$ бўлган



5.3-расм. Кескин p - n ўтишда энергетик зоналарнинг жойланиши ва чуқур сатхларни кучланиш қўйилмаган $U=0$ да (а), тескари кучланиш қўйилган $U \neq 0$ да электрон билан тўлиши (б).

чуқур донор марказ бўлсин (5.3-расм). Бу чуқур сатхда $e_n \gg e_v$ тенгсизлик бажарилсин ва кейинчалик N_{cd} ва $N_{r,d}$ ларни махсус қайд қилинмаса координатага боғлиқ эмас деб қабул қиламиз. ХЗСдан ташқаридаги электр нейтраллик (ЭНС) соҳасида $F_n - E_v > 4 \text{ кТ}$ ва ионлашган чуқур донор концентрацияси



5.4-расм. p^+-n ўтишга тескари кучланиш қўйилган ҳолатда энергетик зоналарнинг жойлашиши (а) ва ионлашган киришма атомларининг тақсимои (б).

$$N_{rDU} = N_{rD} \exp \left[-\frac{F_n - E_f}{kT} \right] \ll N_{CD}$$

бўлсин. У вақтда p^+-n ўтишга қўйилган тескари кучланишда ХЗС нинг $0 < x < w_n$ қисмида ЧС ферми сатҳидан юқорида бўлиб, тўла ионлашган ҳолатда бўлади. Бу соҳада ионлашган марказлар концентрацияси N_{CD} ва N_{rD} лар йиғиндисига $N_n = N_{CD} + N_{rD}$ ХЗС нинг $w_n < x$ қисмида эса $N_n = N_{CD}$ га тенг бўлади. $t=0$ да диодда тескари кучланиш dV га сакраб (кескин) ошсин. У вақтда ХЗС нинг кенглигини dh га, W_n — қатлам қалинлигини dW_n га ошишига олиб келади. (5.4-расм) dh қатламдан электронни кетиш

вакти максвелл вакти τ_m тартибда бўлади, чунки бу қатламда ҳамма саёз донорлар кучланиш ошгунча ионлашиб бўлган. Чуқур донорларнинг dW_n қатламида ионланиши эса кучланиш ошгандан сўнг содир бўлади. Шунинг учун бу қатламда электронни кетиш вакти сатҳнинг тўлдириш релаксация вакти билан аниқланади. dW_n қатламда чуқур донорларнинг ионланиши туфайли ҳажмий заряди ортади ва барьер сифимининг ўзгаришига олиб келади. Одатда барьер сифимини ўлчашда p^+ -н ўтишга доимий тескари кучланишдан ташқари синусоидал кичик кучланиш қўйилган бўлади. p^+ -н ўтиш ва шоттки диодлар барьер сифимининг ифодаларини ҳисоблаш устида тўхталмасдан чуқур марказ параметрларини аниқлашга керак бўладиган барьер сифимининг формулаларининг баъзи бир хоссаларини таҳлил қилайлик. Синусоидал кичик кучланишнинг паст частоталари $\omega\tau \ll 1$ да сатҳни тўлдириш релаксацияси вақтини ҳисобга олмаслик мумкин ва барьер сифимини стационар заряддан кучланиш бўйича олинган ҳосила орқали ҳисобланиши мумкин. Назарий ҳисоблашларнинг кўрсатишича, паст частотада барьер сифими

$$C_{nr} = \frac{d\theta_c}{dU} = S \sqrt{\frac{\epsilon_a e (N_{CD} + N_{rD})}{2(U + U_k - \Delta U_k)}} \quad (5.23)$$

формула билан аниқланади. Бу ерда $\epsilon_a = \epsilon_0$, яримўтказгичнинг абсолют диэлектрик сингдирувчанлиги, U_k — контакт потенциаллар айирмаси

$$\Delta U_k = \frac{N_{rD}(F_n - E_r)h}{e(N_{CD} + N_{rD})} \quad (5.24)$$

$(F_n - E_r)_k$ — катталиқ $F_n - E_r$ нинг $x=h$ даги қиймати (5.21) дан кўринадики, паст частотали сифимнинг кучланиш билан боғланиши худди базасида фақат саёз донор сатҳлар мавжуд бўлган ҳолдаги $C^{-2}(U)$ каби, лекин бу ерда $C^{-2}(U)$ тўғри чиқиқнинг оғиш бурчаги тангенс киришмалар концентрациялари йиғиндиси $N_{CD} + N_{rD}$ га тескари пропорционал. Бундан ташқари, сифим формуласидаги U_k ни ўрнига $(U_k - \Delta U_k)$ кирган. Юқори частота $\omega\tau \gg 1$ да чуқур донорларнинг $X = W_n$ текислиги яқинида зарядининг

ўзгаришини ҳисобга олмаслик мумкин, чунки улар кучланиш ўзгариши билан қайта зарядланиб улгурмайдилар. $X=h$ текислиги яқинида фақат саёз сатҳли донорларнинг заряди ўзгаради. Юқори частотали сиғим қиймати

$$C_{Br} = \frac{\epsilon_a S}{h(V)} \quad (5.25)$$

формула билан ҳисобланади. Бу ерда S p - n ўтиш юзаси, h — ҳажмий заряд соҳасининг кенглиги. Назарий ҳисоблашларнинг кўрсатишича,

$$h(V) = \frac{N_{CD}(h - w_n)}{N_{CD} + N_{rD}} + \sqrt{\frac{2\epsilon_a(U + U_k - \Delta U_k)}{e(N_{CD} + N_{rD})}} \quad (5.26)$$

формула билан аниқланади.
 $(h - w_n)$ — қатлам қалинлиги

$$h - W_n = \left(\frac{2\epsilon_a(F_n - E_r)_h}{e^2 \cdot N_{CD}} \right)^{1/2}$$

ифода билан ҳисобланади. (5.27) дан кўринадики, $(h - w_n)$ қатлам қалинлиги кучланишга боғлиқ эмас. (5.25) формула саёз киришма мавжуд бўлган p - n ўтишнинг барьер сиғимига ўхшаш. Чуқур донорларнинг заряди ўзгарувчан кучланиш ўзгариши орқасидан кетма-кет улгуролмаса ҳам ХЗСнинг кенглиги ва юқори частотали сиғим C_{Br} га таъсир кўрсатади. C_{nr} ва C_{Br} формулаларнинг бир-бирига солиштиришдан кўринадики, юқори частотали сиғим C_{Br} паст частотали сиғим C_{nr} га нисбатан кичик $C_{Br} < C_{nr}$ бўлиб, у кучланишга C_{nr} га нисбатан кучсизроқ боғланган, бунинг устига $C^{-2}(U)$ тўғри чизиқли боғланишда эмас. Тескари кучланишнинг ортиши билан C_{Br}/C_{nr} нисбат ўса бориб бирга интилади. Яъни $C^{-2}(U)$ га яқинлашади. Шу пайтгача чуқур сатҳни стационар тўлдиришдаги барьер сиғимини кўрдик, энди кучланиш сақраб ўзгаргандаги барьер сиғимини таҳлил қилайлик. Агар кучланиш сақраб ошганда, ўлчаш асбобларининг вақт доимийси $\tau_{yли}$ сатҳни тўлдириш релаксация вақти τ дан катта ($\tau_{yли} > \tau$)

бўлса, чуқур марказларни стационар тўлдиришдаги сифимнинг (паст ёки юқори частотадаги) қиймати ўлчанади. $\tau_{\text{тн}} \ll \tau$ тенгсизлик бажарилган ҳолда, чуқур сатҳни тўлдирилганлигининг вақт бўйича ўзгаришига мос ўзгарувчан юқори частотали сифимнинг қандайдир ўткинчи қиймати $C(t)$ ўлчанади. Паст частотали сифим қиймати маъносига кўра ҳамма вақт чуқур марказни стационар тўлдиришда ўлчанади. Ҳақиқатда агар ЧС нинг тўлдирилганлиги ўзгарувчан кучланиш ўзгариши орқасидан улгурса, у вақтда шак-шубҳасиз у ўзгармас кучланиш ўзгариши орқасидан ҳам улгуради. $U = 0$ да чуқур сатҳ стационар тўлатилган бўлсин. Тескари кучланиш улангандан ($0 \rightarrow -U$) сўнг бошланғич вақт $t = 0$ да сатҳни тўлдирилиши, қайта улангунча бўлган ҳолатдаги қийматига тенг бўлади. Яъни $t = 0$ да ХЗС нинг $0 < x < w_0$ қисмида $N_* = N_{CD} + N_{rd}$ ва $W_0 < x < h_0$ қатламида $N_* = N_{CD}$ ХЗС нинг бошланғич кенглиги ва юқори частотали сифимнинг бошланғич қийматлари қуйидаги формулалар билан аниқланади:

$$h_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_a(U + U_k - \Delta U_k)}{eN_{CD}}} \quad (5.28)$$

$$C_{\delta Br} = \frac{S\varepsilon_a}{h_0} = S \left[\frac{\varepsilon_a e \cdot N_{CD}}{(U + U_k - \Delta U_k)_0} \right]^{1/2} \quad (5.29)$$

Бу ерда

$$\Delta U_{kb} = eN_{rd}W_0^2/2\varepsilon_a \quad (5.30)$$

(5.29) формулани таҳлилидан $C_{\delta Br}$ нинг U билан боғланиши диод базасида фақат саёз донор бўлгандаги каби эканлигини кўрамиз. $C_{\delta Br}^{-2}(U)$ тўғри чизиқ оғиш бурчагининг тангенс N_{CD}^{-1} га пропорционал. Бундай боғланиш бошланғич пайтда кучланишнинг ўзгариши билан чуқур киришма заряди ўзгармаганлиги билан тушунтирилади. Стационар ҳолатда чуқур донор ХЗС нинг $x > w_d$ қисмида тўлатилган бўлади. Шунинг учун тескари кучланиш уланиши ($0 \rightarrow U$) билан ΔX қатламдаги сатҳдан электрон кета бошлайди ва натижада бу қатламда ҳажмий заряд зичлиги-

нинг ошишига олиб келади. Демак, χ_{3C} нинг қалинлигини ва сигимини вақт бўйича камайишига олиб келади (Δx қатлам қалинлиги ҳам камаяди). (5.25) ва (5.26) формулалар билан аниқланган юқори частотали сигимнинг стационар қиймати C_{CB} ни C_{CB} қиймати билан солиштиришдан $C_{CB} > C_{CB}$ бўлишлигини кўрамыз.

Чуқур сатҳли киришмаларнинг стационар сигимга ва ЭНС даги ўтказувчанлигига таъсирини кўрайлик. Катта тескари кучланишда, стационар юқори частотали сигим тахминан паст частотали сигимга тенг $C_{CB} = C_H$. χ_{3C} нинг ҳамма қисмида чуқур донорлар деярли ионлашган бўлади, шунинг учун бу ҳолда сигим саёз донорлар бўлган ҳолдагидан катта бўлади. Лекин электронейтраллик соҳаси $X > h$ да чуқур донорлар батамом электрон билан тўлатилган ва ЭНС нинг ўтказувчанлигига таъсир кўрсатмайди. Чуқур донорлар учун $e_p \gg e_n$ тенгсизлик бажарилган ҳолда чуқур донорлар χ_{3C} нинг ҳамма қисмида электрон билан батамом тўлатилган ($N_u + N_{CD}$), шунинг учун чуқур донорлар сигимга деярли таъсир кўрсатмайди, $C^{-2}(U)$ тўғри чизик оғиш бурчагининг тангенци N_{CD}^{-1} га пропорционал бўлади. Чуқур донорларнинг бўлишлиги ЭНС нинг ўтказувчанлигига ҳам таъсир кўрсатмайди, чунки ЭНС да улар батамом электрон билан тўлатилган бўлади.

Диод базасида саёз донордан ташқари, концентрацияси N_A бўлган чуқур акцептор марказ бўлган ҳолни кўрайлик.

1) Чуқур акцепторлар учун $e_n \gg e_p$ тенгсизлик ўринли бўлсин. χ_{3C} нинг деярли ҳамма қисмида чуқур акцептор сатҳ электрон билан тўлатилмаган, яъни ионлашмаган ($N_u = N_{CD}$), шунинг учун чуқур сатҳнинг мавжудлиги сигим қийматига деярли таъсир кўрсатмайди. $C^{-2}(U)$ тўғри чизик оғиш бурчагининг тангенци N_{CD}^{-1} га пропорционал бўлади. Лекин ЭНС да чуқур акцептор бор бўлиши ЭНС нинг ўтказувчанлигини камайтиради (компенсациялайди).

2) Чуқур акцептор сатҳ учун $e_p \gg e_n$ бўлган ҳолда эса χ_{3C} нинг ҳамма қисмида чуқур акцептор сатҳ электрон билан тўлатилган, яъни ионлашган ($N_u = N_{CD} - N_A$) бўлади. Шунинг учун бундай сатҳни диод базасида мавжуд бўлиши сигим ҳамда ЭНС ўтказувчанлигининг камайишига олиб келади.

5.4 §. Яримўтказгичлар чуқур марказлари параметрларини аниқлашнинг сиғим спектроскопия усуллари

Чуқур сатҳли марказ (ЧСМ)лар параметрларини ўлчашнинг сиғим спектроскопия усули асосида p - n ўтиш (ёки шоттки баръери)нинг ҳажмий заряд соҳаси (ХЗС)даги чуқур сатҳ (ЧС) ларни электрон билан тўлдирилганлик даражасига, барьер сиғимиغا, қўйилган тескари кучланиш, ўлчаш кучланиш частотаси, ёруғлик, ҳароратларнинг таъсиридан юзага келган қонуниятларни қайд қилиш (ўлчаш) ётади. Ҳозирги пайтда бир-биридан ЧСни электрон билан тўлдириш, камбағаллаштириш шароитлари билан фарқ қиладиган сиғим спектроскопия усулининг бир қанча турлари мавжуд. Уларга сиғимнинг изотермик релаксация усулини, иссиқлик билан рағбатлантирилган сиғим релаксация усулини, фотосиғим, частотавий усулни кўрсатиш мумкин. Бу усуллардан бирини қўллаб юқорида кўрилган ташқи омиллар таъсиридан содир бўлган сиғим ўзгаришининг умумий қонуниятлари асосида чуқур марказга тутилиш кесимларини, термик, фотоионланиш коэффицентларини ўлчаш мумкин. Бу усулларнинг асосий камчилиги ўлчаш учун махсус структуралар, масалан, p - n ўтишли диод: Шоттки баръери ёки металл-диэлектрик яримўтказгичли структуралардан бирини тайёрлашни кўрсатиш мумкин.

Яримўтказгичларда чуқур сатҳ параметрларини аниқлашнинг сиғим спектроскопия усуллари, физик параметрларни сиғим орқали аниқлаш усулининг бир кўриниши бўлгани учун уларга характерли бўлган ҳамма хатолик манбалари юқоридаги усулларга ҳам тааллуққидир. Ўлчашдаги хатоликни баҳолаш шуни кўрсатадики, ЧС нинг таққиланган зонадаги энергиявий ҳолатини, концентрациясини аниқлашдаги хатолик 10% дан ошмайди, киришма ионланиш кесимининг ўз катталиги тартибидаги хатолик билан ўлчаш мумкин.

а. Сиғимнинг изотермик релаксацияси усули

Бу усул билан ЧСМ параметрларини ўлчашнинг физик асосини кескин p^+ - n ўтиш ёки металл- n тип яримўтказгич структурали (шоттки баръери) мисолида кўрайлик. Бу таҳлил тескари типдаги диод базаси учун ҳам ўхшаш

бўлади. Аниқлик киритиш учун кескин P^+ - n ўтишли диод n -типдаги яримўтказгич намуна асосида олинган. Яримўтказгичда концентрацияси N_{CD} бўлган саёз сатҳли донор билан бир қаторда, энергиявий сатҳи E_c , концентрацияси N_D бўлган чуқур сатҳли донор бўлиб, у тақиқланган зона ярмининг юқори қисмида жойлашган ва $e^- > e^+$ тенгсизлик, диоднинг электр нейтраллик соҳаси (ЭНС)да $E_F - E_c > 4$ кТ тенгсизлик бажарилади. Диодга V тескари кучланиш улангандан сўнг стационар ҳолатда заряд ташувчилар билан камбағаллашган (соҳа) қатлам (ХЗС нинг кенглиги) чегараси h_c нуқтага мос келиб, у кескинлашади. Ферми сатҳи чуқур сатҳни W_c нуқтада кесади. Стационар ҳолатда чуқур донорлар $0 < X < W_c$ соҳада ферми сатҳидан юқорида бўлгани учун улар тўла ионлашган ҳолатда бўлади. Бу соҳадаги ионлашган марказ концентрацияси

$$N_v = N_{CD} + N_{rD} \quad (5.31)$$

бўлади. $W_c < x < h_c$ соҳада чуқур сатҳ тўлатилган, шунинг учун бу соҳада ионлашган марказ концентрацияси ионлашган саёз донор концентрацияси билан аниқланади:

$$N_v = N_{CD} \quad (5.32)$$

ва $X = W_c$ текисликда киришмалар концентрацияси кескин (сакраб) ўзгаради. Энди структурага тескари кучланиш уланган ($0 \rightarrow -V$) да юзага келган ностационар жараёнда чуқур сатҳ тўлдирилганлигини, барьер сифимининг вақт бўйича ўзгаришини, яъни улар кинетикасини кўрайлик. Структурага тескари кучланиш қўйилгандан сўнг $t = 0$ да ҳажмий заряд соҳаси кенгайиб, $h(0)$ га етади. Чуқур сатҳни электрон билан қашшоқланиш тезлиги унча катта бўлмагани сабабли, бошланғич вақт $t = 0$ да тескари кучланиш улангандан сўнг ҳажмий заряд фақат саёз донор киришма иони N_{CD} билан юзага келган бўлади. Вақт ўтиши билан чуқур сатҳни $e^- = \tau^{-1}$ тезлик билан қашшоқланиши ҳажмий зарядни ўзгаришига олиб келади.

Чуқур сатҳнинг ионлашиб боришидан ўтказувчан зонасига чиқарилган электронни электр майдони ХЗС дан ташқарига тез чиқариб ташлайди. Бу эса электроннинг чуқур сатҳга қайта тутилиш тезлигини камайтиради. На-

тижада вақт ўтиши билан ҳажмий заряднинг стационар тақсимои ўрнатилади. Тескари кучланиш уланганда ҳажмий заряд соҳаси $W(t)$ нинг кенгайиши ҳам содир бўлади, у ҳам вақт ўтиши билан ўзининг стационар W_c қийматига интилади. Ностационар жараёнда ХЗС ни уч қисмга бўлиб кўриш мумкин.

1. $t = 0$ да структурага 0 дан V гача бўлган тескари кучланиш улаймиз у кейинчалик ўзгармайди. ХЗС нинг бошланғич қалинлиги h_0 базанинг қалинлиги l дан кичик бўлсин деб қабул қиламиз. Бу шарт

$$N_{w0} > \frac{2\epsilon_a(V + V_k)}{eZ^2} \quad (5.33)$$

тенгсизлик ўринли бўлса бажарилади. Бу ерда N_{w0} — ХЗС даги ионланиш марказнинг бошланғич концентрацияси, юқорида кўрганимиздек, $t > 0$ да ХЗС нинг $0 < X < W_c$ қисмида ионлашган марказ концентрацияси

$$N_s = N_{cd} + N_{rd} \quad (5.34a)$$

бўлади, чунки бу соҳада чуқур донор сатҳ ферми сатҳидан юқорида бўлгани учун у тўла ионлашган ҳолатда бўлади.

2. $W_c < X < Wh(t)$ соҳада ҳажмий заряд вақт ўтиши билан чуқур донорнинг ионланиши туфайли ортиб боради. ХЗС даги тўла ионлашган марказ концентрациясининг вақт бўйича ўзгариши

$$N_a = (N_{cd} + N_{rd}) \left[1 - a \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (5.346)$$

орқали ифодаланади. Бу ерда $a = N_{rd}/(N_{rd} + N_{cd})$.

3. $W_a(t) < x < h(t)$ соҳасида, чуқур донор сатҳи ферми сатҳидан пастда жойлашган бўлиб, у электрон билан тўлатилган. Шунинг учун ҳажмий заряд зичлиги ионлашган саёз донор концентрацияси N_{cd} билан аниқланади.

$$N_v = N_{cd} \quad (5.35)$$

Булардан кўринадики, структура барьер сифимининг вақт бўйича ўзгариши χ_{3C} нинг $W_c < X < W_n(t)$ қисмидаги чуқур сатҳли донорларнинг ионланиши туфайли содир бўлади. Бу уч соҳани ўз ичига олган χ_{3C} нинг чегарасида Пуассон тенгламасини интеграллаб, аниқланган кескин p^+ - n ўтиш потенциаллар айирмаси

$$U + U_x = \frac{e}{\epsilon_s} \int_0^{h(t)} x N_n(x, t) dx \quad (5.36)$$

χ_{3C} нинг кенглиги $h(t)$ ни топишга имкон беради ва уни билган ҳолда (5.25) дан вақт бўйича ўзгарувчан барьер сифимининг формуласи топилади. Ҳисоблашларнинг кўрсатишича, $\left(\frac{C(t)}{S}\right)^2$ нинг умумий ифодаси орқали тажриба натижаларидан χ_{3C} параметрларини аниқлаш анча мураккаб. Шунинг учун барьер сифимининг ифодасини соддалаштирувчи баъзи бир хусусий ҳолларни таҳлил қилайлик.

а) p^+ - n ўтиш ёки шоттки барьерига қўйилган тескари кучланиш катта $U > U_x$ ва чуқур, саёз донорлар концентрация N_{cd}, N_{dp} лари катталиги бир тартибда бўлсин, у вақтда $w \ll h$; $h - w_n \ll h$ ва $w_n \approx h$ бўлади, яъни (5.34 б) муносабат χ_{3C} нинг ҳамма қисмида ўринли бўлади. Бу ҳолда (5.36) ни интеграллаб ва (5.25) ни қўллаб, структура барьер сифими

$$\left(\frac{C(t)}{S}\right)^2 = \frac{\epsilon_s(N_{cd} + N_{dp})}{2(V + V_x)} [1 - ae^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (5.37)$$

билан аниқланишини кўрамиз (5.37) га $t \rightarrow \infty$ қўйиб, сифимнинг стационар қиймати C_c ҳисобланади. Уни ва (5.37) ни қўллаб сифимнинг

$$\frac{C_c^2 - C^2(t)}{C_c^2} = a \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.38)$$

кўринишдаги формула билан аниқланишини кўрамиз. Бу ифодани қўллаб тажрибада аниқланган $C_c^2 - C^2(t)$ нинг вақтга боғланишидан τ — қийматини аниқлаш мумкин-

лигини кўрамиз (5.38) га $t=0$ ни қўйиб концентрациялар нисбатининг

$$\frac{N_{rD}}{N_{CD}} = \left(\frac{C_c}{C_d} \right)^2 - 1 \quad (5.39)$$

билан аниқланишини кўрамиз. Бу ерда C_3 — юқори частотали сигимнинг бошланғич $V=0$ даги қиймати C_3 , C_e ларни тажрибадан аниқланган қийматларини билган ҳолда (5.39) дан концентрация N_{rD} ни ўлчаш мумкин. N_{CD} ни эса $C^2(V)$ боғланишдан топилади:

б) чуқур сатҳли донор концентрацияси кичик $N_{rD} \ll N_{CD}$ ҳамда тескари кучланиш катта бўлсин $V \gg V_k$. У вақтда (5.38) ва (5.39) ифодалар

$$\frac{C_c - C(t)}{C_e} = \frac{N_{rD}}{2N_{CD}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.40)$$

$$\frac{N_{rD}}{N_{CD}} = \frac{2\Delta C}{C_e} \quad (5.41)$$

кўринишни оладилар. Энди структуранинг n -тип базисида чуқур сатҳли акцептор бўлган ҳолни кўрайлик. Унинг концентрацияси N_{rA} саёз донор концентрацияси N_{CD} дан кичик $N_{rA} < N_{CD}$. Бу ҳолда ҳам (5.34) (5.35) муносабатлар ўринли бўлиб, N_{dC} ва a лар

$$\begin{aligned} N_{dC} &= N_{CD}, & a &= N_{rA}/N_{CD} \\ N_{dC}(1-a) &= N_{CD} - N_{rA} \end{aligned} \quad (5.42)$$

ифодалар орқали аниқланади. Структурага қўйилган тескари кучланиш катта $V \gg V_k$ ва N_{CD} , N_{rA} бир тартибда бўлган ҳолда, N_{rA} ни қиймати

$$\frac{N_{rA}}{N_{CD} - N_{rA}} = \left(\frac{C_c}{C_d} \right)^2 - 1 \quad (5.43)$$

билан аниқланади. $N_{CD} - N_{rA}$ нинг қиймати $C^{-2}(V)$ боғланишдан топилади. $V \gg V_k$ ва $N_{rA} \ll N_{CD}$ бўлган ҳолда эса, τ , N_{rA} қийматлари

$$\frac{C_c - C(t)}{C_e} = \frac{N_{rA}}{2N_{CD}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.44a)$$

$$\frac{N_{rA}}{N_{CD}} = \frac{2\Delta C}{C_c} \quad (5.446)$$

ифодадан топилади;

в) ЧС учун $e_n \ll e$, бўлган ҳолни кўрайлик. Структурага тескари кучланиш уланган ($0 \rightarrow -V$) дан сўнг сатҳнинг тўлатилганлик даражаси деярли ўзгармайди, ХЗС нинг ΔX_0 — юпқа қатлами электрон билан тўла бошлайди, у деярли сифимга таъсир кўрсатмайди. Сатҳларни қайта зарядланишини кузатиш учун сатҳни (электрон билан тўлдириш масаласи тўғри ток ўтказиш билан) уйғотиш тўхта-тилгандан сўнг сатҳ (5.21) орқали аниқланувчи вақт доимийси τ билан тўла бошлайди. Бунда ҳажмий заряд зичлиги камаяди. У ўз навбатида чуқур марказ донор, акцептор бўлишидан қатъи назар сифимнинг камайишига олиб келади. $V \gg V_K$ бўлган ҳолда сифим релаксациясини кўрайлик. У вақтда ХЗСнинг ҳамма қисмида уйғотиш тўхтагандан сўнг, ионлашган марказ концентрациясининг вақт бўйича ўзгариши

$$N_s(t) = N_{\infty} \left[1 + d \cdot b \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (5.45)$$

билан аниқланади. Агар чуқур марказ донор бўлса, у ҳолда

$$N_{\infty} = N_{CD}, \quad b = N_{rD}/N_{CD}$$

Агар чуқур марказ акцептор бўлса, у ҳолда $N_{\infty} = N_{CD} - N_{rA}$, $b = N_{rA}/(N_{CD} - N_{rA})$, d — коэффициент асосий бўлмаган заряд ташувчилар билан сатҳни тўлдирилганлик даражаси бўлиб, у $d = 1 - f_{np}$ орқали ифодаланади. Бу ерда заряд ташувчилар кучли инжекциялашда, $f_{np} = \frac{\gamma_n}{\gamma_n + \gamma_p}$ тўғри ток

ўтганда сатҳни тўлдирилганлик даражаси, транзистор структурани қўллашда ёки оптик усул билан уйғотишда

$d = \frac{P_c}{P_c + P_i}$ билан ифодаланади. P_c — ковакнинг стационар концентрацияси. Хусусий ҳолда $\tau_{\infty} \ll \tau$ бўлганда $d=1$ бўлади. (5.37) ва (5.45) ларни қўллаб

$$\frac{C^2(t) - C_c^2}{C_c^2} = b d \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.46)$$

(5.46) дан чукур марказ агар донор бўлса,

$$\left(\frac{C_6}{C_c}\right)^2 - 1 = d \frac{N_{cd}}{N_{cd}}, \quad (5.47)$$

чукур марказ агар акцептор бўлса,

$$\left(\frac{C_6}{C_c}\right)^2 - 1 = d \frac{N_{cd}}{N_{cd} - N_{ca}} \quad (5.48)$$

бўлишлигини кўраимиз. Барьер сигимининг релаксацияси оптик уйғотиш (ёруғлик) орқали ҳам кузатилиши мумкин. P^+ -н ўтишда саёз донор ҳамда чукур донор бўлган ҳолни кўрайлик. Аниқлик киритиш учун $e_n \gg e_p$ ва $V \gg V_n$ бўлсин деб олайлик. Шундай температура олиндики, сатҳнинг бошланғич тўлатилганлиги узоқ муддатда сақлансин. Бошланғич вақтда сатҳ стационар тўлдирилганликка эга бўлсин, яъни ХЗС нинг ҳамма қисмида электрон билан деярли тўлатилмаган бўлсин, $t=0$ да диодни фотон энергияси $hw \geq E_g$ бўлган ёруғлик орқали P^+ томонидан ёритамиз. Бу вақт доимийси τ_{zn} билан сатҳни электрон билан тўлишига ва натижада сигимнинг камайишига олиб келади. ХЗС да электроннинг дрейф тезлиги тўйинишига эришгани учун τ_{zn} координатага боғлиқ бўлмайди деб қараш мумкин. У вақтда $N_n(t)$ куйидаги ифода

$$N_n(t) = N_{cd} + N_{cd} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.49)$$

билан аниқланади. (5.49) ни $\left(\frac{C(t)}{S}\right)^2 = \frac{e e_a N_n(t)}{2(V + V_k)}$ га қўйиб сигимнинг вақт бўйича боғланиши

$$\frac{C^2(t) - C_c^2}{C_c^2} = \frac{N_{cd}}{N_{cd}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{zn}}\right) \quad (5.50)$$

билан аниқланишини кўрамиз. Тажрибадан аниқланган $f(t) = c^2(t) - C_c^2$ боғланишдан $\tau_{\text{ин}}$ ни топиш мумкин ва

$$\tau_{\text{ин}} = \frac{eV_{\text{др}}}{j\gamma_n} = \frac{eV_{\text{др}}}{jS_n U_n}$$

орқали γ_n аниқланади. Бу ерда j — ток зичлиги, $V_{\text{др}}$ — дрейф тезлиги $N_{\text{рд}} \ll N_{\text{сд}}$ бўлган ҳолда сифим релаксацияси

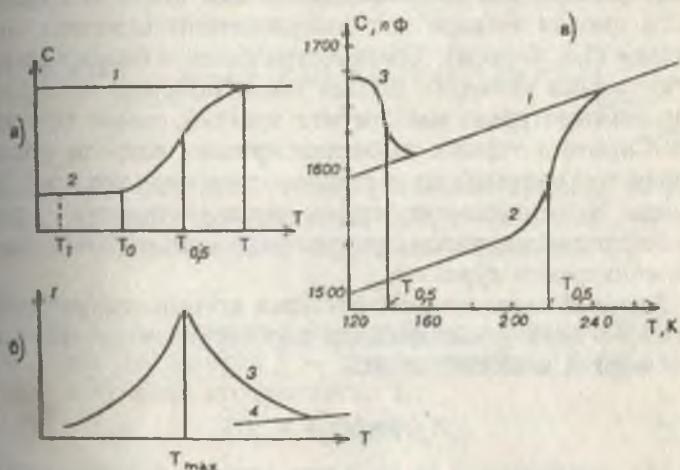
$$\frac{C(t) - C_c}{C_c} = \frac{N_{\text{рд}}}{2N_{\text{сд}}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{ин}}}\right) \quad (5.51)$$

билан ифодаланади. Энди $x > w_0$ соҳа электрон билан тўлатилган бўлсин. $t = 0$ да диодни n -соҳасидан фотон энергияси $\hbar\omega \geq E_g$ бўлган ёруғлик билан ёритилса, сатҳни ковак $\tau_{\text{сп}}$ вақт доимийси билан тўлдира бошлайди ва натижада сифимнинг ошишига олиб келади. Бу ҳолда ковак дрейф тезлигининг майдонга боғлиқлигини, яъни $\tau_{\text{сп}}$ нинг масофага боғлиқлигини инобатга олиш керак.

б. Термик рағбатлантирилган сифимнинг релаксация усули

Чуқур марказ параметрларини ўлчашнинг бу усули шоттки барьер (тўсиқ)ли ёки кескин P^+ - n ўтишли структура (диод) ҳароратининг ошиши билан барьер сифимининг ўзгаришини қайд қилишга асосланган. Барьер сифимининг бу ўзгариши иссиқлик таъсирида чуқур сатҳни қайта зарядланишидан содир бўлади. Бу усулнинг моҳиятини ёритишда ҳам яримўтказгичда концентрацияси $N_{\text{сд}}$ бўлган саёз сатҳли донордан ташқари, тақиқланган зонада энергиявий сатҳи E_c , концентрацияси $N_{\text{д}}$ бўлган чуқур сатҳли донор бўлсин ва бу чуқур сатҳ учун $e_n \gg e_c$ тенгсизлик бажарилади деб қабул қиламиз. Диодни иситиш, соvuтиш жараёнларида ундаги чуқур сатҳнинг тўлдирилганлигини ва у билан боғлиқ сифимнинг ўзгаришини кўрайлик. Дастлаб структурани шундай температура $T > T_c$ да ушлаймизки, унда чуқур сатҳнинг электрон билан стационар тўлдирилганлиги тез ўрнатилсин ($\tau \ll \tau_{\text{улч}}$) ва $\omega\tau \gg 1$ тенгсизлик бажарилсин. Бунда ўлчанган сифим юқори частотали барьер сифимнинг стационар C_c қийматини беради. Кейин диодни тескари V кучланиш уланган ҳолда

чуқур сатҳнинг бошланғич ҳолатдаги тўлдирилганлиги узоқ сақланидиган T_1 температурагача совутишимиз. Бу жараёнда сатҳнинг тўлдирилганлик даражаси деярли ўзгармайди. Шунинг учун сиғимнинг температурага кучсиз боғланиши кузатилади (5.5а-рasm, боғланиш). Бу боғланиш чуқур сатҳнинг стационар тўлдирилганлиги $n_{\text{ст}}$ ва стационар тўлдирилганликка мос келган стационар барьер сиғими $C_{\text{ст}}$ ни англатади. Энди тескари V кучланиш қўйилган ҳолда диодни T_1 дан бошлаб қиздираимиз. Бу жараёндаги сиғимнинг температурага боғланиши ҳам 1-боғланиш каби бўлади. Сўнг диодни, яна қайтадан тескари кучланиш қўйилмаган $V=0$ ҳолда, T_1 температурагача совутишимиз, сўнгра тескари кучланиш улаймиз. Бу температурада сатҳнинг бошланғич тўлдирилганлиги $n_{\text{ст}}$ ва унга мос си-



5.5-рasm. Бир зарядли чуқур маркази бўлган p - n ўтишда сиғим (а), тескари токнинг (б) температурага боғланиши. 1,4 — термик рағбатлантирилмаган; 2,3 — термик рағбатлантирилган чуқур сатҳ разряди бўлган ҳол учун. Тилла билан легирланган p - n ўтишли кремний диоди сиғимининг температурага боғланиши (в).

$N_c = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_v = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $S = 2,2 \text{ см}^2$, $U = 20 \text{ В}$, $b = 1 \text{ К/с}$.

1 — термик рағбатлантириш бўлмаганда чуқур сатҳ разряди;
 2 — акцептор сатҳи рағбатлантирилганда чуқур сатҳ разряди;
 3 — термик рағбатлантирилганда донор сатҳини электрон билан тўлиши
 $(DE_A = E_C - E_A = 0,5 \pm 0,04 \text{ эВ}$, $DE_D = E_D - E_V = 0,36 \pm 0,03 \text{ эВ}$, $e_s \ll e_p$,

фимнинг бошланғич қиймати C_6 узоқ сақланади. C_6 нинг қиймати C_c га нисбатан кичик. Энди диодга тескари V кучланиш уланган ҳолда унинг температурасини кўтара борамиз. Температуранинг T_1 дан T_0 оралиғида сатҳнинг бошланғич тўлдирилганлиги сақланиши туфайли сифимнинг температурага кучсиз боғланиши содир бўлади. Температуранинг T_0 дан T_c гача бўлган оралиғида эса структура сифимининг тез ўсиши кузатилади. Бу температура оралиғида сатҳнинг тўлдирилганлик релаксация вақти камаяди ва сатҳнинг термик рағбатлантирилган разряди (сатҳдан электроннинг иссиқлик таъсирида чиқиши) кузатилади. Бу ўз навбатида сифимнинг тез ўсишига олиб келади. Сатҳнинг термик рағбатлантирилган разряди тугагандан сўнг, ($T > T_c$ да) 1- ва 2-боғланишлар бир-бирига мос тушади. Сатҳнинг термик рағбатлантирилган разряди тескари ток релаксациясини ҳам юзага келтиради, яъни диодда тескари ток импульсининг оқишига олиб келади (5.5, 6-расм). Температура ошиши билан тескари V кучланиш қўйилган диодда ток кўтарилади ва маълум бир температурада максимумга эришиб, камая бошлайди. Сатҳнинг термик рағбатлантирилган разряди тугаши билан ток одатдаги диод стационар тескари токигача камаяди. Энди диоднинг термик рағбатлантирилган сифим ва ток релаксациялари орқали чуқур сатҳ параметрларини аниқлашни кўрайлик.

Ҳажмий зарядни ҳосил қилувчи ионлар концентрацияси X_3C нинг ҳамма қисмида бир хил бўлганда, ионлашган марказ концентрацияси

$$N_u(t) = N_{cd}^+ + N_{rd}^+(t) \quad (5.52)$$

билан аниқланади. Шу билан бирга, ионлашган чуқур донорлар концентрацияси

$$N_{rd}(t) = N_{rd} \left[1 - \exp \left(- \int_0^t e_n(t) dt \right) \right] \quad (5.53)$$

қонуният бўйича ошади. Унга мувофиқ нейтрал сатҳлар концентрацияси камаяди

$$n_r(t) = N_{rD} \exp \left[- \int_0^t e_n(t) dt \right]$$

Маълумки, тескари ток зичлиги чуқур сатҳидан ўтказувчан зонага вақт бирлигида ўтаётган электронлар сонига

$\left(\frac{dn_r}{dt} \right)$ пропорционал

$$j_{\text{тес.ток}} = e \frac{dn_r}{dt} = e \frac{d}{dt} N_{rD} \exp \left[- \int_0^t e_n(t) dt \right] = -e_n(t) n_r(t) \cdot e \quad (5.55)$$

Термик рағбатлантирилган тескари ток қандайдир температура T да максимумга эришгани учун (5.53) дан вақт бўйича олинган ҳосила $T = T_{\max}$ да нольга тенг бўлади.

$$\left(\frac{dj_{\text{тес.ток}}}{dt} \right)_{T=T_{\max}} = -e \frac{d}{dt} (e_n(t) \cdot n_r(t)) = e \frac{de_n}{dt} + e e_n \frac{dn_r}{dt} \Big|_{T_{\max}} = 0 \quad (5.56)$$

Модомики сатҳнинг термик рағбатлантирилган разряди кичик температура оралиғида содир бўлар экан, бу оралиқда температуранинг вақт бўйича ошишини

$$T = T_0 + \beta t$$

қўринишдаги чизикли қонуният бўйича боради деб ҳисоблаш мумкин. Бу ерда β — температуранинг ўсиш тезлигини аниқловчи коэффицент Kc^{-1}

$$dT = \beta dt \quad (5.58)$$

бўлишлигини назарда тутиб ва (5.18) ифодани қўллаб, (5.56) дан чуқур сатҳ ионланиш энергиясининг

$$\ln \left(\frac{T_{\max}^4}{\beta} \right) = \frac{\Delta E_r}{KT_{\max}} + \ln \left(\frac{\Delta E_r}{\kappa b V_n} \right) + \ln \left(1 + \frac{2\kappa T_{\max}}{\Delta E_r} \right) \quad (5.59)$$

ифода билан аниқланишини кўрамыз.

Амалиётда кўп ҳолларда $2KT_{\max} < \Delta E_r$ бўлади. У вақтда (5.59) ифода

$$\ln \left(\frac{T_{\max}^4}{\beta} \right) = \frac{\Delta E_r}{KT_{\max}} + \ln \left(\frac{\Delta E_r}{kbV} \right) \quad (5.60)$$

кўринишга келади. Бу формулани қўллаб, тажрибадан чуқур сатҳнинг ионланиш энергиясини аниқлаш учун структуранинг ҳар хил иситиш тезликлари β да термик рағбатлантирилган тескари токлари қайд қилинади ва токнинг максимумга эришган температуралари орқали $\ln \left(\frac{T_{\max}^4}{\beta} \right)$ ни $\frac{1}{T_{\max}}$ га боғланиши чизилади. Унинг оғиш бурчаги тангенсидан $\left(\frac{\Delta E_r}{k} \right)$, абсцисса ўқи $\left(\frac{1}{T_{\max}} \right)$ нинг кесишиш нуқтаси орқали V_b топилади. Энди термик рағбатлантирилган сиғимнинг релаксациясидан чуқур сатҳ ионланиш энергиясининг аниқланишини кўрайлик. Бунинг учун диод температураси чизиқли қонуният билан ўсиб бораётганида чуқур сатҳнинг ярмигача разрядланиши учун кетган вақт ҳисобланади, яъни $N_{rd}(t_{0,5}) = 0,5 N_{CD}$ ни (5.53) ифодага қўйиб ва $e_n = \tau_n^{-1}$ лигини назарда тутиб, (5.18) ни қўллаган ҳолда чуқур сатҳ ионланиш энергиясининг

$$\frac{\Delta E_r}{KT_{0,5}} = \ln \left(\frac{\gamma_n N_c T_{0,5}}{\beta \ln 2} \right) - \ln \left(\frac{\Delta E_r}{KT_{0,5}} \right) \quad (5.61)$$

кўринишдаги тақрибий ифодасини оламиз.

Бу $T_{0,5} = T_0 + \beta t_{0,5}$ ни $t = 0,5$ вақтдаги диод температура-си иккинчи томондан $t = t_{0,5}$ даги сиғими

$$\frac{C^2(t) - C_6^2}{C_c - C_6} = 0,5 \quad (5.62)$$

муносабат билан аниқланади. $T_{0,5}$ температура $C(t)$, C_6 , C_c лар тажриба натижаларидан топилади.

$N_{CD} \ll N_{rd}$ тенгсизлик бажарилганда (5.62) ифода

$$\frac{\Delta C(t_{0,5})}{\Delta C} = 0,5 \quad (5.63)$$

кўринишни олади. Бу ерда $\Delta C(t_{0,5}) = C(t_{0,5}) - C_6 \Delta C = C_6 - C_6 \cdot \Delta C(t)$ сифимнинг 1- ва 2-боғланишлари айирмасини ифодалайди. Назарий ҳисоблашларнинг кўрсатишича, чуқур сатҳ ионланиш энергиясини термик рағбатлантирилган ток максимуми бўйича аниқлашда (5.61) формуладан фойдаланиш ҳам мумкин, унда $T_{0,5}$ ни $T_{\max}$ га ўзгартирилади, холос.

Юқоридаги мулоҳазалардан кўринадики, термик рағбатлантирилган ток, сифим релаксациялари бўйича чуқур сатҳ параметрларини аниқлашда $T(t)$ нинг чизиқли боғланишда бўлишлик шарти бажарилиши керак. $T(t)$ нинг чизиқли боғланишига кенг температура оралиғида автоматик қурилмалар билан эришиш мумкин. Одатда, сатҳнинг термик рағбатлантирилган разряди кичик температура оралиғида содир бўлгани учун, бу соҳада $T(t)$ нинг ночизигий боғланишини (5.58) муносабат орқали апроксимациялаш мумкин.

Энди чуқур сатҳ концентрацияси N_{rd} ни аниқлашни кўрайлик. Структуранинг бошланғич ҳолатдаги температураси $T_6 = T_c$ ва унга тескари V кучланиш қўйилган бўлсин. Бу ҳолда ҳажмий заряд соҳасининг кенглиги $h(V, T)$, сифими $C(V, T)$ бўлсин. Тескари кучланиш V ни сақлаган ҳолда структурани T_1 температурагача совутсак, унинг ХЗС нинг кенглиги $h(V, T_1)$ ва сифими $C(V, T_1)$ бўлади. Бунда ХЗС нинг ҳажмий заряд зичлиги $\rho = e(N_{cd} + N_{rd})$ сақланади. T_1 температурада структура тескари V кучланишини V_1 гача камайтирсак, ХЗС нинг кенглиги $h(V_1, T_1)$ ва сифими $C(V_1, T_1)$ бўлади. Бунда ҳажмий заряд соҳасининг кенглиги бир мунча камаяди. Шу билан бирга, бу соҳада чуқур сатҳ заряди ўтказувчан зонадаги электрон билан компенсацияланади. T_1 температурада тескари V кучланишни V гача қайтадан тикласак, бу соҳа янгитдан асосий заряд ташувчилар билан камбағаллашади, лекин чуқур сатҳ ҳажмий заряд зичлигига таъсир кўрсатмайди, ХЗС нинг ҳажмий заряд зичлиги $\rho = eN_{cd}$ билан аниқланади. Тескари V кучланиш қўйилган ҳолда T_1 температурадан бошланғич ҳолатдаги температура T_c гача кўтарсак, у ҳолда сатҳнинг термик рағбатланган разряди туфайли, структура сифими ҳамда ХЗС нинг кенглиги ўзларининг бошланғич қийматлари $h(V, T)$ ва $C(V, T)$ га қайтадилар. Ҳисоблашларнинг кўрсатишича, юқорида кўрсатилган шароит-

ларда ўлчанган $C(V, T)$, $C(V, T_1)$, $C(V_1, T_1)$ сигимлар орқали чуқур сатҳ концентрацияси

$$N_{,D} = -N_{CD} \frac{C^2(V_1, T_1)[C^2(V, T_1) - C^2(V, T)]}{C^2(V, T_1)[C^2(V_1, T_1) - C^2(V, T)]}$$

формула билан аниқланиши мумкин. Агар $V_1=0$, $h(V_1, T_1)=0$ ва структура сигимлари $C(V, T)$ ва $C(V, T_1)$ нинг қийматлари бир-биридан кам фарқ қилса, у ҳолда $N_{,D}$

$$N_{,D} = 2N_{CD} \frac{C(V, T) - C(V, T_1)}{C(V, T_1)}$$

билан аниқланади. Шунини таъкидлаш керакки, чуқур сатҳ параметрларини аниқлашнинг термик рағбатлантирилган сигим, ток усулларининг ЧС параметрларини тез ва тақрибий баҳолашга қўллаш мақсадга мувофиқдир. Бу усуллар билан ўлчашнинг хатолигини камайтириш учун сигимнинг $C(t)$ ва токнинг $I(t)$ боғланишларини структура температурасининг ҳар хил ўсиш тезлиги (β) да ўлчаш зарур, лекин бу билан усулнинг асосий ютуғи, яъни усулнинг соддалиги ўз маъносини йўқотади.

в. Фотосигим усули

Бу усулда текшириладиган намуна металл-яримўтказгич, p - n ўтишли (структура) оптик криостатга жойлаштирилади ва кучланиш қўйилмаган $U=0$ ҳолатда совитилади, сўнгра тескари кучланиш қўйиб киришмавий ютилиш соҳасига мос келадиган ҳар хил тўлқин узунликтаги монохроматик ёруғлик билан ёритилиб, структура сигими ўлчанади. Қуйида ўлчанган сигимнинг спектрал боғланишидан ЧС параметрларини аниқлашнинг назарий асосини ва баъзи бир ифодаларини қисқача таҳлил қилайлик. Одатда паст температура (77К) да чуқур донор сатҳ $E_{,D}$ дан электроннинг ўтказувчан зонаси E_c га, валент зонаси E_v дан чуқур акцептор сатҳ $E_{,A}$ га иссиқлик таъсирида ўтиши, яъни термик генерация тезлигини кичик деб қаралади. Шунинг учун биз кўраётган ҳолда структура сигимининг ўзгариши ХЗС даги ЧС нинг фотоионланиши туфайли содир бўлади. Бундай ҳолат температураси 77К бўлан германий, кремний-арсенид-галлий намуна-

ларида ионланиш энергияси $\Delta E \geq 0,18$ эВ бўлган ЧС лар учун кузатилади. Маълумки, диоднинг ХЗС да эркин заряд ташувчилар концентрациялари Больцман тақсимооти билан аниқланади. ХЗС даги электр майдони эркин заряд ташувчиларни бу соҳадан ташқарига сиқиб чиқаргани учун уларнинг концентрацияси жуда кичик бўлади. Тескари қўйилган кучланиш $V > \frac{kT}{e}$ бўлганда, паст температураларда ХЗС да $p=0$ ва $n=0$ деб олинishi билан катта хатоликка йўл қўйилмайди. Шунинг учун (5.9а) тенгламадаги эркин заряд ташувчиларни ЧС га тутилиши билан боғлиқ ҳадларни инобатга олмаслик мумкин. У ҳолда ЧС даги электроннинг концентрациясини вақт бўйича ўзгариши фақат фотоионланиш туфайли содир бўлади ва у (5.9а) дан

$$\frac{dn_r}{dt} = [\chi_p \cdot (N_r - n_r) - \chi_n n_r] I, \quad (5.66)$$

кўринишдаги тенглама билан аниқланишини кўрамиз. Стационар ҳолат $\frac{dn_r}{dt} = 0$ да (5.66) дан ЧС нинг электрон билан тўлдирилганлик даражаси

$$\frac{n_{rc}}{N_r} = \frac{\chi_p(h\nu)}{\chi_p(h\nu) + \chi(h\nu)} \quad (5.67)$$

билан аниқланади. (5.66) тенгламанинг $t=0$ да $n_r = N_r$ бошланғич шартни қаноатлантирувчи ечими, яъни чуқур донор сатҳнинг ностационар жараёнда электрон билан тўлдирилганлик даражаси

$$\frac{n_{rc}}{N_r} = \frac{\chi_p(h\nu)}{\chi_n(h\nu) + \chi_p(h\nu)} + \frac{\chi_n(h\nu)}{\chi_n(h\nu) + \chi_p(h\nu)} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.68)$$

билан аниқланади. (5.66) тенгламанинг $t=0$ да $n_r=0$ бошланғич шартни қаноатлантирувчи ечими, яъни чуқур акцептор сатҳнинг электрон билан тўлдирилганлик даражаси

$$\frac{n_r}{N_r} = \frac{\chi_p(h\nu)}{\chi_n(h\nu) + \chi_p(h\nu)} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (5.69)$$

билан аниқланади. Бу ерда

$$\tau^{-1} = [\chi_n(h\nu) + \chi_p(h\nu)] I, \quad (5.70)$$

(5.68) ва (5.69) ифодалардан кўринадик, ЧС ларни оптик қайта зарядлаш экспонента қонунияти бўйича бир хил вақт доимийси t билан содир бўлади. Фотосиғимнинг фотон энергиясига боғланишини учта соҳага ажратиш мумкин.

1. Фотон энергиясининг ЧС ионланиш энергиясидан кичик бўлган $h\nu < \Delta E$, соҳаси. Бу соҳада сатҳни қайтадан оптик ўтишлар билан зарядлашнинг иложи бўлмайди ва натижада сатҳнинг тўлдирилганлик даражаси ўзгармайди.

2. Фотон энергиясининг $\Delta E < h\nu < E_g - \Delta E$, соҳаси. Бу соҳада сатҳнинг тақиқланган зона ярмидан юқори ёки паст қисмида жойланишига қараб, $\chi_n(h\nu) > 0$, $\chi_p(h\nu) = 0$ ёки $\chi_p(h\nu) > 0$, $\chi_n(h\nu) = 0$ бўлади. Донор чуқур сатҳнинг тўлдирилганлик даражаси бу соҳада $\chi_n \neq 0$, $\chi_p = 0$ бўлишлигини назарда тутсак, (5.68) дан

$$\frac{n_r}{N_r} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.71)$$

билан аниқланишини кўрамыз. Чуқур акцептор сатҳининг тўлдирилганлик даражаси $\frac{n_r}{N_r}$ (5.69) дан бу соҳада $\chi_p > 0$, $\chi_n = 0$ бўлишини назарда тутсак,

$$\frac{n_r}{N_r} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.72)$$

келиб чиқади. Шундай қилиб, фотон энергиясининг электронни E_{rD} дан E_c га E_v дан E_{rA} га чиқаришнинг етарли соҳасида структурани узоқ муддатли ёритишдан чуқур донор сатҳининг электрон билан тўла қашшоқланиши, чуқур акцептор сатҳининг тўлиши содир бўлади.

3. Фотон энергиясининг $E_g - \Delta E < h\nu \leq E_g$ соҳаси. Бу спектрал соҳада иккита оптик ўтиш, яъни электронни ёруғлик таъсирида E_{rD} дан E_c га ва E_v дан E_{rA} га ўтиши кузатилади. Узоқ муддатли ёритишдан сўнг, яъни $t \rightarrow \infty$ да

$t \gg \tau$ бўлади. (5.68) ва (5.69) ларга кўра сатҳнинг тўлдирилганлик даражаси

$$\frac{n_r}{N_r} = \frac{\chi_p(h\nu)}{\chi_n(h\nu) + \chi_p(h\nu)} \quad (5.73)$$

билан аниқланади. Бундан кўринадик, сатҳнинг тўлдирилганлик даражаси фақат электронни, ковакни фотоионланиш кесимлари $\chi_n(h\nu)$ ва $\chi_p(h\nu)$ нинг спектрал боғланиши билан аниқланиб, у на ёруғлик интенсивлигига, на сатҳнинг бошланғич ҳолатда қандай тўлдирилганлигига боғлиқ эмас. Агар диоднинг p -тип базасида ЧС тақиқланган зона ярмининг юқори қисмида ёки n -тип базасида тақиқланган зона ярмининг қуйи қисмида жойлашган бўлса, фотосиғимни ўлчашда уни қайта зарядлаш фақат иккита $E_r \rightarrow E_c$, $E_v \rightarrow E_r$ оптик ўтишлар фотон энергиясининг $h\nu > (E_g - \Delta E)$ соҳасида мумкин бўлади. Бундай сатҳларни текширишдан олдин улар асосий бўлмаган заряд ташувчилар билан қайта зарядланади ва сўнг $N_s = f(t)$ боғланиш ўлчанади. Бундай усул билан ЧС параметрларини ўлчаш индукцияланган фотосиғим усули деб юритилади.

Фотосиғимни ўлчашда ЧС ни қайта зарядлаш одатда диод сирти энергияси $h\nu \geq E_g$ бўлган ёруғлик билан ёритиш орқали амалга оширилади. Бу соҳада ютилиш коэффициенти $\alpha \gg d^{-1}$ (d — диод сиртидан p - n ўтиш чегарасигача бўлган масофа) бўлади. Структурани ёритишдан ҳосил бўлган электрон ковак жуфтлари p - n ўтиш чегараси томон диффузияланадилар ва ХЗС да ажраладилар. ХЗС дан фақат асосий бўлмаган заряд ташувчилар ўтади. Хусусий ютилиш соҳасида ЧС нинг қайта зарядланишидан юзага келган диод сиғимини ўзгаришига олиб келади:

$$N_u(t) = N_{CD} + N_{rD} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{3n}}\right) \quad (5.74)$$

экспоненциал қонуният бўйича ўзгаради. ЧС ни тўлдириш жараёнининг вақт доимийси τ_{3n} ни ўлчаб,

$$\tau_{3n} = \frac{e \cdot V_{sp}}{f \cdot \gamma_n} \quad (5.75)$$

ифодасидан заряд ташувчиларнинг марказга тутилиш кесими γ_n ни аниқлаш мумкин. Диффузион диодларда эса битта чуқур сатҳ узун электроннинг ҳам ковакни тутилиш кесимларини аниқлаш мумкин. Фотосигим усули билан ЧС энг кичик концентрациясини қайд қилиш, ўлчаш қурилмасининг сезгирлиги диоднинг тула сигмига, сатҳнинг фотоионланиш кесимига боғлиқ бўлиб, у изотермик сигим релаксацияси усули каби

$$N_r = N_n \cdot \frac{2\Delta C}{C} \quad (5.76)$$

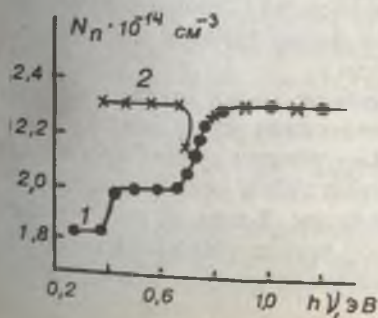
билан аниқланади. Тажрибаларнинг кўрсатишича, сигимни ўлчашда ўзгарувчан ток кўприги қўлланилганда $\frac{\Delta C}{C}$ нинг кичик қиймати 10^{-2} - 10^{-3} тартибида бўлади. Модомики, намунада киришмалар умумий концентрацияси 10^{13} см⁻³ бўлганда, чуқур сатҳнинг концентрацияси 10^{10} - 10^{11} см⁻³ бўлсагина кузатиш мумкин. Бошқача айтганда, юзаси 0,1 см² ХЗС кенглиги 30 мкм бўлган диодда $3 \cdot 10^8$ - $3 \cdot 10^7$ тагача киришма атомини қайд қилиш мумкин. Бу усулнинг камчилиги сифатида ЧС нинг фотоионланиш кесими билан чекланганлигини ва киришмавий ютилишни ёруғлик интенсивлигига боғлиқлигини кўрсатиш мумкин. Узлуксиз монохроматик ёруғлик спектрлари одатда иссиқлик манбаларини (глобар, Нернст штифт) қўллаш орқали олинади. Уларнинг интенсивлиги нисбатан кичик бўлади. Диод сиртига тушаётган монохроматик ёруғлик интенсивлиги 10^{15} - 10^{16} квант/см²·с дан ошмайди. Агар $x < 10^{20}$ см² бўлса, ЧС ни оптик ўтишлар билан қайта зарядлашнинг вақт доимийси $\tau \geq 10^{-1}$ с бўлади. Сигимнинг бундай секин релаксациясини фақат ЧС нинг катта концентрациясида, қурилма турғун ишлаганда ўлчаш мумкин. ЧС энергия ионизацияси фотосигим спектридан унинг ўзгариши кузатиладиган энг кичик фотон энергияси орқали топилиши мумкин. Унинг аниқ қиймати қурилатган сатҳда ёруғликнинг ютилиш назарияси билан аниқланган боғланишдан топилади. Яримўтказгичларда баъзи бир киришмалар кўп зарядли ҳолатда бўлган тутқич марказларни ҳосил қилади. Улар кристалл панжарада ҳар хил ҳолатда бўлиши ва комплекслар, атомлар комп-

лекси ҳосил қилиши мумкин. Бу ҳолатда диоднинг тўла фотосиғим спектри ҳар бир сатҳ, фотосиғим спектри йи-гиндисидан иборат бўлади. Фотосиғимнинг ўзгариш табиатига қараб, сатҳ энергияси ўзгарувчан зона *тубига* ёки валент зона *шипига* нисбатан ўлчашни аниқлайди. Биринчи ҳолда чуқур сатҳнинг камбағаллашидан ҳажмий заряд зичлиги ортиши туфайли, структура сиғими ўсади (сиғим ўзгариши мусбат), иккинчи ҳолда чуқур сатҳдан ковакни валент зонага чиқариш туфайли, сиғим камаяди. (Сиғим ўзгариши манфий.)

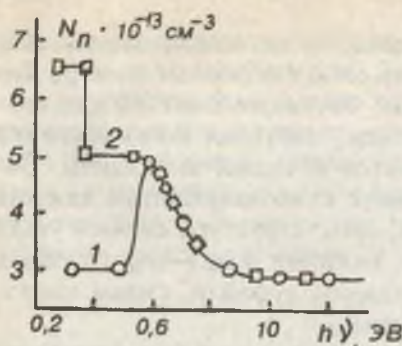
Фотосиғим усули билан тутқич асосий бўлмаган заряд ташувчилар унинг марказ параметрларининг аниқланиши унинг асосий ютуғидир.

Тилла киришмали кескин $n^+ - p$ ўтишнинг фотосиғим индукцияланган фотосиғим спектрлари 5.6-расмда келтирилган. Фотосиғим, яъни χ_{3C} да ионлашган марказ концентрацияси N_n нинг биринчи поғонаси фотон энергиясининг $h\nu = 0,34$ эВ дан бошлаб кузатилади. У бошқа усуллар билан аниқланган тилла киришмасининг қуйи сатҳи ионланиш энергиясига мос келади.

N_n нинг бу энергияда кескин ўзгариши кўриладиган сатҳнинг муайян фотоионланиш энергиясига эга эканлигидан далолат беради. Фотон энергиясини $h\nu \geq 0,7$ эВ соҳасида N_n нинг янгитдан ортиши кузатилади. Бу спектрал соҳада тилла юқори сатҳи орқали иккита оптик ўтишлар бўлиши мумкин. ($E_c \rightarrow E_c$ ва $E_v \rightarrow E_v$). $N_n(t)$ боғланиш бу сатҳ учун $\frac{\chi_p}{\chi_n} = f(h\nu)$ боғланишга мос тушади. Фотон энергиясининг $h\nu > 0,8$ эВ соҳасида N_n тўйинишга инти-



5.6-расм. Тилла киришмали $n^+ - p$ диоднинг фотосиғим спектри (1) индукцияланган фотосиғим спектри (2).



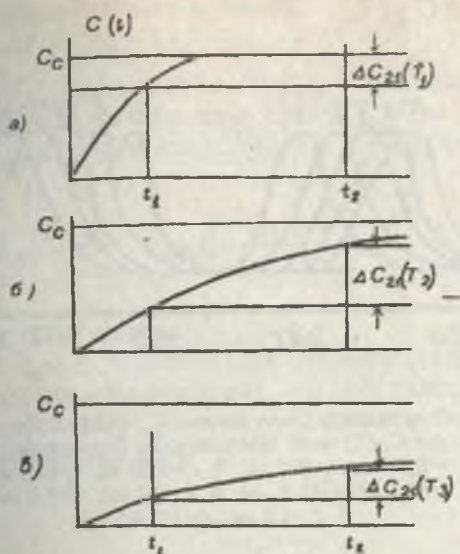
5.7-расм. Тилла киришмалли n^+-p диоднинг 77 К даги фотосиғим (1), индукцияланган фотосиғим (2) спектрлари.

лади ва хусусий ёруғлик $h\nu > E_g$ билан қайта зарядлашдан ўзгармайди. Бу спектрал соҳада тилла юқори сатҳи учун $\chi_p \gg \chi_n$ бўлади. Фотон энергиясини $h\nu > 0,8$ эВ дан бошлаб кучсиз ўзгариши, тилла қуйи сатҳи орқали иккита оптик ўтиш мумкин бўлганда шуни кўрсатадики, бу сатҳ учун ҳам $\chi_p \gg \chi_n$ муносабат ўринли бўлади. Текширилаётган диоднинг индукцияланган фотосиғим спектри 5.6-расмда 2-боғланиш орқали ифодаланган. Унинг таҳлили кўрсатишича, фотон энергиясини $h\nu = 0,56$ эВ бўлган қийматда ХЗС да ионлашган марказ концентрациясининг кескин камайиши хусусий ёруғлик таъсирида электрон билан тўлатилган юқори тилла сатҳининг камбағаллашиши туфайли содир бўлган деб тушунтирилади.

p^+-n диоднинг фотосиғим спектри (5.7-расм) n^+-p — диоднинг фотосиғим спектри билан яхши мос келади. Бу ҳолда N_n нинг кескин ортиши фотон энергиясининг $h\nu = 0,56$ эВ соҳасида содир бўлади. Фотон энергияси ортиши билан χ_n/χ_p нисбатнинг камайиши туфайли, N_n камая бошлайди. Индукцияланган фотосиғим спектри (2-боғланиш)да тилла қуйи сатҳининг электрон билан тўлиши туфайли содир бўлган поғона кузатилади.

в. DLTS — сиғимнинг автоматлашган релаксация усули

Сиғимнинг изотермик релаксация усули диодга қўйилган кучланишни, уйғотувчи ёруғликни қўлда бир каррали (марта) қайта ўлчашдан даврий қайта улашга ўтиш орқали такомиллаштирилиб борилади. Бунда диодга тескари йўналишда уланган кучланиш устига чуқур сатҳни тўлдирувчи тескари қутбли даврий частотаси f — бўлган кучла-

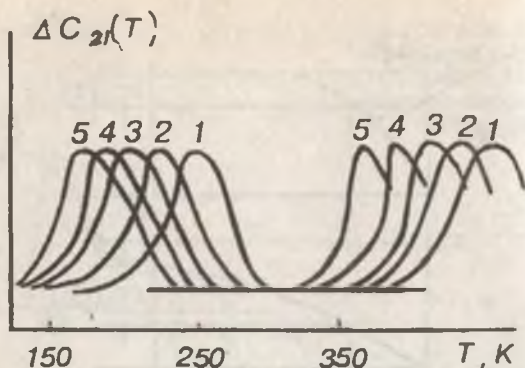


5.8-расм. Кучланишни қайта улаш $O \rightarrow U$ дан сўнг ҳар хил температураларда сиғимнинг вақтга боғланиши
 а- $T=T_1$, б- $T=T_2$, в- $T=T_3$, $T_1 > T_2 > T_3$.

ниш импулси берилади. Ланг томонидан даврий қайта улаш усули ривожлантирилди ва автоматлаштирилган усулининг назарий ва амалий асоси яратилди. Бу усул ЧС ни спектроскопик тадқиқ қилишнинг даврий қайта улаш усули *DLTS* деб юритила бошланди. Шундай қилиб, *DLTS* автоматлаштирилган изотермик сиғим релаксация усулидир. Бу усулга кўра намуна температурасининг секин ўзгариш жараёнида тўлдирувчи кучланиш ҳар бир қайта уланишидан сўнг сиғим релаксациясидан берилган $t=t_1$ ва $t=t_2$ вақтлардаги $C(t_1)$ ва $C(t_2)$ сиғимларни (5.8-расм), улар фарқини

$$\Delta C_{21} = C(t_1) - C(t_2)$$

ҳамда температурани (масалан, термопара ишлатилганда термо ЭЮКни) автоматик тарзда ўлчаб боради ва ΔC нинг температурага боғланиши $\Delta C(T)$ топилади. t_1 ва t_2 ларни ўзгартириб, $\Delta C_{21}(T)$ нинг “оиласи” (5.9-расм) чизилади



5.9-расм. P^+ - n типдаги GaAs диодда $U_{\text{пр}} \rightarrow U$ га қайта улашдан сўнг $C_{21}(T)$ нинг температурага боғланиши.

1. $t_1=0,02$ мс; $t_2=0,2$ мс; 2. $t_1=0,05$ мс; $t_2=0,5$ мс;
3. $t_1=0,1$ мс; $t_2=1,0$ мс; 4. $t_1=0,2$ мс; $t_2=2,0$ мс;
5. $t_1=0,5$ мс, $t_2=5,0$ мс.

ва улар ёрдамида релаксация вақтининг температурага боғланиши $\tau(T)$ аниқланади. Бу ўлчанган боғланишлар орқали ЧС параметрларини топишни таҳлил қилайлик.

Чуқур сатҳ (ЧС) учун $e_n \gg e$ ҳамда $U \gg V$ ва $N_{CD} \gg N_r$ тенгсизликлар бажарилсин деб қарайлик. Бу ҳолда сифимнинг вақт бўйича ўзгариши $0 \rightarrow U$ қайта улашдан кейин (5.40) ифода билан аниқланади. Бу ифодадан $C(t)$ ни $t=t_1$ ва $t=t_2$ даги қиймати ҳамда уларнинг фарқи $\Delta C_{21}(t) = C(t_2) - C(t_1)$ ни ўлчаш орқали

$$\frac{\Delta C_{21}}{C} = \frac{N_r}{2N_{CD}} \left[\exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{t_2}{\tau}\right) \right] \quad (5.76)$$

аниқланишини кўриш қийин эмас. $\Delta C_{21}/C$ нисбат берилган t_1 ва t_2 ларни қийматида намуна температурасига боғлиқ ва у қандайдир температура T_{max} да максимумга эришади. (5.76) ифодани температура бўйича дифференциаллаб, ҳосиласини нольга тенглаштириб, бироз соддалаштиришдан сўнг

$$\tau_{\text{max}} = \frac{t_2 - t_1}{\ln(t_2/t_1)} \quad (5.77)$$

билан ифодаланишини кўрамиз.

Берилган t_1 ва t_2 вақтлардаги $\frac{\Delta C_{21}}{C} = f(T)$ боғланиш, унинг $T = T_{\max}$ даги қиймати, $T_{\max}$ температуранинг ўзи эса тажрибадан аниқланади. Сўнг $t_{\max}$, t_1 ва t_2 лар ҳамда $(\Delta C_{21}/C)_{\max}$ берилган ҳолда ЧС концентрацияси (5.76) га кўра

$$N_{rD} = 2N_{CD} \left(\frac{\Delta C_{21}}{C} \right)_{\max} \left[\exp \left(-\frac{t_1}{\tau_{\max}} \right) - \exp \left(-\frac{t_2}{\tau_{\max}} \right) \right] \quad (5.78)$$

ифодадан ҳисобланади.

Одатда $e_n \ll e_p$ бўлган ҳолда сатҳни тўлдиришда тўғри токдан тескари кучланишга ($I_{\text{пр}} \rightarrow U$) тез қайта улаш қўлланади. Бу ҳолда ЧС учун $\gamma_n \gg \gamma_p$ бўлса, сатҳнинг бошлангич тўлдириш даражаси

$$f = \frac{\gamma_n}{\gamma_n + \gamma_p}$$

учун $f=1$ тенгсизлик бажарилмайди. Шунинг учун $I_{\text{пр}} \rightarrow U$ қайта улаш сатҳни тўлдирилганлик даражасини ва у билан боғлиқ структура сиғимини ўзгартирмайди, бошқача айтганда, сиғим релаксацияси кузатилмайди. Демак, $e_n \gg e_p$ бўлган чуқур сатҳ параметрларини DLTS билан аниқлаш учун $f \neq 1$ тенгсизлик бажарилиши керак экан. Бу p^+-n ўтишли GaAs диодада яхши намоён бўлган.

Диод концентрацияси $N_{CD} = S \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ бўлган n -тип-даги арсенид галлийдан ясалган. Диодда кучланишни $0 \rightarrow U$ қайта улашдан сиғим релаксацияси кузатилмаган.

$I_{\text{пр}} \rightarrow U$ қайта улашдан сўнг эса иккита чуқур сатҳни тўлдириш релаксациясига боғлиқ икки хил температура оралиғида сиғим релаксацияси (сиғимнинг камайиши) кузатилган. Демак, бундан кўринадики, икки сатҳ учун $e_n \ll e_p$ тенгсизлик бажарилади. ΔC_{21} нинг температурага боғланиши t_1 ва t_2 ларнинг бешта қийматида олинган ҳар бир боғланишидан $T_{\max}$, $\tau_{\max}$ (5.77) билан аниқланиб, $\tau_{\max} = f(T_{\max})$ боғланишдан сатҳларнинг энергетик ҳолати $E_1 = E_v + 0,44 \text{ ЭВ}$, $E_2 = E_v + 0,77 \text{ ЭВ}$ билан аниқланишини кўрсатади. DZTS нинг кўп чизмаларида $N_p/N_{\text{свѳз}}$ нисбат билан аниқланадиган сезгирлиги 10^{-4} тартибда бўлади. Корреляция усулла-

рини қўллаш билан унинг сезгирлигини $N_s/N_{\text{сасз}} \sim 10^{-7}$ гача етказиш мумкинлиги кўрсатилган.

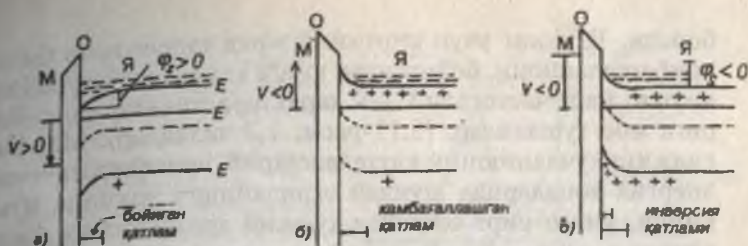
DLTS усули билан ЧС лар тўғрисида кўп маълумотлар олиш имконига эга бўлгани учун кейинги йилларда уларнинг кўпдан кўп чизмалари яратилиб, илмий лабораторияларда қўлланиб келинмоқда.

5.5-§. Металл-диэлектрик — яримўтказгич структура параметрларини ўлчашнинг C—V усули

а. Идеал металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) структура C—V тавсифи

Яримўтказгичлар сиртида, аниқроғи, диэлектрик-яримўтказгич чегарасида сирт ҳолатлари, яъни яримўтказгичнинг тақиқланган зонасида рухсат этилган энергия сатҳлари бўлмаган, диэлектрик (масалан, оксид, шиша) қатламида қўзғалувчан (K, Na, Cs ионлари) ва қўзғалмас тутқич марказ зарядлари, бошқача айтганда, сирқиш токи бўлмаган, яримўтказгич билан металл чиқиш ишларининг фарқи нолга тенг бўлган МДЯ структура бенуқсон (идеал) структура дейилади. Идеал МДЯ структурасида яримўтказгичнинг сирт потенциали ҳажмидаги потенциалига тенг бўлади ва структурага ташқи кучланиш қўйилмаганда яримўтказгичда энергиявий зоналари ясси (текис) бўлади. *n*-тип яримўтказгич асосида олинган МДЯ структурага ташқи кучланиш уланганда кечадиган жараёнларни қисқача таҳлил қилайлик.

Структурага мусбат силжиш кучланиши (металл томонига ўзгармас ток манбаининг мусбат қутби) уланса, яримўтказгич ҳажмидан электронларни сирт (диэлектрик-яримўтказгич чегараси) томон тортувчи электр майдони пайдо бўлади ва яримўтказгичнинг сирт соҳасида асосий заряд ташувчилар (электрон) билан бойиши кузатилади. Бу соҳада электр нейтраллик шарти бузилади ва ҳажмий заряд соҳаси (ХЗС) содир бўлади. ХЗС нинг ҳажмий заряди яримўтказгич-диэлектрик чегарасида сирт потенциалининг ортишига, энергиявий зоналарининг эгрилишига олиб келади (5.10-расм). ХЗСнинг кенглиги заряд ташувчилар билан бойиш режимида етарлича кичик 100А[°] бўлади, шунинг учун кучли бойиш режимида сиртий за-



5.10-рasm. Нуқсонсиз (идеал) МОЯ структуранинг бойиш (а), камбағаллашиш (б), инверсия (в) режимдаги энергетик диаграммаси.

ряд сиғими шундай катта бўладики, МДЯ структура сиғими диэлектрик (масалан, оксид) сиғимига тенг бўлади. Агар кучланишни $V=0$ гача камайтирсак, асосий заряд ташувчилар туфайли юзага келган сиғим камаяди. Яримўтказгич киришма атомларининг концентрацияси $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ тартибда, диэлектрик қатламининг қалинлиги $0,1:1 \text{ мкм}$ чамасида бўлганда, структура сиғими $(0,6 \pm 0,9) C_D$ ни ташкил этади. Мутлақ МДЯ структуранинг $V=0$ даги сиғими ясси (текис) зоналар сиғими $C_{\text{зс}}$ деб юритилади. Структурага нисбатан катта бўлмаган манфий силжиш кучланиши уланганда яримўтказгичнинг сирт соҳаси асосий заряд ташувчилар (электрон) билан камбағаллашади, компенсацияланмаган қўзғалмас мусбат зарядланган киришма донор ионидан ташкил топган ХЗС пайдо бўлади ва оқибатда энергия зоналарининг эгриланиши кузатилади (5.10 б-рasm). Бу ердаги ХЗС p - n ўтишга тескари йўналишда қўйилган кучланишдан ҳосил бўлган ХЗСга ўхшаш бўлади. ХЗС нинг сиғими заряд ташувчилар билан камбағаллашган қатлам кенглиги $W_{\text{ХЗС}}$ билан аниқланади. $W_{\text{ХЗС}}$ қўйилган кучланишга, яримўтказгичнинг легирловчи киришма атом концентрациясига боғлиқ бўлиб, у сиртда потенциалнинг ортиши билан катталашади. Сирт соҳасининг камбағаллашиш режимда кучланишнинг ортиши ХЗС сиғимининг камайишига олиб келади. Қўрилатган ҳолда асосий заряд ташувчилар (электронлар)ни яримўтказгич сиртида ҳам, ҳажмида ҳам ўтказувчанлик зонасида ҳаракатланишини назарда тутсак, улар диффузион-дрейф мувозанати ўрнатилиши (максвелл) вақт доимийси 10^{-12} с билан силжиш кучланиши изидан

боради. Шунинг учун сиртнинг заряд ташувчилар билан камбағаллашиши, бойишидан юзага келган структуранинг юқори, паст частотали $C-V$ характеристикалари бир-бирига мос тушади. (5.11-рasm, 1,2 чизиқлар). Манфий силжиш кучланишини катталаштириб, яримутказгичнинг энергия зоналарида шундай эгриланишга эришиш мумкин, унинг сирт соҳасида хусусий яримутказгич ҳосил қилиш мумкин. Бунда яримутказгичнинг сирт соҳасида ҳаракатчан асосий ва асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси биргаликда минимумга эришади. Бу ҳолатдаги сирт потенциалига мос равишда МДЯ структуранинг паст частотали $C-V$ характеристикаси минимумга эришади. Маълумки, манфий силжиш кучланиши ортиши билан χ_{3C} нинг кенгайишидан ташқари, χ_{3C} нинг кенглигидан анча кичик бўлган соҳада асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси орта боради.

Асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси асосий заряд ташувчиларникидан ортиши билан сирт соҳасида ўтказувчанлик типини ўзгаради, яъни ўтказувчанликнинг инверсияси кузатилади (5.10 в-рasm). Инверсион қатлам кенглиги χ_{3C} нинг кенглигидан анча кичик бўлгани учун, бу қатламнинг сифими жуда катта бўлади ва натижада ўтказувчанликнинг инверсия соҳасида паст частотали $C-V$ характеристика диэлектрик (оксид) сифимигача тез тўйинади (5.11 рasm—1-чизиқ). Инверсион қатламда ковак ўтказувчанлиги мавжуд бўлганлиги туфайли, ковакни кўчишидан ёки χ_{3C} да генерацион-рекомбинацион жараёнлар туфайли, қатлам заряди ўзгариши мумкин. Бу жараёнлар нисбатан секин кечадиган жараёнлар, шунинг учун частотанинг ўсиши билан асосий бўлмаган заряд ташувчилардан пайдо бўлган сифим нолга интилади.

Кузатишларнинг кўрсатишича, генерация жараёнлари критик частотани аниқлайди. Бу частота шундай частотаки, ундан катта частотада $C-V$ характеристика юқори частотали характеристика (2) нинг кўринишини олади. Яримутказгичнинг сиртий сифими, камбағаллашган қатлам сифимидан иборат бўлади. Инверсион қатлам пайдо бўлгандан сўнг χ_{3C} нинг кенгайиши тўхтайдиган. Асосий бўлмаган заряд ташувчилар МДЯ (МОЯ) структура сифимига ҳисса қўшмаса ҳам, юқори частотали сифимни ин-

5.11-расм. Нуқсонсиз МОЯ структуранинг $C-V$ характеристикаси. 1,2 чизиқлар ва ҳақиқий МОЯ структура характеристикаси (3 чизиқ). Паст (1), юқори (2) частотали $C-V$ характеристикалар, (3) — оксиддаги қўзғалмас зарядни, чиқиш ишлари фарқининг таъсирини ҳисобга олгандаги МОЯ нинг $C-V$ характеристикаси.



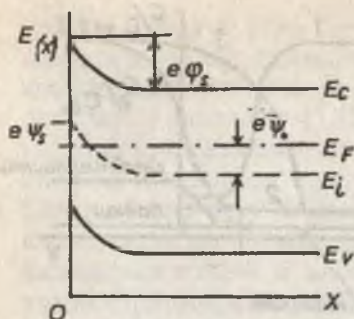
версия режимидаги сиғим $C_{инв}$ сатҳида тўйинишга олиб келади. Критик частота $\sim 1\text{кГц}$ тартибида, баъзи бир ҳолда, ундан кичик $0,1\text{кГц}$ бўлган қийматларни қабул қилади. Оралиқ частоталарда $C-V$ характеристика инверсия режимида шубҳасиз 1- ва 2-ҳолатлар орасини эгаллайди. Шунинг эслатиш жоизки, биз юқорида муҳокама қилган идеал МДЯ структура, $C-V$ характеристикаси юқори паст частотали ўлчаш сигналидан силжиш кучланиши доимий ёки секин (квазистатик) ўзгариш кузатиладиган ҳолга (таллуқлидир) тегишлидир.

б. Идеал МДЯ структуранинг $C-V$ характеристикасини назарий ҳисоблаш

Кўп ҳолларда МДЯ структурада диэлектрик яримўтказгич чегарасининг параметрларини тажриба натижалари бўйича аниқлашда идеал МДЯ структуранинг $C-V$ характеристикасидан фойдаланилади. Идеал МДЯ структура $C-V$ характеристикасини ҳисоблаш структурага диэлектрик қатлам орқали ташқи электр майдон қўйилганда, яримўтказгич сирти яқинида содир бўладиган ХЗС нинг назариясига асосланган. ХЗС нинг зарядини ҳамда у билан боғлиқ сиғимни аниқлаш учун n -тип яримўтказгич сирт соҳаси энергия зоналари диаграммасидан фойдаланамиз ва

$$e\psi = E_i - E_f \quad (5.79)$$

ифода билан аниқланадиган электр потенциали тушунчаси киритилади (5.12-расм). Бу ерда E_f — яримўтказгичда ферми сатҳи E_i — берилган температурадаги хусусий



5.12-расм. Яримўтказгич сирт соҳасининг энергетик диаграммаси.

яримўтказгичнинг ферми сатҳига мос келадиган сатҳ. Сирт соҳаси яқинида энергия зоналарида эгриланиши мавжуд бўлса, E_c ва E_v сатҳлар x — координатанинг функциялари бўлади. $E_f(x)$ сатҳ ва потенциал $\psi(x)$ ҳам x — координатага боғлиқ.

Яримўтказгич сиртидан узоқда, энергия зоналарида эгриланиш бўлмаганда, E_c сатҳ хусусий яримўтказгичнинг ферми сатҳи билан мос тушади. Потенциал $\psi(x)$ ни x координатага боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган икки ҳаддан иборат деб қараш мумкин:

$$\psi(x) = \psi_0 + \varphi(x) \quad (5.80)$$

ψ_0 — энергия зоналарида эгриланиш бўлмаган яримўтказгич ҳажмидаги потенциал. Яримўтказгич сирти ($x=0$) да потенциал

$$\psi(0) = \psi_s$$

бўлади.

Энергия зоналарининг эгриланиши сирт соҳаси яқинидаги ҳажмий заряд туфайли юзага келган бўлиб, у ихтиёрий x — нуқтада ҳажмий заряд электр майдони билан боғлиқ электростатик потенциал $\varphi(x)$ билан аниқланади. Яримўтказгич сиртида потенциал

$$\varphi(0) = \varphi_s$$

бўлиб, сиртнинг электростатик потенциалига мос келади.

$e\varphi_s$ катталик сирт соҳасининг энергия зоналари эгриланишига тенг бўлиб, сиртда электрон энергиясини аниқлайди. Сиртдан ичкарида электростатик потенциал $\varphi_s = 0$ бўлади. Агар сиртда электростатик потенциал нолга тенг, яъни $\varphi_s = 0$ бўлса, у ҳолда энергия зоналарида эгриланиш бўлмайди, бу ясси зона шarti деб юритилади. Агар $\psi(0) = \psi_s = 0$ бўлса, яримўтказгич сиртида хусусий яримўт-

казгичлик шарти амалга ошади ва сиртда ферми сатҳи билан мос тушади.

Айнимаган яримўтказгичда электрон, ковак концентрацияларининг x га боғланиши $\psi(x)$ ва $\varphi(x)$ потенциал орқали

$$\begin{aligned} n(x) &= N_c \exp\left(-\frac{E_c(x) - E_F}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{e\psi(x)}{kT}\right) = n_0 \exp\left(\frac{e\varphi(x)}{kT}\right) \\ p(x) &= N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v(x)}{kT}\right) = p_i \exp\left(-\frac{e\psi(x)}{kT}\right) = p_0 \exp\left(-\frac{e\varphi(x)}{kT}\right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

ифодалардан аниқланади. Бу ифодалар таҳлилидан кўнадики, ψ_s ва ψ_0 бир хил ишорада бўлса, ҲЗС эса бошган, ҳар хил ишорада бўлса, камбағаллашган ва инверсия қатламлар ҳосил бўлиши мумкин. Маълумки, сирт ҳақидаги ҳажмий заряднинг, ҳажмий заряд соҳасини сифимини Пуассон тенгламаси

$$\operatorname{div} E = \frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} \rho(x) \quad (5.2)$$

ечими асосида топилади. Бу ерда ξ — яримўтказгич диэлектрик сингдирувчанлиги, ε_0 — вакуумнинг диэлектрик сингдирувчанлиги, ε — ҳажмий заряд соҳасини электр майдони, $\rho(x)$ — ҳажмий заряд зичлиги.

Донор концентрацияси N_D , акцептор концентрацияси N_A бўлган n -тип яримўтказгич сиртидан узоқда (ҳажда) электр нейтраллик шарти

$$n_0 - p_0 = N_D - N_A \quad (5.3)$$

билан ифодаланади. Сирт соҳасида бу шарт бузилади, ҳажмий заряд зичлиги $\rho(x)$

$$\rho(x) = -e(n(x) + N_A) + e(p(x) + N_D) \quad (5.4)$$

ёки (5.83) шартни ҳисобга олганда,

$$\rho(x) = e(p(x) - p_0) - e(n(x) - n_0) \quad (5.5)$$

билан ифодаланади, n_0, p_0 — мос равишда мувозанатдаги электрон, ковак концентрацияси $\psi(x)$ ва $\varphi(x)$ потенциалларни ўлчамсиз потенциаллар

$$u(x) = \frac{e\psi(x)}{kT}, \quad v(x) = \frac{e\varphi(x)}{kT} \quad (5.85)$$

орқали ифодаланса, Пуассон тенгламаси (5.82)

$$\frac{d^2 u}{dX^2} = -\frac{e^2 n_i}{KT \varepsilon_1 \varepsilon_0} [\lambda(e^{-u} - 1) - \lambda^{-1}(e^u - 1)] \quad (5.86)$$

қўринишга келади. Бу ерда λ — катталик

$$\lambda = \frac{p_0}{n_i} = \frac{n_i}{p_0} = \left(\frac{p_0}{n_0}\right)^{1/2}$$

орқали топилади.

(5.86) тенгламани $x \rightarrow \infty$ да $\frac{du}{dX} = 0$ бўлган чегаравий шартни қаноатлантирувчи биринчи интеграл

$$\frac{du(x)}{dX} = \pm 2l F(\lambda, u) \quad (5.87)$$

бўлади. Бу ерда $F(\lambda, u)$ функция, у

$$F(\lambda, u) = [\lambda^{-1}(e^u - u - 1) + \lambda(e^{-u} + u - 1)] \quad (5.88)$$

орқали ифодаланади (5.87) тенглама $u > 0$ да мусбат ишора билан $u < 0$ да манфий ишора билан олинади. Энергия зоналари эгриланиши пастга бўлса, у нинг ишораси мусбат ҳисобланади.

l_i — узунлик бирлигидаги катталик бўлиб,

$$l_i = \left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 KT}{2e^2 n_i}\right)^{1/2} \quad (5.89)$$

билан аниқланади, у хусусий яримўтказкичда электр майдонининг Дебай экранлаш узунлиги деб юритилади. Ярим-

ўтказгич кристалли сиртида электр майдон кучланганлиги (5.87) га кўра

$$\epsilon_s = -\left. \frac{d\varphi(x)}{dx} \right|_{x=0} = \pm 2 \frac{KT}{e} l_i^{-1} F(\lambda, u_s) \quad (5.90)$$

кўринишни олади.

Остраградский-Гаус теоремасига мувофиқ сиртга яқин соҳадаги юза бирлигига келтирилган сирт заряди Q_s электр майдон кучланганлиги E орқали

$$Q_s = -\epsilon_1 \epsilon_0 E = \pm 2 \frac{KT}{e} \epsilon_0 \epsilon_1 l_i^{-1} F(\lambda, u_s) \quad (5.91)$$

муносабат билан топилади.

Потенциалнинг координатага боғланиши (5.87) ни интеграллаш орқали топилади

$$x(u) = \pm \frac{l_i}{2} \int_{u_s}^u \frac{du}{F(\lambda, u)} \quad (5.92)$$

ҳисоблашларнинг кўрсатишича (5.92) тенглама баъзи бир хусусий ҳоллардагина аналитик ечимга эга.

Таърифга кўра структура сирт соҳаси ҳажмий зарядининг дифференциал сифими

$$C = \frac{dQ_s}{dV} \quad (5.93)$$

орқали ифодаланиши мумкин. Структурага қўйилган ташқи силжиш кучланиши диэлектрикка тушган кучланиш V_D ва сирт электростатик потенциали φ_s йигиндисига тенг бўлади:

$$V = V_D + \varphi_s = \frac{Q_{x3}}{C_D} + \varphi_s \quad (5.94)$$

МОЯ структура сифими C (5.93) ва (5.94) ларга кўра

$$\frac{1}{C} = \left(\frac{dV}{dQ_s} \right) = \frac{dV_D}{dQ_s} + \frac{d\varphi_s}{dQ_s} = \frac{1}{C_D} + \frac{1}{C_s} \quad (5.95)$$

орқали аниқланади. Бу ерда

$$C_D = \frac{dQ_s}{dV_D} \text{ — диэлектрикнинг геометрик сифими бўлиб,}$$

у иккита металл пластина (контакт) орасига олинган диэлектрик ҳосил қилган конденсатор сифимига тенг,

$$C_S = \frac{dQ_s}{dV_S} \text{ — сирт электростатик потенциалнинг ўзгаришидан ҳосил бўлган сирт сифими. У мутлақ МДЯ структура учун сирт яқинидаги ҳажмий заряд } Q_s = Q_{\text{хз}} \text{ дан юзага келган сифим } C_{\text{хз}} \text{ тенг бўлиб, у}$$

$$C_{\text{хз}} = \frac{dQ_{\text{хз}}}{d\varphi_s} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0}{2l_1} \frac{[\lambda(1 - e^{-u_s}) + \lambda^{-1}(1 - e^{u_s})]}{[\lambda(e^{-u_s} - 1) + \lambda^{-1}(e^{u_s} - 1) + (\lambda - \lambda^{-1})u_s]}^{1/2} \quad (5.96)$$

билан топилади.

Шундай қилиб мутлақ МДЯ структурага қўйилган сил-жиш кучланиши (5.94) нинг электростатик потенциалга боғланишини (5.91) ва (5.85) дан

$$V = \pm \frac{l_1^{-1} \epsilon_0 \epsilon_1 [\lambda^{-1}(e^{u_s} - u_s - 1) + \lambda(e^{-u_s} + u_s - 1)]^{1/2}}{e C_D} + \frac{KT}{e} u_s \quad (5.97)$$

билан аниқланишини кўрамыз. Юқорида айтилганидек, биринчи ҳади $u_s > 0$ бўлганда мусбат, $u_s < 0$ бўлганда манфий ишора билан олинади. Диэлектрикнинг юза бирлигига келтирилган геометрик сифими формуладан ҳисобланади.

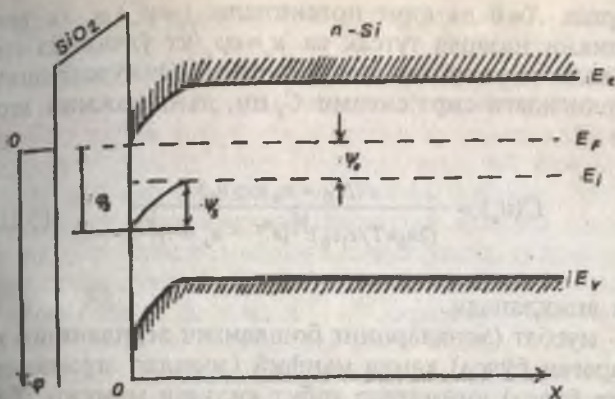
$$C_D = \frac{\epsilon_0 \epsilon_D}{w_D}$$

Бу ерда:

ϵ_D — диэлектрикнинг диэлектрик сингдирувчанлиги;

w_D — диэлектрик қатлам қалинлиги.

ТошДУ нинг яримўтказгичлар ва диэлектриклар физикаси кафедрасининг илмий ходимлари, ўқитувчилари МДЯ структура хоссаларини ўрганиш борасида ўзлари-



5.13-расм. *n*-типтаги кремний МДЯ структурасининг энергетик зоналар диаграммаси модели.

нинг муносиб ҳиссаларини қўшиб келмоқдалар. Улар МДЯ структура $C-V$ характеристикасининг ҳисоблаш ифодаларини бирмунча соддалаштирганлар. Соддалаштириш асосида юқорида изоҳланган мутлақ. МДЯ структура учун қабул қилинган фаразлар ҳамда *n*-тип яримўтказгичда $N_A \ll N_D$ ва юқори частотада асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг ҳажмий зарядга камбағаллашган, бойиган режимларда қўшадиган ҳиссаси жуда кичик, инobatга олмаса бўлади, деган фараз ётади. Шунинг учун Пуассон тенгламаси (5.82) даги ҳажмий заряд зичлиги

$$\rho(x) = -e(n(x) - n_0) = -e(n(x) - N_D)$$

кўринишда олинган бўлиб, Пуассон тенгламаси ечилган. Ҳисоблашни соддалаштириш учун энергиянинг ноль қиймати қилиб ферми сатҳига мос режимдаги энергетик сатҳ қабул қилинган ва ҳисоб паст томонга қараб олиб борилади (5.13-расм). Потенциал эса

$$\phi(x) = \psi(x) + \varphi_0 \quad (5.99)$$

кўринишда олинган. Бу ерда $e\varphi$ — электрон энергияси, $e\varphi_0$ — яримўтказгич ҳажмидаги электрон энергияси, $e\varphi_c$ — диэлектрик яримўтказгич чегарасидаги электрон энергия-

си. Сиртда $X=0$ да сирт потенциали $j_s = \psi_s + \varphi_0$ га тенг, булишликни назарда тутсак ва $u_s = e\psi_s / kT$ ўлчамсиз сирт потенциали киритганда ҳисоблашларнинг кўрсатишича, юза бирлигидаги сирт сиғими C_s ни, яъни ҳажмий заряд сиғими

$$C(u_s) = \frac{e(N_D - n_0 \exp u_s)}{(2n_0 kT / \epsilon_1 \epsilon_0)^{1/2} [e^{u_s} - u_s - 1]^{1/2}} \quad (5.100)$$

орқали аниқланади.

u_s — мусбат (зоналарнинг бошланғич эгриланиши па-
стга қараган бўлса) ҳамда манфий (зоналар эгриланиши
юқорига бўлса) қийматлар қабул қилиши мумкин. Ҳаж-
мий заряд сиғимини (5.100) ифодадан мураккаб бўлмаган
алмаштиришдан сўнг $u_s > 0$ да сиртний заряд ташувчилар
билан бойиш соҳасида

$$C(u_s) = \frac{e n_0 (\exp u_s - 1)}{(2n_0 kT / \epsilon_1 \epsilon_0)^{1/2} (\exp u_s - u_s - 1)^{1/2}} \quad (5.101)$$

$u_s < 0$ да заряд ташувчилар билан камбағаллашиш соҳасида

$$C(u_s) = \frac{e n_0 (1 - \exp(-u_s))}{(2n_0 kT / \epsilon_1 \epsilon_0)^{1/2} [u_s + \exp(-u_s) - 1]^{1/2}} \quad (5.102)$$

билан аниқлашишини кўрамыз. МДЯ структурага қўйилган
тўла кучланишнинг сирт потенциалига боғланиши $u_s > 0$ да

$$V = \left(\frac{2n_0 kT}{\epsilon_1 \epsilon_0} \right)^{1/2} [e^{-u_s} + u_s - 1]^{1/2} \frac{\epsilon_1 \epsilon_0}{C_D} S + \frac{kT}{e} u_s \quad (5.103)$$

$u_s < 0$ да

$$V = \left(\frac{2n_0 kT}{\epsilon_1 \epsilon_0} \right)^{1/2} [e^{-u_s} + u_s - 1]^{1/2} \epsilon_1 \epsilon_0 \frac{S}{C_D} - \frac{kT}{e} u_s \quad (5.104)$$

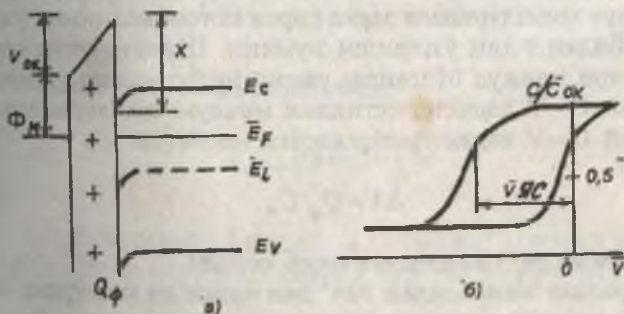
аниқланади. Бу ерда: S — контакт юзаси; C_D — диэлект-
рик (ёки оксид) сиғими.

в. Ҳақиқий (реал) МДЯ структуранинг $C-V$ характеристикаси

Маълумки, МДЯ структурада металл-яримўтказгич чиқиш ишларининг фарқи нолдан фарқ қилганда унинг ишорасига қараб, структурага ташқи кучланиш қўйилмаганда, яримўтказгич сирт соҳасида манфий ёки мусбат ишорали ҳажмий заряд пайдо бўлиши мумкин. Металл-яримўтказгич потенциаллар фарқидан ҳажмий заряддан юзага келган электр майдони структурага қўйилган ташқи силжиш кучланишини ҳосил қилган электр майдонига қўшилади ва натижада $C-V$ характеристикани кучланиш ўқи бўйича силжишига олиб келади (5.14-расм). Диэлектрик қатламда қўзғалмас (муайян ҳолатдаги заряднинг бўлиши ҳам характеристикани шундай силжишига олиб келади.

Шуни таъкидлаш керакки, бу зарядни металл-яримўтказгич чегарасидан қандай масофада жойлашгани маълум эмас. Шунинг учун эффектив заряд тушунчасидан фойдаланилади, у шундай зарядки, диэлектрик (оксид) — яримўтказгич чегарасига жойлаштирилганда кузатилган ҳодисани ҳосил қила олади. Ясси зоналар таърифига кўра, сирт потенциаллари $\phi_s > 0$ да ясси зоналар кучланиши

$$V_{sc} = \frac{E_{sm}}{e} + \frac{Q_{эф}}{C_D} \quad (5.105)$$



5.14-расм. Металл-яримўтказгич чиқиш ишлари фарқини, оксиддаги қўзғалмас зарядни МОЯ структура энергетик диаграммасига (а), $C-V$ характеристикасига (б) таъсири Φ_M — металл чиқиш иши, x — яримўтказгич электронига яқинлик, V_{sc} — оксиддаги кучланиш тушуви, $E_{sm} = \Phi_s - (x + E_F - E_i)$ металл-яримўтказгич чиқиш ишларининг фарқи, Q_ϕ — оксид (диэлектрик)даги қўзғалмас заряд.

бўлади. Бу ерда $E_{\text{ял}}$ — яримўтказгич — металл чиқиш ишларининг фарқи, $Q_{\text{ял}}$ — эффектив муайян ҳолатдаги (қўзғалмас) заряд, C_D — диэлектрик (оксид) сигими. Диэлектрик қатламдаги муайян ҳолатдаги заряд мусбат ҳам, манфий ҳам бўлиши мумкин. Энди сирт ҳолатларнинг таъсирини кўрамиз. Юқорида изоҳланганлардан кўринадики, ҳақиқий (реал) сирт бенуқсон (идеал) сиртдан сирт ҳолатлари деб номланувчи энергия сатҳлари мавжудлиги билан фарқланадилар. Уларнинг табиати ҳар хил бўлиб, кристаллнинг ажралиш (диэлектрик-яримўтказгич) чегарасида кристалл тузилишининг бузилиши туфайли юзага келадилар.

Сирт ҳолатлари асосан яримўтказгичлар билан боғланган, чунки уларнинг зарядлар билан тўлиши сирт потенциалига боғлиқ бўлиб силжиш кучланиши ўзгариши билан қайта зарядланадилар. Сирт ҳолатларини ҳосил қилган дифференциал сигими C_s олдин қўрилган ҳажмий заряд сигими C_v га қўшилади. Сирт ҳолатларининг мавжудлиги сирт сигимини C_{ss} га ортишидан ташқари, сирт потенциалини МДЯ структурага қўйилган силжиш кучланишга боғланишини ўзгартиради, чунки сирт ҳолатларидаги зарядни ҳосил қилган электр майдони силжиш кучланишининг ҳосил қилган электр майдони билан диэлектрикнинг муайян ҳолатдаги заряд майдони каби қўшилади. Лекин муайян ҳолатдаги заряд сирти потенциалининг ўзгариши билан у ҳам ўзгариши мумкин. Шунинг учун сирт ҳолатлари мавжуд бўлганда, уларнинг экранлаш таъсири манфий $C-V$ характеристикани маълум соҳаларидагина назарий $C-V$ характеристикасига нисбатан

$$\Delta V = Q_s / C_D$$

катталиқ қадар силжишига олиб келади.

Ажралиш чегарасидан 10Å дан ошмаган масофада диэлектрикда бўлган сирт ҳолатлари яримўтказгич билан яхши боғланган (диэлектрик яримўтказгич ажралиш чегарасидаги потенциал тўсиқдан заряд ташувчиларнинг туннель ўтишлари туфайли) улар қайта зарядланишлари мумкин, лекин ажралиш чегарасидан масофанинг ортиши билан шундай алмашув эҳтимоллиги кескин камаяди

ва сирт ҳолатлари зарядларни қўзғалмас зарядга ўхшаш тўплашга қодир бўлади. Бундай сирт ҳолатлари одатда тутқич марказлар деб юритилади. Сирт ҳолатларини тутқич (марказларга) муайян ҳолатдаги, зарядларга бўлиниши жуда шартлидир. МДЯ структурада диэлектрик (оксид)да тутқич марказни қайта зарядланиши, қўзғалувчан заряднинг кучиши, диэлектрик (оксид) нинг кутбланиши туфайли силжиш кучланишининг ҳар хил ўзгариши йўналишида олинган $C-V$ характеристикалар бир-бирига мос тушмайди. Бу ҳодиса гистерезис деб юритилади, одатда бу оксиднинг турғун эмаслигидан далолат беради. Ҳодиса юқори температурада ва юқори электр майдонида кучаяди.

г. Юқори частотали $C-V$ усул билан диэлектрик (оксид) — яримўтказгич чегараси параметрларини аниқлаш

1) Сирт ҳолатлар концентрацияси ва спектрини аниқлаш.

Бу катталиклар тажрибада олинган ва назарий ҳисобланган $C-V$ характеристикаларини бир-бирига нисбатан кучланиш ўқи бўйича силжиши $\Delta V(C)$ дан топилади. Диэлектрик (оксид) қатламидаги қўзғалмас заряди Q_ϕ дан ва сирт ҳолатлари заряди Q_s дан содир бўлган кучланишнинг силжиши қуйидагича ифодаланади:

$$\Delta V(C) = \frac{1}{C_D} (Q_\phi + Q_s) \quad (5.106)$$

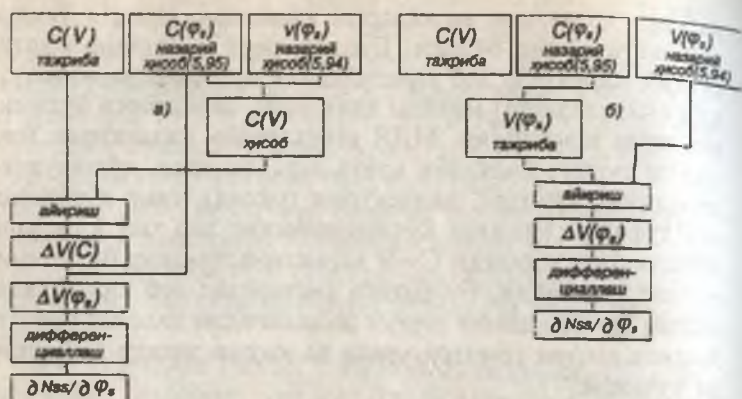
Сирт ҳолатлари концентрацияси

$$N_s(\Delta V) = \frac{\Delta V \cdot C_D}{eS} \quad (5.107)$$

билан ҳисобланади. Бу ерда: S — металл контакт юзаси. (5.107) ифода сирт потенциали бўйича дифференциали

$$\frac{\partial N_s}{\partial \varphi_s} = \frac{C_D}{eS} \frac{d(\Delta V)}{d\varphi_s} \quad (5.108)$$

сирт ҳолатлар спектрини беради. Сирт ҳолатлар спектрини (5.108) ифода орқали чизиш қуйидаги тартибда амалга оширилади (5.15-расм):



5.15-расм. Юқори частотали $C-V$ усул билан $C-V$ характеристикани чизиш ва чизмадан сирт ҳолати тақсимотини аниқлаш тартиби (кетма-кетлиги).

а) (5.96 ва 5.97) ёки (5.101 : 5.104) ифодалар орқали назарий ҳисобланган $C-V$ характеристика чизилади;

б) тажрибада олинган ва назарий ҳисобланган $C-V$ характеристикаларни солиштириб, $\Delta V(\varphi_s)$ боғланиш топилади;

в) назарий ҳисобланган $C(\varphi_s)$ ёрдамида $\Delta V(C)$ боғланишдан $\Delta V(\varphi_s)$ боғланишга ўтилади;

г) $\Delta V(\varphi_s)$ ни дифференциаллаб, (5.108) ифода орқали сирт ҳолатлар спектри чизилади. $\frac{\partial N}{\partial \varphi_s}$ ни $C-V$ характеристикани назарий ҳисобламасдан ҳам чизиш мумкин. Бу усулни ҳисоблаш тартиби 5.15-расмда келтирилган.

2. Сирт потенциали ва оксидда муайян ҳолатдаги (фиксированный) зарядни аниқлаш.

Назарий ҳисобланган $C(\varphi_s)$ характеристика билан тажрибада олинган $C(V)$ ни солиштириб, исталган силжиш кучланишидаги сирт потенциали

$$\varphi_s = \varphi_s(v)$$

олинади. Равшанки, сиртнинг инверсия ва бойиш соҳаларида сирт потенциалининг ўлчашидаги аниқлик кескин камаёди. Шунинг учун ташқи кучланиш қўйилмаганда сирт потенциали муҳим аҳамият касб этади, чунки у ташқи

электр майдони қўйилмаганда ажралиш чегарасининг ҳолатини белгилайди. У оксиддаги қўзғалмас заряд ҳамда сирт ҳолатларидаги бошланғич зарядлари билан аниқланади. Одатда сиртий зарядларни аниқлашда ясси зоналар кучланиши $V_{\text{яс}}$ қўлланилади. Структурага ясси зоналар кучланишига тенг бўлган ташқи кучланиш уланганда яримўтказгич сиртида ХЗС зарядининг сирт ҳолатларидаги зарядининг ўзгаришини (5.106) га кўра,

$$V_{\text{яс}} C_D = V_{\text{яс}} C_D = Q_{\text{ош}} + \Delta Q_{\text{яс}} \quad (5.109)$$

кўринишда ифодалаш мумкин.

$Q_{\text{ош}}$ — кучланиш уланмагандаги ХЗС нинг заряди, яъни бошланғич сирт потенциал $\varphi_{\text{яс}}$ даги заряд, $\Delta Q_{\text{яс}}$ — структурага $V_{\text{яс}}$ кучланишга тенг кучланиш улангандан сўнг сирт ҳолатлари зарядининг ўзгариши.

(5.108) ифода 0 дан $\varphi_{\text{яс}}$ гача бўлган оралиқда интеграллаб топилади. $V_{\text{ясб}} C_D$ ҳамда $\Delta Q_{\text{яс}}$ ни билган ҳолда (5.109) дан $Q_{\text{ош}}$ топилади. $Q_{\text{яс}}(\varphi_{\text{яс}})$ ни ҳисоблаш орқали бошланғич сирт потенциали $\varphi_{\text{яс}}$ топилади. $Q_{\text{ош}}$ дан диэлектрикдаги қўзғалмас зарядни ажратиб олиш учун сирт ҳолатларининг тақиқланган зона бўйича тақсимотини билиш керак. Шунинг учун юқори частотали С—V характеристика билан тақиқланган зона бўйича тақсимланган сирт ҳолатлари зарядини, диэлектрикдаги қўзғалмас зарядларни ажратиб бўлмайди. Лекин, агар С—V характеристиканинг шакли назарий ҳисобланганга яқин, яъни $V_{\text{яс}}$ яқинида етарлича тик ва $V_{\text{яс}}$ нисбатан катта бўлса, сирт ҳолатлар зарядининг ўзгаришини инобатга олмаслик мумкин. У ҳолда $V_{\text{яс}}$ қўзғалмас зарядлар билан аниқланади. Аксинча, агар С—V характеристика қия бўлса, $V_{\text{яс}}$ потенциал $\varphi_{\text{яс}}$ дан 0 гача ўзгарганда, сирт ҳолатлар зарядининг ўзгаришини аниқлайди. У ҳолда $0 < \varphi_{\text{яс}} < \varphi_{\text{ош}}$ оралиқда $N_{\text{яс}} = \text{const}$ бўлсин деб фараз қилиб, бошланғич сирт потенциали $\varphi_{\text{яс}}$ ни

$$\varphi_{\text{яс}} = \varphi_{\text{яс}} + \frac{V_1 C_D}{e^2 N_{\text{яс}}} \quad (5.110)$$

билан ҳисоблаш мумкин. Бу ерда $N_{\text{яс}} \varphi = 0 (V_1 = V_{\text{яс}}$ да аниқланган) сирт ҳолатлари концентрацияси.

Юқорида келтирилган параметрлардан ташқари, юқори частотали С—V характеристика орқали яримўтказгичнинг

легирловчи киришма концентрациясини, қалинлик бўйича тақсимотини, яримўтказгич типини, оксид қатлам (диэлектрикни) диэлектрик сингдирувчанлигини, қалинлигини ва бошқа параметрларини аниқлаш мумкин.

5.6-§. Сигим спектроскопия усуллари билан чуқур сатҳ параметрларини ўлчаш қурилмаси

Чуқур сатҳли марказ параметрларини сигим спектроскопия усуллари билан аниқлашда намуна билан ўлчаш қурилмасини туташтирувчи кабел (симлар) сигими ҳамда намуна бошланғич тўсиғи сигими катта бўлган ҳолатда P^+ -л ўтишли диод ёки шоттки диоди тўсиғи сигимининг кичик ўзгаришини ўлчаш лозим бўлади. Одатда бунга трансформаторли юқори частотали ўзгарувчан ток кўприги (МП-300) дан фойдаланиш орқали эришилади. Юқорида кўрганларимиздан кўринадики, структура тўсиғи сигими кўп омилларга, масалан, температурага, қўйилган кучланишга, ўлчаш кучланиш частотасига, намуна ёритилса, ёруғликнинг тўлқин узунлиги, ностационар жараёнларда вақтга боғлиқ. Бу боғланишларни сигим спектроскопия усуллари билан ўлчаш қурилмаларидан бири 5.16-расмда келтирилган. Илмий текшириш лабораторияларида кўп ҳолларда трансформаторли юқори частотали ўзгарувчан ток кўпригини тўла ўтказувчанликнинг ўлчаш кўприги МП-300 га ўхшатиб йиғилади. Ўтказувчан ток кўпригини тузилиши ҳар хил бўлиб, улар юқори частотали импульсли кичик ўлчамли трансформаторлар (МИТ-8, МИТ-4) асосида йиғилиши мумкин. Юқори частотада диод барьер сигимини ёки унинг ҳар хил омиллар таъсирида ўзгариши параллел алмаштириш чизмаси бўйича ўлчанади. Бошқача айтганда, диод параллел уланган сигим ва қаршилиқдан иборат (тузилиш структура) деб қаралади. Шунинг учун ўзгарувчан ток кўпригининг бир елкасига ўзгарувчан эталон сигим ва ўзгарувчан эталон қаршилиқ уланади ва улар орқали структура барьер сигими ёки унинг ўзгариши аниқланади. Кўприкнинг иккинчи елкасига юқори аниқликдаги ўзгарувчан C_2 конденсатор ўзгарувчан R_2 қаршилиқ ва уларга параллел текширилаётган диод уланади. Улар махсус даражаланган бўлиб, бўлиниш да-

ланиш берилади. Бу қурилма диод барьер сигимининг кинетикасини қайд қилиш имконини беради ва у орқали чуқур сатҳнинг электрон билан тўлиш релаксация вақти τ ни аниқлаш мумкин. Агар $\tau > 5с$ бўлса, кўприк мувозанати бузилгандан ҳосил бўлган сигим ўзгаришига пропорционал кучланиш (сигнал) икки координатали ўзи ёзгич ёрдамида, агар $\tau < 5с$ бўлса, τ — метр чизмасини қўллаш орқали осциллографда қайд қилинади. Бунда сатҳнинг электрон билан тўлдириш релаксация вақтини тўғридан-тўғри аниқлаш керак бўлади. τ метр зарядланган конденсатор C ни R_3 ва R_4 қаршиликлар орқали разрядланишига асосланган қурилма. Зарядланган конденсаторнинг R_3 ва R_4 қаршиликлар орқали разрядланиши R_4 қаршилиқда вақт доимийси $\tau_{RC} = C(R_3 + R_4)$ бўлган экспоненциал қонуният бўйича ўзгарувчан кучланиш ҳосил бўлади, бу кучланиш осциллографнинг горизонтал ўқи бўйича ёйиш кучайтиргич киришига берилади. Агар сатҳнинг электрон билан тўлдириш релаксация вақти, сигимнинг $(R_3 + R_4)$ қаршилиқ орқали разрядланиш вақт доимийсига тенг бўлса, осциллограф экранда кўприк мувозанати бузилишидан содир бўлган кучланишнинг вақт бўйича ўзгариши чизиқли бўлади. Демак, ҳар бир сатҳнинг берилган температурадаги τ ни аниқлаш учун R_3 ва C шундай танланадики, осциллограф экранда сигим релаксация кучланишининг вақт бўйича ўзгариши чизиқли бўлсин. Шуни эслатиб ўтиш керакки, τ — метрнинг сигими (C) чуқур сатҳни тўлдириш ($V=0$) ёки тўғри кучланиш пайтида зарядланади. Структура барьер сигимини ўлчашда тескари кучланиши улангандан бошлаб, τ метрни конденсатори $(R_3 + R_4)$ орқали разрядланиб, у сигим релаксация кучланиши $u(t)$ ни осциллограф горизонтал ўқи бўйича ёйди. Чуқур сатҳ параметрлари аниқланадиган структура криостатга жойлаштирилади ва у керакли температурага совитилади. Намунани белгиланган температурада турғун тутиб туриш ҳар хил тезликда чизиқли қонуният бўйича иситиш, совитиш автоматик равишда бошқариладиган қурилма ёрдамида амалга оширилади. Тошкент Давлат университети қошидаги амалий физика институти ходимлари томонидан бир қанча қулайликларга эга бўлган азот буғида совитиладиган криостат ҳамда намунани ҳар хил тезликда совитиш, иситиш температура-

нинг берилган қийматида $0,01^{\circ}\text{C}$ аниқликда турғун тутадиган температура стабилизатори яратилган. Бу қурилмада температурани ўлчаш ва бошқариш датчиги сифатида диод (КД 105Б), иситгич элементи сифатида транзистор (КТ—808) қўлланилган. Иситгич массаси кичик бўлгани учун температуранинг бошқарилиши тез содир бўлади. Намуна температурасининг ҳар хил тезликда чиққли қонуният бўйича ортиши, пасайиши термик рағбатлантирилган сиғим ток усуллари билан чуқур сатҳнинг параметрларини тез ва етарли аниқликда ўлчаш имконини беради.

Фойдаланилган адабиётлар

1. Н. Ф. Ковтанюк, Ю. А. Концевой. Измерения параметров полупроводниковых материалов. Изд. "Металлургия". М. 1970 г.
2. Л. П. Павлов. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. М. "Высшая школа", 1975 г.
3. В. В. Батавин, Ю. А. Концевой, Ю. В. Федорович. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М. "Радио и связь", 1985 г.
4. Л. П. Павлов. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М. "Высшая школа", 1987 г.
5. Ю. В. Воробьев, В. Н. Добровольский, В. И. Стриха. Методы исследования полупроводников. Киев "Высшая школа", 1988 г.
6. В. М. Колешко, Т. Д. Каплон. С—V методы измерения параметров МОП структуры. Обзоры по электронной технике. Сер. 3-микроэлектроника. Вып. 2/456/М. ЦНИИ, Электроника, 1977 г.
7. И. Н. Каримов. "Влияние внешних воздействий на свойства границы раздела полупроводник-диэлектрик МДП — структур". Канд. дис. Ташкент — 1986 г.
8. Л. С. Берман, А. А. Лебедев "Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках". Изд. "Наука" 1981 г.
9. Terman Z. M. Solid State Electronics 1952, 5, 285.

МУНДАРИЖА

Кириш	3
-------------	---

1-606. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА СОЛИШТИРМА ҚАРШИЛИКНИ ЎЛЧАШ УСУЛЛАРИ

1.1-§. Яримўтказгичли намунанинг солиштира қаршилигини унинг тўла қаршилиги бўйича аниқлаш	5
1.2-§. Солиштира қаршиликни ўлчашнинг бир ва икки зондли усуллари	11
1.3-§. Тўрт зондли усул	20
1.4-§. Юпқа қатламларда солиштира қаршиликни тўрт зондли усул билан аниқлаш	34
1.5-§. Эпитаксиал, диффузион қатламларнинг солиштира қаршилигини тўрт зондли усул билан аниқлаш	41
1.6-§. Солиштира қаршиликни тўрт зондли усул билан ўлчашдаги хатоликлар	42
1.7-§. Ван-дер-Пау усули билан солиштира қаршиликни ўлчаш	49
1.8-§. Солиштира қаршиликни нуқтавий контактнинг тарқалган (ёйилган) қаршилиқ усули билан аниқлаш	59
1.9-§. Солиштира қаршиликни металл-яримўтказгич нуқтавий контактнинг тешилиш кучланиши бўйича ўлчаш усули	67

2-606. ЗАРЯД ТАШУВЧИЛАР КОНЦЕНТРАЦИЯСИ ВА ҲАРАКАТЧАНЛИГИНИ ЎЛЧАШ УСУЛЛАРИ

2.1-§. Холл эффекти ёрдамида заряд ташувчиларнинг концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчаш усуллари	73
2.2-§. Холл ЭЮКини ўлчаш усуллари	81
2.3-§. Холл токи	91
2.4-§. Холл тоқларини ўлчаш ва у орқали яримўтказгич намуналарда заряд ташувчиларнинг концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчаш	95

2.5-§. Ван-дер-Пау ва түрт зондли усул билан яримўтказгич намуналарда заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчаш	100
2.6-§. Холл эффектини ўлчашдаги мунтазам (систематик) хатоликларга таъсир этувчи омиллар	105
2.7-§. Яримўтказгичларда заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини намунанинг магнитоқаршилиги бўйича аниқлаш.	109
2.8-§. Яримўтказгичларда тақиқланган зона кенглигини, донор ва акцептор киришма атомларининг концентрацияси ва ионланиш энергиясини аниқлаш	115

3-боб. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ ОПТИК УСУЛЛАР БИЛАН ЎЛЧАШ

3.1-§. Яримўтказгичларнинг оптик параметрлари	128
3.2-§. Оптик параметрларни (константаларни) тажрибада аниқлаш усуллари	134
3.3-§. Заряд ташувчилар концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчашнинг оптик усуллари	140
3.4-§. Эллипсометрия усули	156

4-боб. НОМУВОЗАНАТ ЗАРЯД ТАШУВЧИЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ ЎЛЧАШ УСУЛЛАРИ

4.1-§. Номувозанат заряд ташувчилар параметрлари	166
4.2-§. Номувозанат заряд ташувчилар билан инъекцияланган намунанинг ўтказувчанлиги	173
4.3-§. Номувозанат заряд ташувчилар параметрларини ўлчашнинг ностационар усуллари	176
4.4-§. Ток импульси инъекциясига асосланган номувозанат заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлаш усуллари	202
4.5-§. Номувозанат заряд ташувчилар параметрларини ўлчашнинг стационар усуллари	213
4.6-§. Номувозанат заряд ташувчилар параметрларини фотоэлектромагнитик ҳодисаси (Кикоин-Носков эффекти)дан фойдаланиб аниқлаш усули	225
4.7-§. Яримўтказгич параметрларини номувозанат заряд ташувчилар тақсимоидан (тўғридан-тўғри) фойдаланиб аниқлаш усуллари	234

4.8-§. Р-п ўтишининг ва Шоттки тўсигининг қисқа туташув фототокини ўлчашга асосланган диффузион узунлиқни аниқлаш усули	249
---	-----

5-БОБ. ЧУҚУР САТҲЛИ МАРКАЗЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ ЎЛЧАШ УСУЛЛАРИ

5.1-§. Чуқур сатҳли марказларнинг параметрлари	255
5.2-§. Р-п ўтишда чуқур сатҳларнинг электронлар билан тўлдирилганлиги	260
5.3-§. Чуқур марказли диодларнинг барьер сигими	266
5.4-§. Яримўтказгичлар чуқур марказлари параметрларини аниқлашнинг сигим спектроскопия усуллари	273
5.5-§. Металл-диэлектрик-яримўтказгич структура параметрларини ўлчашнинг С—V усули	296
5.6-§. Сигим спектроскопия усуллари билан чуқур сатҳ параметрларини ўлчаш қурилмаси	312
Фойдаланилган адабиётлар	316

Зайнобиддинов Сирожиддин, Акрамов Хидой

**ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ПАРАМЕТРЛАРИНИ
АНИҚЛАШ УСУЛЛАРИ**

Ўзбек тилида

Бадий муҳаррир *Т. Қаноатов*
Техник муҳаррир *У. Ким*
Мусахҳиҳ *М. Йўлдошева*
Компьютерда тайёрловчи *Е. Гильмутдинова*

Теришга берилди 6.11.2000. Босишга рухсат этилди 6.06.2001.
Бичими 84×108¹/₃₂. Офсет босма усулида босилди. Шартли босма
табоғи 16,8. Нашр т. 17,24. Нусхаси 2 000. Буюртма № 55.
Баҳоси шартнома асосида.

“Ўзбекистон” нашриёти, 700129, Тошкент шаҳри, Навоий кўчаси, 30.
Нашр № 61-2000.

Ўзбекистон Республикаси Давлат Матбуот қўмитасининг
1-босмахонасида босилди. Тошкент ш. 700002,
Сағбон кўчаси 1-берк кўча, 2-уй.

