

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ**

**МИРЗО УЛУБЕК НОМИДАГИ
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ЮНУСОВ М.С., ВЛАСОВ С.И., НАЗИРОВ Д.Э.,
ТОЛИПОВ Д.О.**

ЭЛЕКТРОН АСБОБЛАР

**Олий ва ўрта махсус таълим Вазирлигининг
Олий ўқув юртлариаро илмий-услубий бирлашмалар
фаолиятини Мувофиқлаштирувчи Кенгаши томонидан
олий ўқув юртлари талабалари учун
ўқув қўлланма сифатида тавсия этилган**

Тошкент - 2003

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ**

**МИРЗО УЛУБЕК НОМИДАГИ
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ЮНУСОВ М.С., ВЛАСОВ С.И., НАЗИРОВ Д.Э.,
ТОЛИПОВ Д.О.**

ЭЛЕКТРОН АСБОБЛАР

**Олий ва ўрта махсус таълим Вазирлигининг
Олий ўқув юрталарино илмий-услубий бирлашмалар
фаолиятини Мувофиқлаштирувчи Кенгаши томонидан
олий ўқув юрталари талабалари учун
ўқун қўлланма сифатида тавсия этилган**

Тошкент - 2003

2003.

Ушбу ўқув қўлланма яримўтказгичлар физикаси, яримўтказгич асбоблар физикаси, микроэлектроника, радиоэлектрон асбоблар со-Пасида мутахассислар тайёрловчи университетлар, институтлар ва ўрта махсус ўқув юртлари талабаларига Памда шу сола аспирантла-ри, докторантлари, илмий ходимларига мўлжалланган.

Муаллифлар:

Юнусов М.С., академик
Власов С.И., профессор
Назирова Д.Э., доцент
Толипов Д.О., доцент

Махсус муПаррир:

Назирова Д.Э., доцент

Тақризчилар:

Мамадолимов А.Т., академик
Зайнобиддинов С.З., профессор

МУҚАДДИМА

Позирги вақтда саноат, фан ёки ишлаб чиқаришнинг электрон асбоблар қўлланилмайдиган қандайдир бир соҳасини топиш муш-кулдир. Шунинг билан бирга ушбу соҳаларнинг янада ривожланиши электрон асбоблар Ъиссасининг ортиши билан чамбарчас бошлиқдир. Электрон асбобларнинг бирор соҳада самарали қўлланилиши ва улардан фойдаланиш ушбу асбобларнинг ишлаш тамойилларини, асосий кўрсаткичлари ва таъсириномаларини, шунингдек тайёрлаш усулларини билмасдан мумкин эмас. Пар бир ушбу бўлимлар бўйича физиканинг мос фанлари мавжуд: яримўтказгичлар ва яримўтказгич материаллар физикаси, яримўтказгич асбоблар физикаси, интеграл микротузилмалар, микроэлектроника, яримўтказгич тузилмалар тех-никаси ва бошқалар. Тайёрланаётган мутахассиснинг йўналишига бошлиқ Полда турли олий ўқув юртлари кафедраларининг ишчи дастурларида у ёки бошқа фанга турлича соатлар ажратилади. Аммо Памма замонавий қаттиқ жисмли электрон асбобларнинг асоси ўзига хос хусусиятларга эга яримўтказгич материалдир. Шунинг учун Пам ушбу фанни ўқитишга катта эътибор қаратилади.

Мирзо УлуПбек номидаги Ўзбекистон Миллий Ушбаерситети-нинг яримўтказгичлар ва дизлектриклар физикаси кафедрасида қа-тор йиллар давомида бакалаврлар ва магистрлар учун яримўтказгич-лар физикаси, яримўтказгич асбоблар физикаси, микроэлектроника асослари каби фанлар ўқитилиб келинмоқда. Ушбу "Электрон ас-боблар" номли китоб ушбу фанлар бўйича материаллар ўқиш тажри-баси асосида ёзилгандир.

Китобнинг асосий мақсади замонавий электрон асбоблар Пақи-даги асосий тушунчаларни ва уларнинг ишлаш тамойилларини етар-лича содда кўринишларда баён қилишдир. Материални ёритишда математик аппаратдан фойдаланиш амалда жуда чекланган бўлиб, асосий эътибор у ёки бошқа электрон асбобнинг ишлашининг физи-кавий тамойилларини тушунтиришга қаратилган.

Биринчи боб яримўтказгичлар физикаси асосларига баъишланган. Бу ерда яримўтказгич материаллар кристалл панжарасининг ту-зилиши, панжарада учрайдиган нуқсонлар ва уларнинг тавсифнома-лари кўрилади. Шунингдек, хусусий ва киришмавий яримўтказгич-лар Пақида асосий тушунчалар, яримўтказгичларда электронлар ва коваклар статистикаси, зонавий назария асослари, кристалл яримўт-казгичларда электрик бетарафлик шартлари ва электрик ўтказувчан-лик механизмлари келтирилган.

Иккинчи боб p - n ўтишнинг Осил бўлиш физикасини тушун-тиришга ва тавсифномаларини таълил қилишга баъишланган. p - n ўтиш Памма яримўтказгич асбобларнинг асоси бўлганлиги сабабли, p - n ўтишдаги физикавий Подисалар етарлича батафсил кўрилган. Ўтишнинг ишлаши унга тўбри ёки тескари кучланишлар берилган Поллар учун таълил қилинади.

Учинчи бобда кўплаб яримўтказгич диодларнинг физикавий асослари ва уларнинг тавсифлари келтирилган. Бу ерда Шоттки ди-одлари, варикаплар, фото- ва ёритувчи диодлар, Ганн диодлари, тун-нел диодлар ва бошқа, p - n ўтиш асосидаги асбоблар каби электрон асбоблар тавсифномалари, ишлаш тамойиллари ва ўлчаш усуллари билан танишилади.

Тўртинчи боб биқутбий транзисторларнинг ишлашини таълил қилишга баъишланган. Бу ерда транзисторларнинг физикавий асос-лари, вольт-ампер тавсифномалари ва ўлчаш усуллари кўрилади. Ге-тероўтишли транзисторлар Пақида маълумотлар келтирилган, уларни ривожлантириш йўллари кўрсатилган.

Бешинчи бобда Памма кўринишлардаги майдоний транзистор-ларнинг ишлаш тамойиллари Пақида маълумотлар келтирилган. Транзисторлар геометрияси ва уларнинг ишчи тавсифномалари кел-тирилган.

Олтинчи боб манфий дифференциал қаршиликли электрон ас-боблар ишини таълил қилишга баъишланган. Булар бир ўтишли транзисторлар, кўчкисимон ва туннел транзисторлардир. Бу ерда бу кўринишдаги асбобларнинг тузилиши, улаш усуллари ва ишчи тав-сифномалари келтирилган. Кўрилаётган асбоблар асосида ётувчи физикавий механизмлар батафсил ўрганилган.

Ёттинчи бобда интеграл транзисторлар, яъни интеграл микро-тузилмалар таркибига кирувчи транзисторлар баёни

ва хусусиятлари келтирилган. Ушбу транзисторлар ва интеграл микротузилмаларни тайёрлаш технологиялари хусусиятлари пақида маълумотлар келтирилган.

Саккинчи бобда дискрет ва интеграл транзисторларни тайёрлашнинг технологик усуллари таълиқланади. Транзисторлар тайёрлашнинг диффузиявий ва планар технологиялари баён қилинган.

Ушбу китоб яримўтказгичлар физикаси, яримўтказгич асбоблар физикаси, микроэлектроника, радиоэлектрон асбоблар соҳасида мутахассислар тайёрловчи университетлар, институтлар ва ўрта махсус ўқув юрлари талабаларига ҳамда шу соҳа аспирантлари, илмий ходимларига мўлжалланган.

І БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ПАҚИДА ҚИСҚАЧА МАЪЛУМОТ

І.І. Яримўтказгичлар

Яримўтказгичлар-модданинг ажойиб тури бўлиб, улар ўзига хос хоссалари билан бошқалардан яққол ажралиб туради. Умуман олганда, электрик ўтказувчанлигига қараб моддалар учта катта синфга: ўтказгичларга (электрик ўтказувчанлиги 10^6 Сим/м дан катта), яримўтказгичларга (электрик ўтказувчанлиги 10^{-8} ÷ 10^6 Сим/м оралиқда) ва айланмақларга (электрик ўтказувчанлиги 10^{-8} Сим/м дан кичик) бўлинади. Яримўтказгичларнинг электрик ўтказувчанлиги жуда кенг оралиқда ётиши юқоридаги маълумотлардан кўриниб турибди.

Шу билан бирга яримўтказгичларнинг ўзига хос муҳим хусусиятларидан бири электрик ўтказувчанлигининг ўлардаги киришма-ларнинг тури ва концентрациясига нисбатда сезгирлигидир. Маса-лан, тоза яримўтказгичга 10^{-4} ÷ 10^{-10} % миқдорда киришма киритиш билан унинг электрик ўтказувчанлигини кескин ўзгартириш мумкин. Шу билан бирга яримўтказгичларнинг яна бир муҳим хусусияти - улар электрик ўтказувчанлигининг температурага сезгирлигидир. Бундай боғлиқлиқни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\sigma = B \cdot \exp(-W_a / kT)$$

бу ерда, σ -берилган T -температурадаги электрик ўтказувчанлик, B -ўзгармас доимий, W_a -заряд ташувчиларнинг фаолланиш энергияси, k -Больцман доимийси, T -мутлақ температура. Чунончи, яримўтказгичнинг температураси 1°C га ўзгарганда унинг электрик ўтказувчанлиги 5-6% га ўзгариши мумкин. Жуда кўплаб яримўтказгичларга ва улар асосида ясалган асбобларга ёрушлик, ионловчи нурлар ва шу кабиларнинг таъсирлари Пам электрик ўтказувчанликнинг кескин ўзгаришига олиб келади. Бунга турли яримўтказгич детекторларни, ёрушлик диодларини, ёрушлик резисторларини ва қатор бошқа асбобларни Пам мисол қилиб кўрсатиш мумкин. Шуни эслатиб ўтиш жоизки, яримўтказувчанлик хоссаси фақат қаттиқ жисмларгагина хос бўлмай, суюқ Полатдаги органик бирикмалардан иборат шиша-симон, аморф тузилишга эга бўлган яримўтказгичлар Пам шундай хоссаларга эгадирлар. Улар ўзларининг бир қатор маълум камчилик-лари туфайли Позирча техникада кенг татбиқ қилинганича йўқ. Қаттиқ жисмлардан яримўтказгич хоссасига эга бўлган моддалар қато-рига жуда кўп турли моддалар, масалан, кремний, германий, бор, олмос, фосфор, олтингутурт, селен, теллур, кўпчилик табиий минераллар ва қатор бирикмалар: $GaAs$, GaP , $JnSb$, SiC , ZnS , $CdTe$, $GaSb$ ва Показолар киради. Бу яримўтказгичлар ўзларининг хилма-хил хоссалари билан бир-бирларидан анча фарқ қиладилар. Шунинг учун Пам турли мақсадлар учун турли яримўтказгичлар қўлланилади.

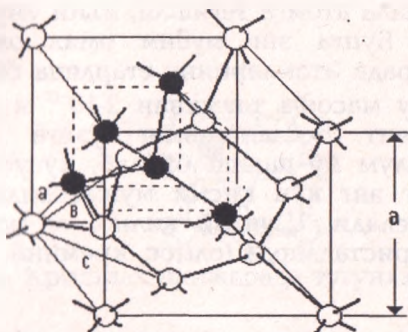
Бироқ, Позирги замон техникасида асосан бир неча хил ярим-ўтказгичлар кенг ишлатилмоқда. Буларнинг ичида энг олдинги ўрин-ларда кремний (Si), германий (Ge), галлий маргимуши ($GaAs$) тура-ди. Айниқса кремний Позирги замон микроэлектроникасида ўзининг кўп хоссалари билан мураккаб технологик талабларга жавоб берганлиги сабабли асосий материал ўрнини эгаллаб турибди.

Электрон техникасида ишлатиладиган кўпчилик яримўтказгич материаллар кристалл тузилшга эга. Яримўтказгичнинг кристалл тузилиши нақадар мукамаллиги, унда турли нуқсонларнинг бор ёки йўқлиги ва уларнинг миқдори яримўтказгичнинг асосий хоссаларини белгилаб берувчи омидир. Шу боисдан, қисқа бўлса Пам асосий яримўтказгич моддалар - кремний ва германийнинг

кристалл тузилиши ва унинг асосий хусусиятлари Пақида ўзгартириб ўтатишимиз.

1.2. Иримўтказгичларнинг кристалл тузилиши

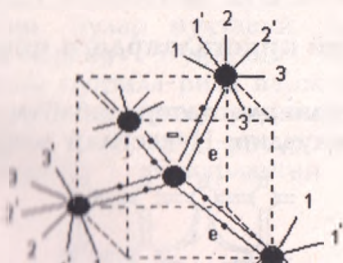
Агар бирор модданинг атомлари унинг Пажами бўйлаб узаро маълум даврийлик билан маълум ўзгармас масофаларда жойлашган бўлса, у Полда бундай модда кристалл тузилишга эга дейилади. Атомлар ана шундай тартиб билан жойлашиб кристалл панжарани Тосил қилади. ИнсоЛ сифатида кремний ва германийни олсак, улар-нинг кристалл панжараси бир хил бўлиб, олмос кристалл (1.1-расм) панжарасининг ўзгинасидир.



1.1-расм. Олмос кристалл панжараси

Ушбу кристалл панжарада Пар бир атом тўри тетраэдр тартибда ўриланган тўрттадан атом билан ўралган Полатда жойлади. Атом-ларнинг кристалл панжарада ана шундай тартибда мустақкам жой-лашган нуқталари кристалл панжаранинг тугуналари дейилади. Бу атомларнинг Пар тартибда қарасак, улар электрик жипатдан бетараф бўлади. Лекин шунга қарамасдан атомлар ўзаро етарлича қўйлашган кучи билан тортишиб, ўз жойларида мустақкам жойлади. Хўш, бу қандай куч экан?

Бу куч кристалл панжарани ташкил қилувчи



$$\sigma = B \cdot \exp(-W_a / kT)$$

бу ерда, σ -берилган T -температурадаги электрик ўтказувчанлик, B -ўзгармас доимий, W_a -заряд ташувчиларнинг фаолланиш энергияси, k -Больцман доимийси, T -мутлақ температура. Чунончи, яримўтказгичнинг температураси 1°C га ўзгарганда унинг электрик ўтказув-чанлиги 5-6% га ўзгариши мумкин. Жуда кўплаб яримўтказгичларга ва улар асосида ясалган асбобларга ёруклик, ионловчи нурлар ва шу кабиларнинг таъсирлари Пам электрик ўтказувчанликнинг кескин ўз-гаришига олиб келади. Бунга турли яримўтказгич детекторларни, ёруклик диодларини, ёруклик резисторларини ва қатор бошқа асбобларни Пам мисол қилиб кўрсатиш мумкин. Шуни эслатиб ўтиш жоизки, яримўтказувчанлик хоссаси фақат қаттиқ жисмларгагина хос бўлмай, суюқ Полатдаги органик бирикмалардан иборат шиша-симон, аморф тузилишга эга бўлган яримўтказгичлар Пам шундай хоссаларга эгадирлар. Улар ўзларининг бир қатор маълум камчилик-лари туфайли Позирча техникада кенг татбиқ қилинганича йўқ. Қат-тиқ жисмлардан яримўтказгич хоссасига эга бўлган моддалар қато-рига жуда кўп турли моддалар, масалан, кремний, германий, бор, олмос, фосфор, олтингутурт, селен, теллур, кўпчилик табиий мине-раллар ва қатор бирикмалар: $GaAs$, GaP , $JnSb$, SiC , ZnS , $CdTe$, $GaSb$ ва Показолар киради. Бу яримўтказгичлар ўзларининг хилма-хил хоссалари билан бир-бирларидан анча фарқ қиладилар. Шунинг учун Пам турли мақсадлар учун турли яримўтказгичлар қўлланилади.

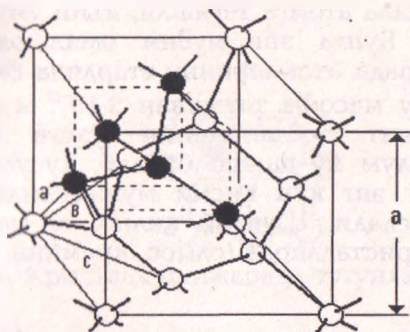
Бироқ, Позирги замон техникасида асосан бир неча хил ярим-ўтказгичлар кенг ишлатилмоқда. Буларнинг ичида энг олдинги ўрин-ларда кремний (Si), германий (Ge), галлий маргимуши ($GaAs$) тура-ди. Айниқса кремний Позирги замон микроэлектроникасида ўзининг кўп хоссалари билан мураккаб технологик талабларга жавоб бер-ганлиги сабабли асосий материал ўрнини эгаллаб турибди.

Электрон техникасида ишлатиладиган кўпчилик яримўтказгич материаллар кристалл тузилшга эга. Яримўтказгичнинг кристалл ту-зилиши нақадар мукамаллиги, унда турли нуқсонларнинг бор ёки йўқлиги ва уларнинг миқдори яримўтказгичнинг асосий хоссаларини белгилаб берувчи омидир. Шу боисдан, қисқа бўлса Пам асосий яримўтказгич моддалар - кремний ва германийнинг

кристалл тузилиши ва унинг асосий хусусиятлари Пақида тўғрисида ўтамиз.

1.2. Примўтказгичларнинг кристалл тузилиши

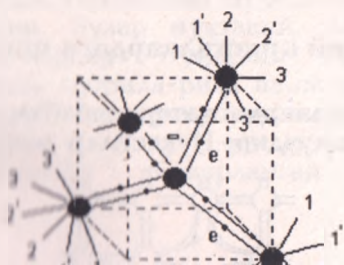
Агар бирор модданинг атомлари унинг Пажами бўйлаб ўзаро маълум даврийлик билан маълум ўзгармас масофаларда жойлашган бўлса, у Полда бундай модда кристалл тузилишга эга дейилади. Атомлар ана шундай тартиб билан жойлашиб кристалл панжарани Посил қилади. Миёна сифатида кремний ва германийни олсак, улар-нинг кристалл панжараси бир хил бўлиб, олмос кристалл (1.1-расм) панжарасининг ўзгинасидир.



1.1-расм. Олмос кристалл панжараси

Ушбу кристалл панжарада Пар бир атом тўри тетраэдр ўрнатилган тўрттадан атом билан ўралган Полатда туради. Атом-ларнинг кристалл панжарада ана шундай тарзда мустақкам жой-лашган нуқталари кристалл панжаранинг тугуналари дейилади. Бу атомларнинг Пар биринчи алофида қарасак, улар электрик жиПатдан бетараф бўлади. Лекин шунга қарамасдан атомлар ўзаро етарлича болавиши кучи билан тортишиб, ўз жойларида мустақкам туради. Хўш, бу қандай куч экан?

Бу куч кристалл панжарани ташкил қилувчи



$$\sigma = B \cdot \exp(-W_a / kT)$$

бу ерда, σ -берилган T -температурадаги электрик ўтказувчанлик, B -ўзгармас доимий, W_a -заряд ташувчиларнинг фаолланиш энергияси, k -Больцман доимийси, T -мутлақ температура. Чунончи, яримўтказгичнинг температураси 1°C га ўзгарганда унинг электрик ўтказув-чанлиги 5-6% га ўзгариши мумкин. Жуда кўплаб яримўтказгичларга ва улар асосида ясалган асбобларга ёруклик, ионловчи нурлар ва шу кабиларнинг таъсирлари Пам электрик ўтказувчанликнинг кескин ўз-гаришига олиб келади. Бунга турли яримўтказгич детекторларни, ёруклик диодларини, ёруклик резисторларини ва қатор бошқа асбобларни Пам мисол қилиб кўрсатиш мумкин. Шуни эслатиб ўтиш жоизки, яримўтказувчанлик хоссаси фақат қаттиқ жисмларгагина хос бўлмай, суyoқ Полатдаги органик бирикмалардан иборат шиша-симон, аморф тузилишга эга бўлган яримўтказгичлар Пам шундай хоссаларга эгадирлар. Улар ўзларининг бир қатор маълум камчилик-лари туфайли Позирча техникада кенг татбиқ қилинганича йўқ. Қат-тиқ жисмлардан яримўтказгич хоссасига эга бўлган моддалар қато-рига жуда кўп турли моддалар, масалан, кремний, германий, бор, олмос, фосфор, олтингутурт, селен, теллур, кўпчилик табиий мине-раллар ва қатор бирикмалар: $GaAs$, GaP , $JnSb$, SiC , ZnS , $CdTe$, $GaSb$ ва Показолар киради. Бу яримўтказгичлар ўзларининг хилма-хил хоссалари билан бир-бирларидан анча фарқ қиладилар. Шунинг учун Пам турли мақсадлар учун турли яримўтказгичлар қўлланилади.

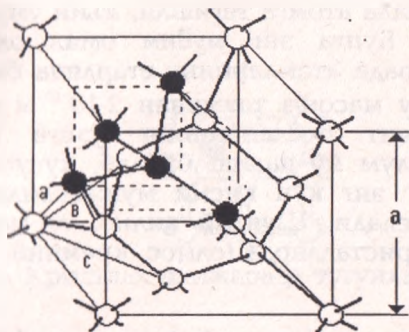
Бироқ, Позирги замон техникасида асосан бир неча хил ярим-ўтказгичлар кенг ишлатилмоқда. Буларнинг ичида энг олдинги ўрин-ларда кремний (Si), германий (Ge), галлий маргимуши ($GaAs$) тура-ди. Айниқса кремний Позирги замон микроэлектроникасида ўзининг кўп хоссалари билан мураккаб технологик талабларга жавоб бер-ганлиги сабабли асосий материал ўрнини эгаллаб турибди.

Электрон техникасида ишлатиладиган кўпчилик яримўтказгич материаллар кристалл тузилшга эга. Яримўтказгичнинг кристалл ту-зилиши нақадар мукамаллиги, унда турли нуқсонларнинг бор ёки йўқлиги ва уларнинг миқдори яримўтказгичнинг асосий хоссаларини белгилаб берувчи омидир. Шу боисдан, қисқа бўлса Пам асосий яримўтказгич моддалар - кремний ва германийнинг

кристалл тузилиши ва унинг асосий хусусиятлари Пақида тузилиб ўтади.

1.2. Примўтказгичларнинг кристалл тузилиши

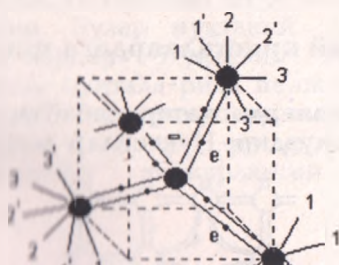
Агар бирор модданинг атомлари унинг Пажами бўйлаб ўзаро маълум даврийлик билан маълум ўзгармас масофаларда жойлашган бўлса, у Полда бундай модда кристалл тузилишга эга дейилади. Атомлар ана шундай тартиб билан жойлашиб кристалл панжарани Посил қилади. Мисол сифатида кремний ва германийни олсак, улар-нинг кристалл панжараси бир хил бўлиб, олмос кристалл (1.1-расм) панжарасининг ўзгинасидир.



1.1-расм. Олмос кристалл панжараси

Ушбу кристалл панжарада Пар бир атом тўри тетраэдр тартибда ўрнашган тўрттадан атом билан ўралган Полатда туради. Атом-ларнинг кристалл панжарада ана шундай тарзда мустақкам жой-лашган нуқталари кристалл панжаранинг тугунлари дейилади. Бу атомларнинг Пар биринчи даражасида қарасак, улар электрик жиқатдан бетараф бўлади. Лекин шунга қарамасдан атомлар ўзаро етарлича болавиши кучи билан тортишиб, ўз жойларида мустақкам туради. Хўш, бу қандай куч экан?

Бу куч кристалл панжарани ташкил қилувчи



атомларнинг ва-лент электронлари воситасида юзага келувчи кимёвий боПланиш кучидир. У одатда ковалент куч деб юритилади. Маълумки, биз таП-лил қилаётган кремний, германий ва углерод атомлари тўрт валентли бўлиб, тўрттадан валент электронларга эга. Демак, бундай атомлар бир вақтда тўртта атом билан ковалент боПланиш бо-сил қилиши мумкин. Ковалент боПланишни юзага келтирадиган асосий сабаб бу ўзаро алмашиниш таъсиридир. Албатта, бу турдаги ўзаро таъсир квантмеханик табиатга эга. Икки атом орасида ушбу алма-шиниш ўзаро таъсири юзага келиши учун уларнинг валент элек-тронлари қобиклари қисман бўлса Пам устма-уст тушмопи керак. Бошқача айтганда бу электронлар иккала атомга тегишли, яъни умумлашган бўлиб қолиши керак. Бунга энг муПим омил олмос ту-ридаги кристалл панжарада атомларнинг етарлича бир-бирига яқин ётганлигидир (бу масофа тахминан $2 \cdot 10^{-10}$ м га тенг). Ундан ташқари ковалент боПланишнинг ўзига хос хусусияти шундаки, у маълум йў-налиш бўйлаб, хусусан умумлашган электронларнинг энг кўп қисми мужассамлашган йўналиш бўйлаб юзага келади. Шундай қилиб, ол-мос панжарасига мансуб бўлган кристалларда (олмос, кремний, гер-

1.2-расм. Кремнийда ковалент боПланиш

маний) Пар бир атом ўзининг энг яқин атрофидаги тўртта атом би-лан ана шундай ковалент боПланган бўлади. Демак, кристаллнинг барча уячалардаги бу бешта атомни саккизта "умумлашган" элек-тронлар ковалент боПланиш бо-сил қилиб кристалл панжаранинг тугунларида мустаПкам ушлаб турар экан. Буни шартли равишда кремний учун (1.2-расм) қуйидагича акс эттириш мумкин. Шунини таъкидлаш лозимки, кристалл панжарада ковалент боПланишни бо-сил қилишда фақат валент электронлар қатнашади, холос. Яъни, атомнинг қолган барча ички электронлари ўз ядролари таъсирида қолиб, бундай боПланишда иштирок этмайди.

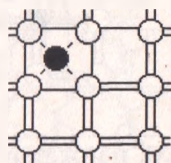
1.3. Пақиқий кристаллардаги нуқсонлар

Пақиқий кристалларда қатор сабаблар туфайли турли хил нуқ-сонлар мавжуддир. Нуқсонлар деганда атомларнинг

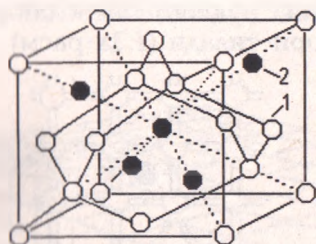


кристалл панжарадаги нормал жойларидан силжиши ёки кристалл панжарага бегона атомларнинг кириб қолиш йўллари тушунилади. Бундай нуқсонлар кристаллга махсус таъсир кўрсатиш жараёнида ёки бошқариб бравеянган тасодифий омиллар туфайли юзага келади. Айниқса, яримўтказгич кристаллар кўпчилик нуқсонларга ўзгичлик бўлади. Яримўтказгичларда содир бўладиган қатор йўналишлар (электрик ўт-казувчанлик, диффузия, кристаллларнинг ўсиши, оптик ва бошқа хоссаларнинг пайдо бўлиши ва йўқолиши) кристалл панжарадаги нуқсонларнинг таъсири билан тушунтирилиши мумкин.

1.36-расм. Кристалл панжарада вакансия ёки Шоттки нуқсонини



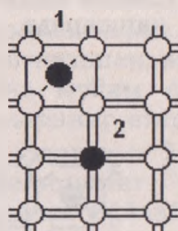
1.36-расм. Кристалл панжарада тугунлараро атом



1.38-расм. Кристалл панжарада атомларнинг жойлашиши: 1-тугунлар; 2-тугунлараро киришма атомлар

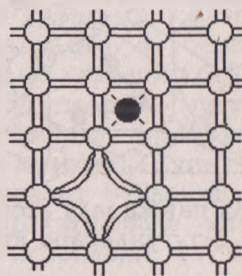
Кристалларда учрайдиган нуқсонларни тўртта гуруҳга ажратиб қилиш мумкин. Булар нуқтавий, чизиллий, сиртий ва йўқолиш нуқсонларидир. Нуқтавий нуқсонлар кристалл панжарадаги баъзи нуқтала-рида панжаранинг ўз атомлари йўқолиши ёки бирорта ортиқча атом мавжудлиги натижасида юзага келади. 1.3(а, б, в, г, д)-расмда энг кўп учрайдиган нуқтавий нуқсонлар тасвирланган. Агар кристалл

панжаранинг бирор тугунида хусусий атом етишмаса (1.3а-расм) у холда бундай нуқсон вакансия ёки Шоттки нуқсонини деб аталади. Кристалларда баъзибир Полларда вакансиялар жуфти мавжуд бўлади. Бундай нуқсонлар дивакансиялар деб аталади. Агар тугунлар орасида ортиқча атом жойлашган бўлса, бундай нуқсон киришмавий нуқсон (1.3б-расм) деб аталади. Кристалл панжаранинг тугунларида ёки тугунлари орасида жойлашган киришма атомлар Пам нуқтавий нуқсон дейилади (1.3г-расм).



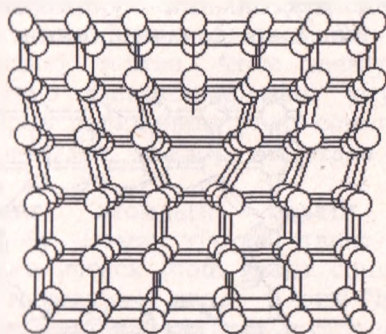
1.3 г-расм. Кристалл панжаранинг нуқтавий нуқсонини:
1-тугунлараро киришма атом; 2-тугундаги киришма атом

Вакансия ва тугундан чиқиб қолган хусусий атом жуфти Пам нуқтавий нуқсон Писобланади ва Френкелъ жуфти номи билан юри-тилади (1.3д-расм).



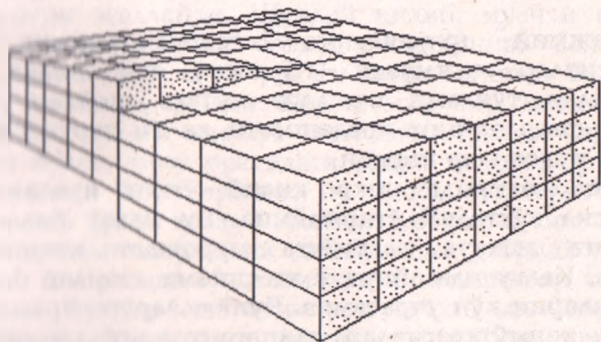
1.3д-расм. Френкелъ нуқсонини: вакансия ва тугундан чиққан хусусий атом жуфти

Чегаравий нуқсонларга чегаравий ва винтсимон дислокациялар таалуқдир. Чегаравий дислокация 1.4 а-расмда тасвирланган. Бу хил дислокациялар атомларнинг шундай тартибсизлигидан иборатки, бунда чексиз кўп атомлар тоқисликлари ичида битта дислокация чи-зилини тутаётган атомлар яримтекислиги кузатилади. Агар кристаллни Паблан яримтекислик билан кесиб, кристаллнинг ажра-ган қисмларини яримтекислик чегараси йўналиши бўйлаб бир-бирлик атомлар орасидаги масофага

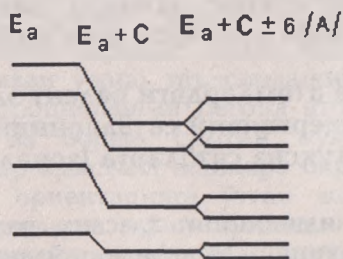


тавалитсан, винтсимон дислока-ция (1.4 б-расм) тасвирини тасаввур қилишимиз мумкин.

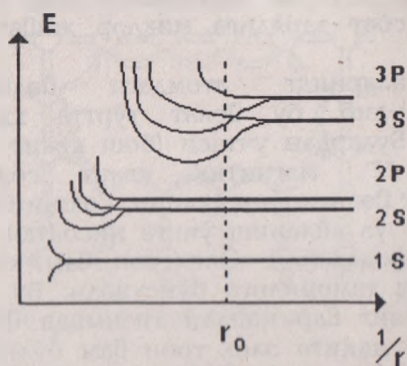
1.4а-расм. Кристалл панжарадаги чегаравий дислокация



1.4б-расм. Кристалл панжарадаги винтсимон дислокация



1.6а-расм. АлоПда олинган атомдаги энергиявий Полатлар



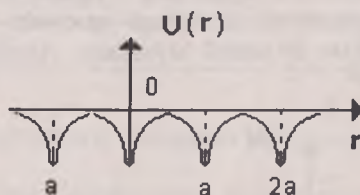
1.6б-расм. Қўшни атомлар орасидаги масофа кичрайтирилганда энергиявий сатПларнинг ажралиши

Идеал кристалларда барча атомлар қатъий даврий тартибда жойлашган бўлади. Атомлар жойлашишидаги бу "давр", панжара до-имийси деб аталадиган масофа билан тавсифланади. Ушбу Полда атомлар бир-бирига жуда яқин бўлганлиги сабабли бир атомга те-гишли электронлар қўшни атомлар майдонининг кучли таъсирида бўладилар. Бу ҳол энергиявий Полатларнинг 1.6а-расмдаги кўрини-шини тубдан ўзгартириб юборади.

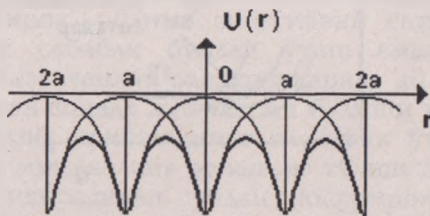
Аввал, иккита алоПда олинган, яъни бир-биридан улар ораси-даги ўзаро таъсирни Писобга олмаса бўладиган даражадаги масофада жойлашган атомларни қарайлик. Пар бир атом энергиявий сатПлар-нинг 1.6б-расмдагига ўхшаш

мажмуасига эга бўлади. Агар энди бу икки атомни улар орасидаги ўзаро таъсир ўзини намоеън этадиган даражагача бир-бирига яқинлаштирсак, энергиявий сатрларнинг Пар бири 1.6б-расмда кўрсатилганидек, иккитадан сатрга ажралади.

Кристалл панжара доимийси табиатда учрайдиганга нисбатан кўп марта катта бўлган Паёлий кристалл панжарага атомлар жой-лаштирайлик. У Полда Пар бир атом 1.6а-расмда кўрсатилганидек, ўзининг хусусий энергиявий сатрлар тизимига эга бўлади. Бундай шароитда кристалл ичидаги атомлар Посил қиладиган даврий потен-циал майдон алоПида атомларнинг даврий такрорланувчи потенциал майдонидан (1.7-расм) иборат бўлади.



1.7-расм. Атомларнинг даврий потенциал майдони



1.8-расм. Кристалл панжара ичидаги даврий потенциал майдон

Агар ушбу кристалл панжара доимийсини атомларнинг ўзаро таъсири намоеън бўладиган даражагача кичрайтирсак, у Полда табиат-да учрайдиган Пақиқий кристалл панжара Посил бўлади ва Пар бир хусусий сатр энергиявий зона Посил қилувчи қатор сатрларга ажралади. Энди кристалл панжара ичидаги даврий потенциал майдон тахминан 1.8-расмдагидек шуранишга эга бўлади. Бунда энергиявий зонадаги квант

Полатлар сони зонани ташкил этишда қатнашган атомлар сонига тенг бўлади. 1.9-расмда 6 атомдан иборат кристалл панжара доимийсининг кичрайишига боғлиқ Полда икки хос энергиявий сатҳнинг кўплаб сатҳларга ажралишлари кўрсатилган.

Энергиявий зонанинг кенглиги ва унинг энергиявий шкаладаги Полати панжара доимийси ва кўрилаётган зонани Посил қилган энергиявий сатҳга боғлиқ. У Полда 1.66-расмда келтирилган панжара доимийсининг табиатда учрайдиган қийматига мос келган кўн-даланг кесими 1.10-расмда тасвирланган кўринишга эга бўлади. Уш-бу Полда Пар бир зонадаги Полатлар сони кристаллдаги атомлар сонига ва зоналар кенглиги эса кристалл турига боғлиқдир.

Агар энергиявий зоналар қисман устма-уст тушмаса, икки Пол ўринли бўлиши мумкин. Алоҳида олинган атомда юқори энергия-

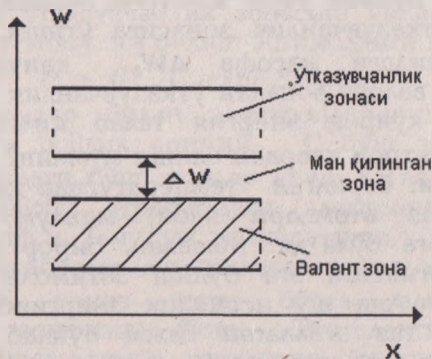


1.9-расм. Панжара доимийсининг кичрайишида иккита хос энергиявий сатҳнинг сатҳларга ажралиши

вий сатҳдаги икки квант Полат эгалланган бўлса, бундай сатҳлардан ташкил топган энергиявий зона батамом тўла бўлади, унга нисбатан юқорида ётувчи руҳсат этилган энергиявий зоналар эса, бўш қолади. Агар алоҳида олинган атомнинг энг юқори энергиявий сатҳи битта электронга эга бўлса, бу сатҳдан ташкил топган зона фақат яримтўла бўлади.

Энергиявий зоналар Пақида юқорида баён этилган мулоҳазалар фақат атомлари қатъий тартибда жойлашган

идеал кристаллар учун ўринлидир. Агар бирор зонада бирорта эркин электрон бўлмаса, у Полда ташқи майдон берилганда ушбу зона электрик ўтказувчан-



1.10-расм. Энергиявий зонанинг кўндаланг кесими

ликка Печ қандай Писса қўшмайди. Пудди шунингдек, ҳамма мавжуд Полатлари электронлар билан тўлган зонада Пам электрик ўтказув-чанлик юзага келмайди. Пақиқатдан Пам, ташқи майдон таъсирида электрон қўшни энергиявий сатПга ўтиши керак. Бироқ, Памма энергиявий сатПлар батамом банд бўлганлиги сабабли бундай ўтиш амалга ошмайди. Электронлар ўтказувчанлик электронларига айла-ниши учун улар тўла бўлмаган зонада жойлашган бўлиши керак.

Шундай қилиб, кристаллнинг электрик ўтказувчанлиги асосан энг қуйи зона-валент зонанинг тўлиш даражасига ва унинг юқори чегарасидан ундан юқорироқ ётган бўш зонанинг қуйи чегарасигача бўлган масофага боПлиқ.

1.5. Ўтказгичлар, яримўтказгичлар ва диэлектриклар хоссаларини зоналар диаграммаси нуқтан назаридан тушунтириш

Кристаллдаги энергиявий зоналарнинг ўзига хос хўсусиятлари ва тақиқланган зонанинг кенглигига қараб кристалларнинг электрик хоссалари қандай ўзгаришини қараб чиқайлик.

коваклар сони p_0 тем-пературага қараб қуйидагича ўзгаради :

$$n_0 = p_0 = Ve^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}} \quad (1.3)$$

бу ерда, V -яримўтказгичга тегишли ўзгармас катталиқ.

Электрик ўтказувчанлик эркин заряд ташувчиларнинг концен-трациясига мутаносиб эканлиги маълум:

$$\delta = \mu_n en_0 = \mu_p ep_0 \quad (1.4)$$

бу ерда, μ_n ва μ_p -электрон ва коваклар Паракатчанлиги, e -электрон заряди.

У Полда яримўтказгичларнинг электрик ўтказувчанлиги темпе-ратурага бошлиқ равишда қуйидаги қонуният билан ўсади:

$$\delta \cong Ae^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}} \quad (1.5)$$

бу ерда, A -ўзгармас доимий. Демак, яримўтказгичнинг электрик ўт-казувчанлиги температура ортиши билан жуда кескин ортар экан. Бу яримўтказгичларнинг ўзига хос муҳим хусусиятларидан биридир.

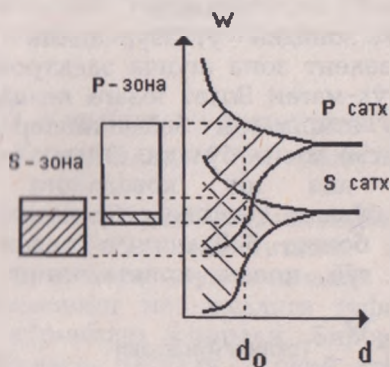
Ўтказгичларда-валент зона қисман тўлган ёки юқорироқдаги бўш зона билан қисман устма-уст тушади. Ўтказгичлар зоналарида содир бўладиган ток ўтказиш Подисаларини ишқорий ер элемент-лари мисолида тушунтириш мумкин. Ишқорий металллар атомининг S -қобида битта электрон мавжуд. Аслида эса, бу қобикда икки электрон жойлашиши мумкин (Паули тамойили бунга йўл қўяди) бўлганлиги ва электронлар энг кичик энергиявий Полатни эгаллашга интиланлиги сабабли, металл кристалл панжарасидаги бир қисм атомларнинг S -қобикларидаги электронлар иккинчи яримқисм атом-ларнинг S -қобиклардаги иккинчи бўш жойларга ўтиб жойлашиб олади. Шундай қилиб, кристалл валент зонасидаги мумкин бўлган Полатларнинг яримқисми тўлган, яримқисми эса бўш бўлади. Би-нобарин, металлда валент зонага бевосита ёндош бўш зона-ўтказув-чанлик зонаси мавжуд, яъни улар орасида тақиқланган зона йўқ бўлади. Ана шундай кристаллга электрик майдон берилса, маълум қисм электронлар майдон таъсирида ўз Паракатини майдон бўйлаб йўналтиради ва юқоридаги бўш сатлга ўтиб, электрик ўтказувчан-ликни юзага келтиради.

Ишқорий ер металлариға келсак, уларнинг S-сатлида валент дин электрон мавжуд бўлганлигидан S-зона батамом тўлган бўлади. Бироқ бу металлларнинг кристалл панжараси шундай тузилганки, S-зона ундан кейинги бўш P-зона билан қисман устма-уст (1.12-расм) тушади. Электронлар S-зонанинг юқоридаги қисмидан P-зонага шундай ўтадики, металл зона (ям қисман бир хил энергиявий сатлга қадар (1.12-расм) тўлган бўлади. S-зонада бўш жойлар-коваклар ва P-зонада эса маълум миқдорда электронлар мавжудлиги туфевли кристалл электрик ўтказувчан бўлади.

Бирча металлларда ва металл қотишмаларда валент зона S-сатли қисман тўлган, ёки кейинги бўш зона билан қисман устма-уст тушган бўлади, шу сабабли улар электрик токни яхши ўтказадилар.

1.6. Хусусий (киришмасиз) яримўтказгич

Шундай қилиб, яримўтказгичда пастдаги тўлган (валент) зонанинг юқори қирпоидан юқоридаги бўш (ўтказувчанлик) зонанинг қуйи қирпои (1.10-расм) шундай энергиявий оралиқ ΔW_0 билан ажралганки, хона температурасида етарлича иссиқлик энергиясига



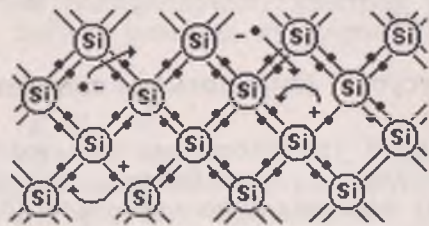
1.12-расм. Металлларнинг кристалл панжарасида S- ва P-зоналарнинг

қисман устма-уст тушиши

эга бўлган баъзи-бир электронлар бу ораликдан ўта олиши мумкин. Ушбу жараёнда электронлар тўлган зонанинг юқори қисмидан бўш зонанинг пастки қисмига ўтади. Пар қандай электроннинг тўлган зо-нанинг юқори сатпларини ташлаб тўлмаган зонанинг қуйи сатпла-рига ўтиш элтимоллиги, ана шу ораликни ўтиш учун зарур бўлган энергия ΔW_0 ортиши билан кескин камаяди (1.5 даги 1.2 тенгликка қаранг).

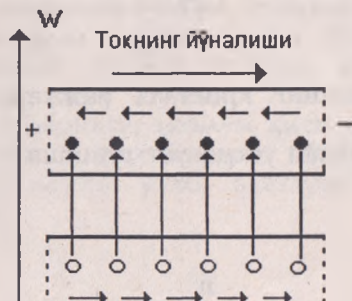
Тўлган зонадаги электронлар кристаллнинг ўтказувчанлигида

иштирок этмаслиги юқорида кўрсатиб ўтилди. Бироқ, хона темпера-



1.13-расм. Валент зонада мусбат зарядли ковакларнинг пайдо бўлиши

турасида валент зонадан ўтказувчанлик зонасига нечта электрон ўт-са, валент зона шунча электронни йўқотади ва ниПоят қисман тўл-маган Полат юзага келади. Яъни, валент зонада электрон етишмаган боПланишлар-мусбат зарядли коваклар (1.13-расм) Посил бўлади. Энди электронлар бошқа боПланишлардан ана шу ковакларга сакраб ўтиш имкониятига эга бўлади. Натижада бу ковак электрон билан тўлиб йўқолади, бошқа боПланишда ковак пайдо бўлади. Шундай қилиб гўё ковак кристаллнинг бир жойидан



назиччи жойига тар-тибсиз кўчиб юради.

1.14-расм. Ташқи электрик майдон берилганда яримўтказгичда эркин электронлар ва коваклар токининг пайдо бўлиши

Агар бундай яримўтказгичга ташқи электрик майдон берилса, бу боПланишдан у боПланишга тартибсиз сакраб кирайи валент элек-тронларнинг майдон йўналиши бўйлаб тартибдан сакраб ўтишлари ва демак, валент зонада ковакларнинг ушбу электронларга тескари йў-налишдаги тартибдан кўчиши-коваклар токи, ўтказувчанлик зонасида эса, эркин электронлар токи (1.14-расм) юзага келади.

Электронлари сони коваклари сонига тенг ($n_0 = p_0$) бўлган, бир турдаги атомлардан ташкил топган соф яримўтказгич-хусусий ярим-ўтказгич дейилади. Масалан, тартибда бирорта Пам нуқсони бўл-маган яримўтказгич хусусий яримўтказгич бўлиши мумкин. Таби-ийки, бундай яримўтказгичнинг ўтказувчанлиги берилган шароитда шу турдаги, лекин хусусий бўлмаган яримўтказгичникига қараганда ниПоятда кичик бўлади. Масалан, хусусий яримўтказгич- кремний-нинг хона температураси шароитидаги солиштирма қаршилиги тах-минан 300 кОм-см истрифида бўлади. Шу билан бирга хусусий ярим-ўтказгичларда электрик токнинг пайдо бўлишида Пам элект-ронлар, Пам коваклар қатнашишини доим эсда тутиш лозим.

1.7. Киришмали яримўтказгич.

1.7.1. Киришмали n -тур яримўтказгич

Агар яримўтказгич кристаллдаги айрим атомлар ўзгача валент-ликка эга бўлган элементнинг атомлари билан алмаштирилса, пан-жара тузилишидаги қатъий тартиб бузилади. Киришманинг мав-жудлиги туфайли энергиявий диаграмманинг кўриниши ўзгаради. Бироқ, агар киришма миқдори кўп бўлмаса, масалан, асосий атом-лар сонининг кўп миқдодан бирини ташкил қилса, идеал яримўтказгич кристаллининг энергиявий диаграммаси деярли ўзгармайди, шундан раш мумкин. Чунки, киришма атомларнинг қатнашиши мавжуд зо-налар орасида янги квант Полатлар зонага бўлишигагина (агар фақат бир турдаги киришма

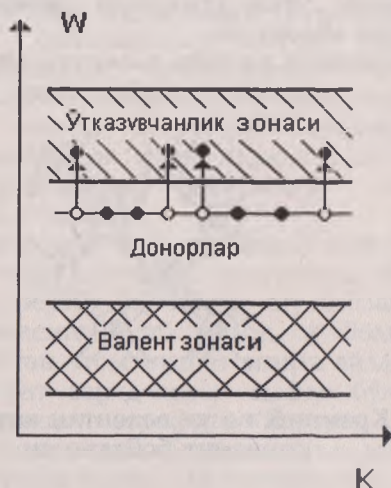
киритилса) олиб келади Бу Полда киришма атомлари бир-биридан узоқ жойлашгани учун, умумий Полда улар орасидаги ўзаро таъсирни Писобга олмасдан киришма томонидан ки-ритилган квант Полатларни лоақал тақиқланган зонанинг маълум жойларида жойлашган энергиявий Полатлар деб қараш мумкин.

Қўшимча энергиявий сатПнинг асосий кристалл зоналари ора-сидаги Полати кристаллнинг ўтказувчанлигига киришмалар миқдори жуда оз бўлганида Пам кучли таъсир қилади.

Беш валентли фосфор, маргимуш ва сурьма каби элементлар атомлари германий ва кремнийда ўтказувчанлик зонасига яқин жой-лашган қўшимча донор сатПлар Посил қилади. Паст температура-ларда киришмавий сатПлар электронлар билан тўлган бўлади, аммо юқори температураларда электронлар иссиқлик Паракати туфайли бу сатПдан ўтказувчанлик зонасига ўтиб олади. Бу Полда улар эркин ва демак, Паракатчан бўлиб қоладилар Памда кристаллнинг электрик ўтказувчанлигида қатнашадилар.

Бундай шароитда, ўтказувчанлик электронларининг сони тах-минан киришма атомларининг сонига тенг бўлади, кристаллнинг ўт-казувчанлиги киришма концентрациясига тўпридан-тўпри боПлиқ бў-лади. 1.15-расмда n-тур яримўтказгичда ток Посил қилувчи Паракат-чан заряд ташувчилар кўрсатилган.

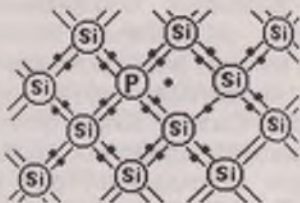
Кремний кристалига киритилган беш валентли киришмавий атом битта электронини осонгина бўшатиб, ўтказувчанлик зонасига бериб қўйишининг физик-кимёвий моПияти қуйидагидан иборат: кремний атомлари тўрт валентли бўлганлигидан, кристалл панжара



1.15-расм. n-тур яримўтказгичда Паракатчан заряд ташувчилар

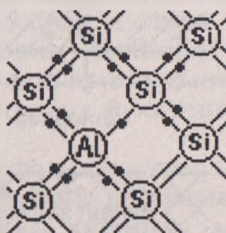
Посил қилишда тўрттала электрони воситасида атрофидаги тўртта атом билан ковалент боғланиш (1.2-расмга қ.) Посил қилади.

Агарда, кристалл панжаранинг бирор тугунидаги кремний ато-мини беш валентли киришма атом билан (1.16а-расм) алмаштирсак, у Полда бу атом тўртта электрони атрофидаги атомлар билан ко-валент боғланиш Посил қилишга беради. Унинг бешинчи валент электрони кимёвий боғланишда иштирок этмай, атом билан заиф боғланган валент электронлигича қолади. Энди бундай электронга озгинагина иссиқлик энергияси берилса, у



атомдан ажралиб, ўтка-зувчанлик зонасига ўтади, яъни эркин электронга айланади.

1.16а-расм. Кремний ва беш валентли киришма атомнинг ковалент боғланиши



1.16б-расм. Кремний ва уч валентли киришма атомнинг ковалент боғланиши

1.7.2. Киришмали *p*-тур яримўтказгич

Уч валентли галлий ёки бор элементининг атомлари германий ва кремний кристаллида валент зонага яқин жойлашган киришмавий сат \square Посил қилади. Паст температураларда киришмавий сат \square элек-тронлар билан тўлмаган. Бироқ, юқори температураларда электрон-лар иссиқлик Паракати туфайли уйПониши Писобига яримўтказгич валент зонасидан бу сат \square га ўтишлари мумкин. Бунда улар қўзПалмас манфий зарядларга айланиб (чунки бу сат \square лар анча чуқур бўлган-лигидан улардан электроннинг қайтиб чиқиши анча қийин) валент зонада Паракатчан қўшимча коваклар Посил қиладилар.

"Ковак"-мусбат зарядли эркин заряд ташувчи сохта зарра си-фатида намоён бўлади. Аслида у, кристалл панжарасидаги валент боғланишларда (1.2-расмдаги боғланишларни қўз олдингизга келти-ринг) бирор сабаб туфайли етишмай қолган электроннинг ўрнидир.

"Ковак"нинг моПиятини тугал тушуниб олиш муПим бўл-ганлиги туфайли биз бу Пақда батафсилроқ тўхталамиз.

Масалан, кремний кристалл панжарасининг 1.2-расмда келти-рилган бешта атомдан иборат уячасини олайлик. Бу уячада валент боғланишларда саккизта электрон иштирок этади. Бу электронлар-нинг тўрттаси марказдаги атомники, қолган тўрттаси атрофдаги қолган атомларникидир. Ўша

атрофдаги атомларнинг Пар бири Пам ўз навбатида, ўз атрофидаги қолган учта атом билан учта валент электрони ёрдамида валент боПланишлар Посил қилади. Хуллас, кремний кристаллидаги атомларнинг Памма валент электронлари ва-лент боПланишларга умумлашган. Шу билан бирга, Пар бир атомда электрик бетарафлик сақланиб қолади, яъни одатдагидек атом ядро-сидаги мусбат заряд атомдаги электронларнинг йиПинди заряди билан бетарафлашганича қолади.

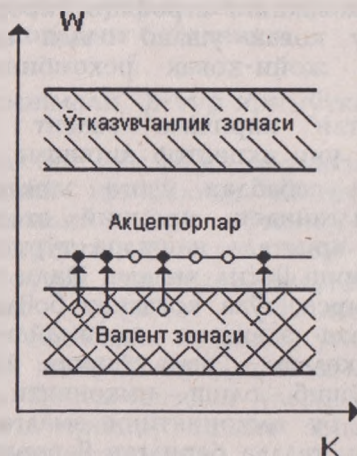
Агарда, бирор валент боПланишдаги электрон қандайдир сабаб билан (масалан, иссиқлик энергияси ёки ташқаридан берилган бош-қа энергия Писобига) шу боПланишдан бўшаб ўтказувчанлик зонасига ўтиб кетса, у Полда шу валент электронини йўқотган атом мусбат ионга айланади, яъни шу атомда битта мусбат заряд-ковак пайдо бўлади. Агар шу боПланишнинг-ковакнинг атрофига бирорта электрон келиб қолса, уни шу ковак ушлаб олади ва натижада электроннинг бўш жойи-ковак рекомбинация йўли билан йўқолади.

Уч валентли киришма валент зонадан электрон олганлиги учун уни акцептор киришма дейилади. Хўш, бу киришма нима сабабдан ўзига электронни олар экан? Юқорида айтилганидек, кремний атоми тўрт валентли бўлганлигидан, кристалл панжара тўртта электрон билан ковалент боПланиш Посил қилади. Энди унинг ўрнига 3 валентли атом кирса, тула ковалент боПланиш Посил қилиш учун унга битта электрон етишмайди(1.16б-расм), яъни ковак юзага келади. Энди бирор йўл билан битта электронни қўшиб олиш имконияти туПилиши билан киришма атом бу имкониятини амалга оширади. Бундай электронлар кристаллда берилган Пароратда иссиқлик Паракатининг флукуацияси Писобига доимо Посил бўлиб туради. Демак, кристаллнинг бирлик Пажмида унга киритилган акцептор атомлар-нинг концентрациясига мос концентрацияда коваклар мавжуд бўла-ди. Кристалл электрик ўтказувчанлиги бу Полда асосан коваклар билан белгиланганлиги учун бундай яримўтказгични *p*-тур ёки ковак яримўтказгич деб атайдилар. *p*-тур яримўтказгичда коваклар асосий заряд ташувчилар, электронлар эса, ноасосий заряд ташувчилардир.

1.17-расмда *p*-тур яримўтказгичда ток Посил қилувчи Паракат-чан заряд ташувчилар кўрсатилган.

n -тур ва p -тур яримўтказгичларда ноасосий заряд ташувчилар-ни Писобга олмаса Пам бўлар экан, деган тасаввур пайдо бўлиши мумкин. Бу мутлоқо нотўри фикр. Кўпчилик яримўтказгич асбоб-ларнинг иш жараёнида ноасосий заряд ташувчиларнинг аПамияти катта. Бу Пақда тегишли мавзуларда маълумотлар берилади.

1.15- ва 1.17-расмларда киришмалар киритилган яримўтказгич (масалан, кремний)нинг энергиявий диаграммалари кўрсатилган. Шўни айтиб қўйиш жоизки, хона температурасида тақиқланган зо-нанинг кенглиги германий яримўтказгич учун 0,67 эВ, кремний учун эса 1,12 эВ га тенг.



1.17-расм. p -тур яримўтказгичда Паракатчан заряд ташувчилар

1.8. Яримўтказгичларда эркин заряд ташувчилар.

1.8.1. Ўтказувчанлик электронлари ва коваклари

Юқорида кўриб ўтилганидек, мутлақ нолдан фарқли темпера-тураларда электронларнинг иссиқлик таъсирида уйПониши ва улар-нинг валент зонадаги Полатдан ўтказувчанлик зонасидаги Полатлар-дан бирига ўтиши маълум эПтимоликка эга. Худди шунингдек, электрон донор

арвашига сатшдан ўтказувчанлик зонасига ёки ва-лент зонадан акцентор киришмаси сатшга ўтиши ҳам мумкин (1.15-1.17-расмларга қаранг).

Ўтказувчанлик зонасидаги Полатлардан бирида турган электрон ўзини эркин заряд ташувчидек намоён этади, зеро бу зонадаги По-латлар квазиузлуксиз (деярли узлуксиз) бўлгани учун, электроннинг Полати жуда кичик электрик майдон таъсирида ҳам ўзгариши мум-кин. Бундай электронлар ўтказувчанлик электронлари деб аталади.

Хусусий яримўтказгич валент зонасидаги электронлар тизими-дан бир нечтаси ўтказувчанлик зонасига ўтиб кетса, бу тизимда электронларнинг вакант (бўш) Полатлари юзага келади. Бундай ша-роитда яримўтказгичга ташқи электрик майдон берилса, валент электронлар бу майдонга мос потенциалда кўчиб шу вакант По-латларга ўтишлари мумкин. Шундай қилиб, ташқи электрик майдон бугун валент электронлар тизимининг Полатини ўзгартиради, яъни вакант Полатларнинг кўчишини юзага келтиради. Яъни, валент зонада ҳам ўзига хос эркин заряд ташувчилар пайдо бўлади.

Бундай эркин заряд ташувчиларнинг ўзига хос хусусиятлари шундан иборатки, валент зонадан ўтказувчанлик зонасига ўтган электронларнинг сони қанча бўлса, заряд ташувчилар сони ҳам шун-ча бўлади. Иккинчидан, бу эркин заряд ташувчиларнинг заряди электрон зарядига тенг ва ишораси жиПатдан унга тескари, яъни мусбат ишоралидир. Нормал валент электронларнинг тўла бўлмаган тизими хусусиятини тўла равишда ифодаловчи бундай зарралар сони яримўтказгич валент зонасидаги вакант Полатлар сонига тенгдир. Бундай квазизарра ўтказувчанлик коваги деган ном билан юритилади.

1.8.2. Эркин заряд ташувчиларнинг асосий хоссалари

Биз юқоридаги мавзуларда ўтказувчанлик электронлари ва ко-ваклар Пақида кўп тўхталган эдик. Энди уларнинг асосий тавсифно-малари билан яқиндан танишайлик.

Ўтказувчанлик электронлари билан ковакларнинг зарядлари миқ-доран ўзаро тенг, ишора жиПатдан эса тескаридир, яъни $e_n = -1,6 \cdot 10^{-19} K$ ва $e_p = 1,6 \cdot 10^{-19} K$. Улар турли хил самаравий- m_n ва m_p массаларга эга. Улар τ_n ва τ_p -

ўртача яшаш вақтлари давомида мав-жуд бўладилар. Уларнинг Паракати эркин югуриш йўллари- I_n ва I_p , Паракатчанликлари μ_n ва μ_p , диффузия йўли узунликлари L_n ва L_p лар билан тасифланади. Ҳотказувчанлик электронлари ва коваклар-нинг яримҳотказгичдаги концентрацияси температурага, киришмавий атомлар концентрациясига, электрик майдон кучланганлигига, ярим-ҳотказгичга таъсир кўрсатаётган ёрублик ёки бошқа ташқи омиллар-нинг жадаллигига бошлиқ.

1.8.3. Ҳотказувчанлик электронлари ва ковакларининг самаравий массалари

Яримҳотказгичларда ҳотказувчанлик электронлари ва коваклари биз юқорида айтиб ҳотганимиздек, қатор ўзига хос хусусиятларга эга. Масалан, ҳотказувчанлик электронлари заряд жиҳатдан вакуумдаги электронга ўхшаш бўлишига қарамасдан масса жиҳатдан ундан туб-дан фарқ қилади. Масалан, ҳотказувчанлик электронлари учун сама-равий масса m_n -тушунчаси киритилиб, у катталиқ жиҳатдан турли яримҳотказгичлар учун турли қийматларга эга. Чунончи, кремнийда $m_n=0,26m_0$, германийда эса $m_n=0,12m_0$. Худди шунингдек коваклар учун Пам самаравий масса m_p -тушунчаси мавжуд. Кремний учун $m_p=0,38m_0$, германий учун эса $m_p=0,25m_0$. Ҳотказувчанлик электрон-лари ва коваклари массасининг бундай намоён бўлишига, яримҳотказгичда ҳотказувчанлик электронларининг вакуумдаги эркин электронлардан фарқли равишда кристалл панжарани ташкил қилувчи атомлар ва уларнинг электронларининг мураккаб электрик май-донлар таъсирида Паракат қилишлари сабабдир. Ушбу майдонлар бир шароитда электронлар Паракатига тўсқинлик қилса, (бунда электрон оПирроқ зарра сифатида намоён бўлади), иккинчи шаро-итда уларнинг Паракатини тезлаштиради (бу холда электрон енгил-роқ зарра сифатида намоён бўлади). Ундан ташқари анизотропик кристалларда m_n ва m_p самаравий массалар кристаллографик йўна-лишларга Пам бошлиқ бўлади. Самаравий масса Пақидаги масала би-лан чуқурроқ танишмоқчи бўлган ўқувчига қўшимча адабиётга му-рожаат қилишни тавсия этамиз.

1.8.4. Эркин заряд ташувчиларнинг яшаш вақти

Яримўтказгичда берилган температурада, мувозанат Полатда маълум концентрацияда эркин электронлар ва эркин коваклар мав-жуд эканлиги бизга юқоридан маълум. Бундай концентрациялар му-возанатдаги концентрациялар деб аталади ва мос равишда n_0 ва p_0 Парфлари билан белгиланади. Яримўтказгичда мувозанат шароитида вақт бирлиги ичида маълум миқдорда электрон ва ковак жуфтлари Посил бўлиб (генерацияланиб) турса, иккинчи томондан шунча жуфт рекомбинацияланиб туради:

$$r_0 = g_0 \quad (1.6)$$

бу ерда, r_0 ва g_0 мувозанат Полатидаги рекомбинация ва генерация тезликлари. Шунинг учун Пам n_0 ва p_0 лар берилган температура учун ўзгармайди.

Вақт бирлиги ичида рекомбинацияланувчи зарядлар жуфтнинг сони уларнинг концентрациясига мутаносибдир:

$$r_0 = \gamma_r n_0 p_0 \quad (1.7)$$

бу ерда, γ_r - рекомбинация доимийси дейилади.

Эркин электрон ва ковак Посил бўлиши ва уларнинг қайтиб рекомбинацияланиши Подисалари орасида маълум вақт ўтади. Бу вақт қарама-қарши зарядди зарраларнинг бир-бири билан учрашиш эПтимолигига, рекомбинация вақтида ажралиб чиққан энергияни соча олиш имкониятига ва бошқа шароитларга боПлиқ. Зарранинг эркин Полатда мавжуд бўлиш ўртача вақти унинг яшаш вақти де-йилади.

Биз юқорида $\gamma_r p_0$ -электроннинг, $\gamma_r n_0$ -эса, ковакнинг рекомби-нацияланиш эПтимолиги эканлигини кўрсатдик. Уларнинг яшаш вақтлари эса ушбу эПтимоликларнинг тескари қийматларининг ўз-гинасидир:

$$\tau_n = \frac{1}{\gamma_r p_0} \quad (1.8)$$

электрон ва

$$\tau_p = \frac{1}{\gamma_r n_0} \quad (1.9)$$

ковак учун.

Мос равишда ушбу ифодаларни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\tau_n = \frac{n_0}{r_0} \quad (1.10)$$

электрон ва

$$\tau_p = \frac{p_0}{r_0} \quad (1.11)$$

ковак учун.

Юқоридаги ифодалар мувозанат Полати учун ўринлидир. Агар, яримўтказгич ташқи таъсирга учраса, масалан, ёрушлик билан ёри-тилса, кескин қиздирилса, зарралар билан урилса, унинг Пажмида жадаллик билан заряд ташувчилар Посил бўла бошлайди - мувозанат бузилади. Бундай шароитда номувозанат Полат юзага келади.

Бу Пол учун номувозанат заряд ташувчиларнинг яшаш вақти:

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_p}} \quad (1.12)$$

Ушбу жараёнда номувозанат заряд ташувчиларнинг концентрацияси вақтга қараб:

$$\Delta n = \Delta n(c) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.13)$$

қонуният билан ўзгаради. Бу ерда, $\Delta n(c)$ -заряд ташувчиларнинг таш-қи таъсир тўхтаган пайтдаги номувозанат концентрацияси.

1.8.5. Эркин заряд ташувчиларнинг эркин югуриш йўли

Яримўтказгичга ташқи майдон берилмаганда эркин электрон-лар исталган йўналишда тартибсиз Паракат қилади. Электрик май-дон E таъсир этганда эса электрон майдон

бўйлаб йўналган $a = \frac{eE}{m}$ тезланиш ва $\Delta \vartheta = a\tau_c$ қўшимча

тезлик олади, бунда τ_c -тезланиш вақти. Агар τ_c истаганча катта бўлганда электроннинг тез-лиги Δv чексиз ўсиб бораверган бўлар эди. Бироқ, бу Полат фақат атомлари ўз

жойида тинч турган идеал кристалл панжараларда амал-га ошиши мумкин. Аслида эса реал кристаллардаги даврий майдон, биринчидан, атомларнинг иссиқлик Паракатлари, иккинчидан, крист-талл панжарадаги турли нуқсонлар таъсири сабабли бузилган бў-лади.

Шулар туфайли электрон, ўз йўлининг фақат қисқа қисмида-гина эркин юра олади, сўнгра бошқа атом ёки нуқсонлар билан тўқ-нашиб тезланиши ва тезлигини йўқотади. Электроннинг тезланиш олиши янгидан бошланади.

Ана шу l_n йўл электроннинг эркин югуриш йўли деб аталади. τ_e -вақт эркин югуриш вақти дейилади:

$$\tau_e = \frac{l_n}{g} \quad (1.14)$$

бу ерда, ν -электроннинг тўқнашишлар орасидаги тезлиги. Тажриба кўрсатадики, l_n одатда жуда кичик, яъни $\sim 10^{-5}$ см атрофида. Шунинг учун электроннинг бу масофада E майдон таъсирида олган қўшимча тезлиги унинг иссиқлик Паракати тезлиги ν_0 га қараганда жуда ки-чик. Шу сабабли (1.14) формулада ν нинг ўрнига ν_0 ни қўйиш мум-кин:

$$\tau_e = \frac{l_n}{g_0} \quad (1.15)$$

1.8.6. Эркин заряд ташувчиларнинг Паракатчанлиги

Қаракат тезлигини деярли йўқотган электрон E электрик майдон таъсирида $\Delta \nu$ қўшимча тезлик олса, у Полда электроннинг майдон бўйлаб Паракатидаги ўртача тезлиги:

$$\bar{g} = \frac{\Delta g}{2} = \frac{e}{2m_n} \cdot \frac{l_n}{g_0} E = \mu_n E \quad (1.16)$$

бу ерда,
$$\mu_n = \frac{e}{2m_n} \cdot \frac{l_n}{g_0} = \frac{\bar{g}}{E} \quad (1.17)$$

электроннинг Паракатчанлиги дейилади. Яъни, электроннинг кучлан-ганлик катталиги 1 В/см бўлган майдонда олган тезлиги электрон-нинг Паракатчанлиги деб аталади. Бу оғирдан кўринишича, эркин заряд ташувчининг Паракатчанлиги унинг самаравий массасига тес-кари муносабати бўлиб, ўлчов бирлиги $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ га тенг.

$$\tau_n = \frac{n_0}{r_0} \quad (1.10)$$

электрон ва

$$\tau_p = \frac{p_0}{r_0} \quad (1.11)$$

ковак учун.

Юқоридаги ифодалар мувозанат Полати учун ўринлидир. Агар, яримўтказгич ташқи таъсирга учраса, масалан, ёрушлик билан ёри-тилса, кескин қиздирилса, зарралар билан урилса, унинг Пажмида жадаллик билан заряд ташувчилар Посил бўла бошлайди - мувозанат бузилади. Бундай шароитда номувозанат Полат юзага келади.

Бу Пол учун номувозанат заряд ташувчиларнинг яшаш вақти:

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_p}} \quad (1.12)$$

Ушбу жараёнда номувозанат заряд ташувчиларнинг концентрацияси вақтга қараб:

$$\Delta n = \Delta n(c) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.13)$$

қонуният билан ўзгаради. Бу ерда, $\Delta n(c)$ -заряд ташувчиларнинг ташқи таъсир тўхтаган пайтдаги номувозанат концентрацияси.

1.8.5. Эркин заряд ташувчиларнинг эркин югуриш йўли

Яримўтказгичга ташқи майдон берилмаганда эркин электрон-лар исталган йўналишда тартибсиз Паракат қилади. Электрик майдон E таъсир этганда эса электрон майдон бўйлаб йўналган $a = \frac{eE}{m_n}$ тезланиш ва $\Delta \vartheta = at_c$ қўшимча

тезлик олади, бунда t_c -тезланиш вақти. Агар t_c истаганча катта бўлганда электроннинг тез-лиги Δv чексиз ўсиб бораверган бўлар эди. Бироқ, бу Полат фақат атомлари ў

Шундан тинч турган идеал кристалл панжараларда амал-га мумкин. Аслида эса реал кристаллардаги даврий майдон, биринчидан, атомларнинг иссиқлик Паракатлари, иккинчидан, кристалл панжарадаги турли нуқсонлар таъсири сабабли бузилган бўлади.

Шулар туфайли электрон, ўз йўлининг фақат қисқа майдонигагина эркин юра олади, сўнгра бошқа атом ёки нуқсонлар билан тўқнашиб тезланиши ва тезлигини бузотади. Электроннинг тезланиш олиши янгидан бошланади.

Ана шу l_n йўл электроннинг эркин югуриш йўли деб аталади. τ_e - вақт эркин югуриш вақти дейилади:

$$\tau_e = \frac{l_n}{g} \quad (1.14)$$

Бу ерда, v -электроннинг тўқнашишлар орасидаги тезлиги. Таъриба кўрсатадики, l_n одатда жуда кичик, яъни $\sim 10^{-5}$ см атрофида. Шунинг учун электроннинг бу масофада E майдон таъсирида олган қўшимча тезлиги унинг иссиқлик Паракати тезлиги v_0 га қараганда жуда кичик. Шу сабабли (1.14) формулада v нинг ўрнига v_0 ни қўйиш мумкин:

$$\tau_e = \frac{l_n}{g_0} \quad (1.15)$$

1.0.6. Эркин заряд ташувчиларнинг Паракатчанлиги

Ҳаракат тезлигини деярли йўқотган электрон E майдоник майдон таъсирида Δv қўшимча тезлик олса, у Полда электроннинг майдон бўйлаб Паракатидаги ўртача тезлиги:

$$\bar{g} = \frac{\Delta g}{2} = \frac{e}{2m_n} \cdot \frac{l_n}{g_0} E = \mu_n E \quad (1.16)$$

Бу ерда,

$$\mu_n = \frac{e}{2m_n} \cdot \frac{l_n}{g_0} = \frac{\bar{g}}{E} \quad (1.17)$$

электроннинг Паракатчанлиги дейилади. Яъни, электроннинг ташувчанлик катталиги 1 В/см бўлган майдонда олган тезланиш электроннинг Паракатчанлиги деб аталади. Бу формуладан кўринишича, эркин заряд ташувчининг Паракатчанлиги унинг самаравий массасига тес-қари ташувчиб бўлиб, ўлчов бирлиги $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ га тенг.

Худди юқоридагидек, ковак учун Пам Паракатчанлик ифодаси-ни ёзишимиз мумкин:

$$\mu_p = \frac{e}{2m_p} \cdot \frac{l_p}{g_0} \quad (1.18)$$

Эркин заряд ташувчиларнинг Паракатчанлиги кристалл панжа-ранинг хоссаларига, унда киришмаларнинг бор ёки йўқлиги ва тем-пературага боғлиқдир.

Хона температурасида электронларнинг Паракатчанлиги крем-нийда $1350 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, германийда эса $3900 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ га тенг. Темпе-ратура ортиши билан кристалл панжарадаги атомларнинг иссиқлик тебранишлари кўпайиши туфайли электронларнинг сочилиши Пам кучаяди, Паракатчанлиги эса камаяди.

Тажрибадан қуйидаги муносабатлар топилган:

$$\mu_n = 5,5 \cdot 10^6 T^{-(1,5+2,5)} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}, \text{ кремний учун,}$$

$$\mu_n = 3,5 \cdot 10^7 T^{-1,6} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}, \text{ германий учун.}$$

Киришмалар концентрацияси у қадар юқори бўлмаганда, (10^{15} - 10^{16} см^{-3} атрофида) улар Паракатчанликка сезиларли таъсир кўрсат-майди. Бундан юқорироқ концентрацияларда эса, киришмалар Пара-катчанликни сусайтиради. Ковакларга келсак, уларнинг хона темпе-ратурасидаги Паракатчанлиги кремнийда $430 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, германийда эса $1900 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Температура ортиши билан коваклар Паракат-чанлиги электронларникига қараганда кескинроқ камаяди:

$$\mu_p = 2,4 \cdot T^{-(2,3+2,7)} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}, \text{ кремний учун,}$$

$$\mu_p = 9,1 \cdot 10^8 T^{-2,3} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}, \text{ германий учун.}$$

Позирги замон техникасида ишлатиладиган яримўтказгичлар орасида эркин заряд ташувчиларининг Паракатчанлиги энг юқори бўлганлари бу- $GaAs$ ва $JnSb$ кристалларидир. Уларда электронлар-нинг Паракатчанлиги $9 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ гача боради.

1.9. Яримўтказгичларда эркин заряд ташувчилар статистикасига оид баъзи масалалар

Олдинги мавзуларда биз умумий Полда қандай йўл билан хона температурасида ўтказувчанлик, шунингдек

валент зоналарда элек-тронлар билан коваклар пайдо бўлишини кўриб чиқдик. Яримўтказ-гич орқали ўтаётган элек-трик токининг зичлиги ва шу яримўтказ-гичга берилган кучланиш орасидаги бо-ланишни топиш учун берил-ган шароитдаги электронлар билан коваклар концентрациясини би-лиш зарур.

Электронлар ва коваклар концентрациясининг тегишли миқдо-рий ифодасини топиш учун исботсиз икки қоидали қабул қиламиз. Булардан биринчиси, статистик физикага оид Ферми-Дирак тақси-моти функцияси бўлиб, у Пар қандай ало-ида энергиявий сат-нинг электрон билан тўлиш э-тимоллигини кўрсатади. Квант механика-сидан олинган иккинчи қоида эса, маълум энергиявий оралиқдаги квант Полатлар зичлигини аниқлайди.

Кейинги параграфда биз ўтказувчанлик зонасидаги ва кириш-мавий сат-лардаги электронлар зичлиги, шунингдек, валент зонадаги коваклар зичлигини Ферми сат-и орқали ифодаланувчи муносабат-ларни топамиз.

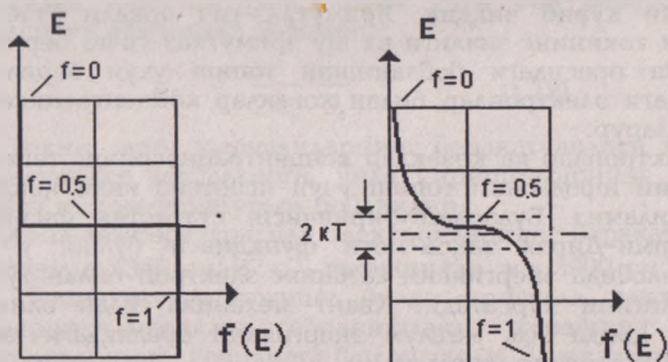
1.9.1. Ферми-Дирак тақсимоти

Юқорида (1.4 да) эслатиб ўтилганидек, мутлақ нол темпера-турада кристаллдаги барча квант Полатлар маълум бир сат-гача электронлар билан эгалланган ва бу сат-дан юқоридаги барча По-латлар бўш (электронлар томондан эгалланмаган) бўлади. Бироқ юқорироқ температураларда баъзи бир электронлар юқори сат-ларга ўтиб уларни эгаллаши учун етарли энергияга эга бўлиб қолишлари мумкин.

Ферми-Дирак тақсимот функцияси энергияси W бўлган сат-нинг электрон билан эгалланган бўлиш э-тимоллигини аниқлайди:

$$f(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}} \quad (1.19)$$

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



1.18-расм. Ферми-Дирак тақсимот функцияси

W_F -энергиявий сат Π Ферми сат Π и деб аталади. Бу шундай сат Π ки, унинг электрон билан тўлиш э Π тимоллиги $1/2$ га тенг, чунки (1.19) ифодага кўра, агар $W = W_F$ бўлса, $f = 1/2$ га тенг. (1.19) ифодага (1.10-расм) асосан 0 K да Ферми сат Π и электрон билан эгалланган Полатларни электрон билан эгалланмаган Полатлардан ажратувчи сат Π дир. Юқори температураларда Ферми сат Π и электрон билан кўпроқ эгалланган Полатларни камроқ эгалланган Полатлардан аж-ратиб туради. Тақсимот функцияси Ферми сат Π ига нисбатан симмет-рик эканлигига ишонч Посил қилиш (1.18-расм) қийин эмас.

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

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

Ферми-Дирак тақсимоти фақат маълум энергиявий сат Π нинг электрон билан эгалланганлиги э Π тимолини кўрсатишини эслатиб ўтамиз.

Динамик мувозанат Полатида электрон ва коваклар иссиқлик-дан уйПониш натижасида узлуксиз равишда Посил бўлиб туради. Шу билан бирга тескари жараён-эркин заряд ташувчиларнинг рекомби-нацияланиб йўқолиши Пам узлуксиз равишда содир бўлиб туради. Шу сабабдан тақсимот функцияси электронлар энергиясининг вақт бўйича ўртача тақсимотини кўрсатади.

1.9.2. Эркин заряд ташувчиларнинг концентрациясини аниқлаш

1.7 га асосан киришма киритиш туфайли вужудга келган қў-шимча квант Полатларни, алоПида дискрет энергиявий сатПлар сифатида қараш мумкин. 1.15 ва 1.17-расмларда бу сатПлар ΔW_d ва ΔW_a лар билан белгиланган. ΔW_d энергиявий квант Полатларининг сони кристаллга киритилган донор атомлар сонига тенг ёки агар 1 см^3 Пажмли кристаллда, ΔW_d сатПдаги квант Полатларнинг зичлиги донор атомлари концентрацияси N_d , см^{-3} га тенг бўлади.

Донор киришма атомларининг баъзилари ионлашган бўлиши, яъни ΔW_d энергиявий сатПдаги электронларнинг баъзилари иссиқ-ликдан уйПониши туфайли ўтказувчанлик зонасига ўтган бўлиши мумкин. Агар n_d электронлар ΔW_d энергиявий сатПдаги ўз квант По-латларини сақлаб қолсалар, яъни донор атомларининг n_d/N_d қисми ионлашмаган Полда қолса, электронлар концентрацияси қуйидаги ифода билан аниқланади:

$$n_d = \frac{N_d}{1 + e^{(\Delta W_d - W_F) / kT}} \quad (1.20)$$

(1.20) тенглама ΔW_d энергиявий сатПдаги донор Полатларидаги электронлар концентрациясини Ферми сатПи ва температура билан боП-лайди.

Хона температурасида германий ва кремний кристали учун Ферми сатПи одатда ΔW_d энергиявий сатПдан бир неча kT қадар пастда жойлашади ва шунинг учун $[(\Delta W_d - W_F) / kT] \gg 1$ бўлади. Шу сабабли маПраждаги 1 сони Писобга олинмаса (1.20) ифода қуйида-гича кўринишда ёзилиши мумкин:

$$n_d = N_d e^{-(\Delta W_d - W_F)/kT} \quad (1.21)$$

(1.21) тенглама донор сатлдаги электрон билан эгалланган Полатлар концентрациясини донор киришманинг концентрацияси- N_d , Ферми сатли- W_F ва мутлақ температура- T билан болайди.

Худди шу тарзда иссиқликдан уйлониши туфайли валеңт зона-дан ΔW_a сатлдаги акцептор Полатга ўтган электронлар концентрацияси n_a Ферми сатли W_F ва мутлақ температура T орқали қуйи-дагича ифодаланиши мумкин:

$$n_a = \frac{N_a}{1 + e^{(\Delta W_a - W_F)/kT}} \quad (1.22)$$

бу ерда, N_a -акцептор атомларнинг концентрацияси.

Ўтказувчанлик зонасидаги электронлар концентрациясини то-пиш нисбатан мураккаброқ масаладир. Ўтказувчанлик зонасидаги квант Полатлар бу зонанинг туби W_c дан тақиқланган зонанинг қоқ ўртаси- $W_{1/2}$ қадар энергиявий оралиқда жойлашган бўлади ва берилган Полатнинг эгалланганлик эҳтимоллиги бир Полатдан бошқа Полатга ўтганда ўзгариб туради.

Бу масалани ечиш учун исботсиз қабул этилган қоидаларнинг иккинчисидан фойдаланамиз: ўтказувчанлик зонасидаги W энергиявий сатл атрофидаги dW энергиявий оралиқдаги квант Полатлар зичлиги $g(W)dW$ қуйидагича муносабат билан ифодаланади:

$$g(W)dW = \frac{8\pi(2m_n^3)^{1/2}}{h^3} \quad (1.23)$$

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

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

(1.19) ва (1.23) тенгламалардан фойдаланиб, ўтказувчанлик зона-сидаги электронлар зичлигини аниқлаш мумкин:

$$n = \int_{W_c}^{W_2} f(W)g(W)dW = \frac{8\pi(2m_n^3)^{1/2}}{h^3} \int_{W_c}^{W_2} \frac{(W - W_c)^{1/2} dW}{e^{(W - W_c)/kT} + 1} \quad (1.24)$$

Агар хона температурасида $W_c - W_F$ энергиявий оралиқ бир неча kT га тенглигини ва W нинг ўсиши билан интеграл тез суръат билан камайишини (чунки кўпчилик электронлар юқорида қайд этилганидек ўтказувчанлик зонасининг тубига яқин жойлашган бўлади) Писобга олсак, (1.24) ифодани соддалаштириш ва қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$n = \frac{8\pi(2m_n^3)^{\frac{1}{2}}}{h^3} \int_{W_c}^{\infty} (W - W_c)^{\frac{1}{2}} e^{-(W - W_c)/kT} dW \quad (1.25)$$

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

$$-n = N_c e^{-(W_c - W_F)/kT} \quad (1.26)$$

бу ерда,

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.27)$$

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

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

Юқоридагига ўхшаш усул билан валент зонадаги коваклар кон-центрацияси, Ферми сатпи ва температура орасидаги болланишни топиш мумкин:

$$p = N_g e^{-(W_F - W_a)/kT} \quad (1.28)$$

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

$$N_g = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.29)$$

m_p -валент зонадаги ковакларнинг самаравий массаси, W_a -валент зо-надаги Полатларнинг самаравий зичлиги дейилади. Бу катталиқ Пам Пар бир яримўтказгич учун маълум

қийматга эга. Масалан, хона тем-пературасида германий учун $W_0 \cong 6,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, кремний учун эса $W_0 \cong 1,02 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эркин заряд ташувчилар концентрацияси n ва p лар-нинг кўпайтмаси Ферми сатпининг Полатига, яъни киришмалар кон-центрациясига боғлиқ эмаслигига эътиборни жалб қилмоқчимиз:

$$np = N_c N_v e^{-(W_c - W_v)/kT} = \text{const} \quad (1.30)$$

У ёки бу киришма яримўтказгичдаги электронлар концентра-циясини оширса, у мос равишда коваклар концентрациясини шунча марта камайтириши ва аксинча, коваклар концентрациясини ошир-са, электронлар концентрциясини шунча марта камайтириши ушбу ифодадан кўриниб турибди.

1.9.3. Яримўтказгичда электрик бетарафлик шарти

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

$$p + N_d^+ = n + N_a^- \quad (1.31)$$

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

Киришмалар концентрацияси Пажм буйлаб бир текис тақсим-ланган бир жинсли яримўтказгичларда бу қоида бутун кристалл учунгина эмас, балки унинг Пар бир кичик Пажмий элементи учун Пам ўринлидир.

1.9.4. Яримўтказгичларда Ферми сатПи Полатини аниқлаш

(1.31) тенгламани яна қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$p + (N_d - n_d) = n + N_g \quad (1.32)$$

Агар (1.20), (1.22) ва (1.28) тенгламаларни (1.31)га қўйилса, Ферми сатҳи Памда температурадан бошқа барча қолган катталик-лар-яримўтказгичнинг тури, киришмаларнинг хили ва концентрация-си билан аниқланишини кўриш мумкин. Демак, W_F катталик температуранинг функцияси сифатида ифодаланиши мумкин. Умуман ол-ганда, (1.31) тенглама трансцендент бўлиб; у график усулда ечилади. Бироқ кўпчилик амалий Полларда маълум содалаштиришларни амалга ошириш ва шу шароитларда W_F ни етарли даражада аниқлик билан топиш мумкин.

1.9.4.1. Хусусий яримўтказгич

Тоza яримўтказгичда N_d , n_d ва N_g нолга тенг ва шунинг учун (1.32) га асосан:

$$p = n \quad (1.33)$$

Бошқа турдаги яримўтказгичларга тегишли катталиклардан фарқли қилиш учун киришмасиз яримўтказгичнинг барча катталик-лари i индекси билан берилади. Шунинг учун киришмасиз яримўт-казгич учун

$$p = p_i, \quad n = n_i, \quad W_F = W_{F_i}.$$

У Полда (1.26) ва (1.28) ларни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$n_i = N_c e^{-(W_c - W_{F_i})/kT} = p_i \quad (1.34)$$

$$p_i = N_g e^{-(W_{F_i} - W_g)/kT} = n_i \quad (1.35)$$

Демак, хусусий яримўтказгичларда Ферми сатҳи ушбу тенгламадан:

$$N_c e^{-(W_c - W_{F_i})/kT} = N_g e^{-(W_{F_i} - W_g)/kT} \quad (1.36)$$

қуйидагича кўринишда топилади:

$$W_{F_i} = \frac{W_c - W_g}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_g}{N_c} \right) \quad (1.37)$$

(1.27) ва (1.29) ифодалардан фойдалансак, W_{F_i} учун шундай муно-сабат оламиз:

$$W_{F_i} = \frac{W_c - W_g}{2} + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{m_p}{m_n}\right) \quad (1.38)$$

Электронлар ва ковакларнинг самаравий массалари деярли тенг бўлгани учун (1.38) ифода киришмасиз яримўтказгичларда Ферми сатПи тақиқланган зонанинг ўртасига жуда яқин ётишини кўрсатади. Шундай қилиб, $m_p = m_n$ деб қабул қилсак, қуйидагича ёзиш мумкин:

$$W_{F_i} = \frac{W_c + W_g}{2} \quad (1.39)$$

(1.30) ва (1.33) ифодалардан қуйидаги муносабатни олиш мумкин эканлигига эътиборни жалб қиламиз:

$$p_i \equiv n_i = (N_c \cdot N_g)^{1/2} e^{-(W_c - W_g)/kT} \quad (1.40)$$

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

1.9.4.2. p-тур яримўтказгич

Агар донорлар концентрацияси N_d акцепторлар концентрация-сидан анча кўп бўлса, (1.31) тенгламада n_a ни Писобга олмаса Пам бўлади. Шунингдек, барча донорлар ионлашган деб фараз қилиш мумкин, чунки хона температурасида германий ва кремний учун бе-малол шундай деб олса бўлади. Бунга қўшимча равишда валент зонадаги коваклар концентрацияси ўтказувчанлик зонасидаги элек-трон(асосий заряд ташувчи)лар концентрациясидан анча кам деб қа-бул қилсак, (1.31) тенглама:

$$n_n \approx N_d \quad (1.41)$$

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

Энди Ферми сатПи учун (1.26) ва (1.41) тенгламалардан қуйи-даги ифодани оламиз:

$$W_{F_c} = W_c - kT \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad (1.42)$$

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

$$p_n = \frac{N_c N_g}{N_d} e^{-(W_c - W_g)/kT} \quad (1.43)$$

1.9.4.3. p -тур яримўтказгич

Агар акцепторлар концентрацияси донорлар концентрацияси-дан катта бўлса, (1.31) тенгламада N_d ва n_d катталикларни Писобга олмаса Пам бўлади. Шунингдек, барча акцепторлар валент зонадан электрон олган, яъни $n_a = N_a$ деб қабул қилсак бўлади. Хона температура-турасида шундай Полат тўлиқ равишда ўринли бўлади. Бунга қў-шимча равишда, валент зонадаги коваклар концентрацияси ўтказув-чанлик зонасидаги электронлар концентрациясидан анча катта деб фараз қилсак, (1.31) тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$p_p \cong N_a \quad (1.44)$$

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

Энди (1.28) ва (1.44) ифодалар ёрдамида Ферми сатлини аниқ-лаш мумкин:

$$W_{F_p} = W_g + kT \ln \left(\frac{N_g}{N_a} \right) \quad (1.45)$$

(1.45) тенгламадан топилган W_{F_p} нинг қийматини (1.26) ифода-га қўйсак, p -тур яримўтказгичдаги ноасосий заряд ташувчилар-элек-тронлар учун қуйидаги муносабатни оламиз:

$$n_p = \frac{N_c N_g}{N_a} e^{-(W_c - W_g)/kT} \quad (1.46)$$

(1.45) ифодадан кўринишича, Ферми сатли n -тур яримўтказ-гичда валент зонанинг шипига яқин жойлашар экан.

$$W_{F_i} = \frac{W_c - W_g}{2} + \frac{3kT}{4} \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right) \quad (1.38)$$

Электронлар ва ковакларнинг самаравий массалари деярли тенг бўлгани учун (1.38) ифода киришмасиз яримўтказгичларда Ферми сатҳи тақиқланган зонанинг ўртасига жуда яқин ётишини кўрсатади. Шундай қилиб, $m_p = m_n$ деб қабул қилсак, қуйидагича ёзиш мумкин:

$$W_{F_i} = \frac{W_c + W_g}{2} \quad (1.39)$$

(1.30) ва (1.33) ифодалардан қуйидаги муносабатни олиш мумкин эканлигига эътиборни жалб қиламиз:

$$p_i \equiv n_i = (N_c \cdot N_g)^{1/2} e^{-(W_c - W_g)/kT} \quad (1.40)$$

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

1.9.4.2. *n*-тур яримўтказгич

Агар донорлар концентрацияси N_d акцепторлар концентрация-сидан анча кўп бўлса, (1.31) тенгламада n_a ни Писобга олмаса Пам бўлади. Шунингдек, барча донорлар ионлашган деб фараз қилиш мумкин, чунки хона температурасида германий ва кремний учун бе-малол шундай деб олса бўлади. Бунга қўшимча равишда валент зо-надаги коваклар концентрацияси ўтказувчанлик зонасидаги элек-трон(асосий заряд ташувчи)лар концентрациясидан анча кам деб қа-бул қилсак, (1.31) тенглама:

$$n_n \cong N_d \quad (1.41)$$

кўринишни олади, бу ерда, "n"-индекс ушбу катталиқ *n*-тур яримўт-казгичга тегишли эканини кўрсатади.

Энди Ферми сатҳи учун (1.26) ва (1.41) тенгламалардан қуйи-даги ифодани оламиз:

$$W_{F_c} = W_c - kT \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad (1.42)$$

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

$$p_n = \frac{N_c N_g}{N_d} e^{-(W_c - W_g)/kT} \quad (1.43)$$

1.9.4.3. p -тур яримўтказгич

Агар акцепторлар концентрацияси донорлар концентрацияси-дан катта бўлса, (1.31) тенгламада N_d ва n_d катталикларни Писобга олмаса Пам бўлади. Шунингдек, барча акцепторлар валент зонадан электрон олган, яъни $n_a = N_a$ деб қабул қилсак бўлади. Хона темпера-турасида шундай Полат тўлиқ равишда ўринли бўлади. Бунга қў-шимча равишда, валент зонадаги коваклар концентрацияси ўтказув-чанлик зонасидаги электронлар концентрациясидан анча катта деб фараз қилсак, (1.31) тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$p_p \cong N_a \quad (1.44)$$

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

Энди (1.28) ва (1.44) ифодалар ёрдамида Ферми сатлини аниқ-лаш мумкин:

$$W_{F_p} = W_g + kT \ln \left(\frac{N_g}{N_a} \right) \quad (1.45)$$

(1.45) тенгламадан топилган W_{F_p} нинг қийматини (1.26) ифода-га қўйсак, p -тур яримўтказгичдаги ноасосий заряд ташувчилар-элек-тронлар учун қуйидаги муносабатни оламиз:

$$n_p = \frac{N_c N_g}{N_a} e^{-(W_c - W_a)/kT} \quad (1.46)$$

(1.45) ифодадан кўринишича, Ферми сатли n -тур яримўтказ-гичда валент зонанинг шипига яқин жойлашар экан.

1.10. Яримўтказгичнинг электрик ўтказувчанлиги

Яримўтказгичда зарядлар ўтказувчанлик электрони ва коваклар кўринишида кўчади. Буни назарда тутсак, яримўтказгич кристалидан ўтган токнинг зичлиги учун қуйидаги ифодани ёзиш мумкин:

$$\vec{j} = e \left(p \vec{\mathcal{G}}_{dp.p} - n \vec{\mathcal{G}}_{dp.p} \right) = e (p \mu_p + n |\mu_n|) \vec{E} \quad (1.47)$$

бу ерда, $\vec{\mathcal{G}}_{dp.p}$ ва $\vec{\mathcal{G}}_{dp.p}$ мос равишда ковак ва электронларнинг май-дон таъсирида олган тезликлари.

Ушбу ифодани дифференциал кўринишда ёзилган Ом қонуни

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

билан солиштириб, яримўтказгичнинг солиштирма электр ўтказув-чанлиги учун қуйидаги муносабатни топамиз:

$$\sigma = e (p \mu_p + n |\mu_n|) \quad (1.48)$$

n -тур яримўтказгичда $n \gg p$ бўлгани учун

$$\sigma_n = en \mu_n \quad (1.49)$$

p -тур яримўтказгичда $p \gg n$ бўлгани учун

$$\sigma_p = ep \mu_p \quad (1.50)$$

бўлади.

(1.47) ифоданинг чап ва ўнг томонларини яримўтказгичнинг кўндаланг юзаси S га кўпайтириб ва

$E = \frac{U}{d}$, $R = \frac{l d}{\sigma S}$ эканлигини назарда тутиб, бир жинсли

яримўтказгичнинг вольт-ампер тавсиф-номаси учун қуйидаги муносабатни оламиз:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.51)$$

яъни, омик туташувли бир жинсли яримўтказгичдан ўтувчи ток кучи кучланишга боғлиқ равишда чизиқий қонун билан ўзгаради.

I Боб бўйича мустақил назорат учун саволлар:

1. Қаттиқ жисмларнинг электрик ўтказувчанликлари Пақида нималар биласиз?

2. Яримўтказгичлар электрик ўтказувчанлигининг ўзига хос ху-сусиятлари нималардан иборат.

3. Яримўтказгич электрик ўтказувчанлигининг температурага боғланиш ифодасини ёзинг.

4. Металлларнинг электрик ўтказувчанлиги Пақида маълумот бе-ринг.

5. Қандай яримўтказгич моддаларни биласиз?

6. Кристалл тузилиш деб нимага айтилади?

7. Кристалл панжара нима?

8. Олмос кристалл панжараси қандай тузилган?

9. Кристалл панжаранинг тугуни деб нимага айтилади?

10. Атомларнинг боғланиш кучлари Пақида маълумот беринг.

11. Кимёвий боғланиш нима?

12. Ковалент боғланиш деб нимага айтилади?

13. Валентлик нима?

14. Кимёвий элементлар даврий тизими ва кимёвий элементлар Пақида нималар биласиз?

15. Ўзаро алмашинув таъсири нима?

16. Пақиқий кристалларнинг идеал кристаллардан фарқи нимада?

17. Нуқсонлар деб нимага айтилади?

18. Нуқтавий нуқсон деб нимага айтилади?

19. Шоттки нуқсони деб нимага айтилади?

20. Вакансия нима? Дивакансиялар нима?

21. Киришмавий нуқсон нима? Френкель нуқсони деб нимага айтилади.

22. Чизипий, сиртий ва Пажмий нуқсонларга мисоллар келти-ринг.

23. Атомнинг электрик хоссалари Пақида маълумот беринг.

24. Паули тамойили нима?

25. Кристалл панжара доимийси деб нимага айтилади? Кристалл ва поликристалл моддаларнинг асосий фарқи нимада?

26. Атомнинг энергиявий сатлари қандай кўринишда тасвирла-нади?

27. Хусусий энергиявий сатларнинг ташқи таъсирлар остида сатларга ажралиш сабабларини тушунтиринг.

28. Тақиқланган зонанинг тузилиши Пақида фикр юритинг.

29. Диэлектриклар қандай хоссаларга эга?

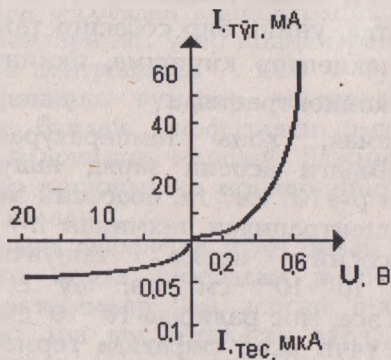
30. Заряд ташувчилар Паракатланганлиги нимани
аънлатади?

31. Хусусий яримўтказгич деб нимага айтилади?

II БОБ. ЭЛЕКТРОН-КОВАК УТИШ

Яримўтказгичнинг физикавий моделини ўрганиш жараёнида кўрсатилганидек, яримўтказгич кристаллари икки тур: донор ки-ришмалар мавжудлиги туфайли вужудга келадиган электрон (n -тур) ва акцептор киришмалар туфайли вужудга келадиган ковак (p -тур) ўтказувчанликка эга бўлиши мумкин.

Бир хил ўтказувчанликка эга бўлган иккита яримўтказгич ора-сидаги контактни кўриб чиқайлик. Бир p -тур ва иккинчиси n -тур ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгичлар ўзаро контактга келтирилса, электрон-ковак ўтиш ёки қисқача қилиб айтилганда, p - n ўтиш йосил бўлади. Ум қонуни ўринли бўлган бир жинсли яримўтказгичлардан фарқли равишда, электрон-ковак ўтиш нозиси-Пий вольт-ампер тавсифномага (2.1-расм) эга бўлади. Ўзининг шу ва бошқа қатор хусусиятларига кўра p - n ўтиш ҳозирги замон кўпчилик яримўтказгич асбоблар-диодлар, биқутбий ва майдоний транзистор-лар, динистор, тиристор, ёрулик қабул қилгич ва бошқаларнинг ишлаш тамойилларига асосланади.



2.1-расм. Электрон-ковак ўтишнинг вольт-ампер тавсифномаси

Ўз-ўзидан равшанки, p - n ўтиш йосил қилиш учун яримўтказгичларни оддий механик контактга келтиришнинг ўзи кифоя қил-майди. Бунинг учун яримўтказгич яхлит

кристалда p - ва n -соПалари оралиПида етарли даражада кескин чегара мавжуд бўлган тузилма олишни таъминловчи мураккаб технология зарурдир.

2.1. Электрон-ковак ўтишининг Посил бўлиши

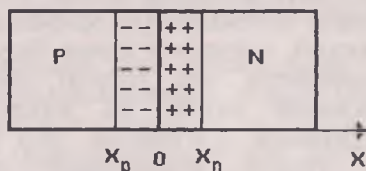
p - n ўтиш Посил бўлишида юзага келадиган физик жараёнларни кўриб чиқайлик. Фараз қилайлик, яримўтказгичнинг p - ва n -соПалари $x=0$ текислик билан ажралган бўлсин (2.2-расм). Чап со-Пада асосан акцептор киришмалар бўлиб, у ковак ўтказувчанликка, ўнг соПада эса, асосан донор киришмалар бўлиб, у электрон ўтказувчанликка эга бўлсин. $x=0$ текисликда контакт бўлмаган шаро-итда p - ва n -соПалардаги коваклар ва электронлар концентрацияси бир-биридан кескин фарқ қилади: p -соПадаги коваклар концентра-цияси уларнинг n -соПадаги концентрациясига қараганда анча кўп, n -соПадаги электронларнинг концентрацияси уларнинг p -соПадаги кон-центрациясидан анча кўп бўлади.

Масалан, яримўтказгич модда сифатида хусусий кремний крис-тали ишлатиладиган бўлса, p - n ўтиш Посил қилиш учун, одатда, унинг бир соПасига тахминан $N_a \cong 10^{17} \text{cm}^{-3}$ концентрацияда акцептор киришма, иккинчи соПасига эса, $N_d \cong 10^{15} \div 10^{16} \text{cm}^{-3}$ концентрацияда донор киришма киритилади. Демак, хона температураси ($T=300 \text{ K}$) шароитида p -соПадаги асосий заряд ташувчилар-коваклар кон-центрацияси $p = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ га, ноасосий заряд ташувчилар-электронлар концентрацияси тахминан $n = 10^{13} \text{cm}^{-3}$ га тенг, n -соПадаги асосий заряд ташувчилар-электронлар концентрацияси $10^{15} - 10^{16} \text{cm}^{-3}$ га, шу соПадаги коваклар концентрацияси эса, мос равишда $10^5 - 10^4 \text{cm}^{-3}$ га тенг бўлади. p - n ўтиш олиш учун асос сифатида германий олина-диган бўлса, бу катталикларнинг сон қиймати куйидагича бўлади: $p_p = 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $n_p = 10^9 \text{cm}^{-3}$; $n_n = 10^{15} \text{cm}^{-3}$, $p_n = 10^{11} \text{cm}^{-3}$.

Асосий ва ноасосий заряд ташувчилар концентрациялари нима учун шундай сон қийматларига эга эканлигини билиш учун, тегишли яримўтказ-гич учун берилган температурада уларнинг кўпайтмаси ўзгармас кат-талиikka тенг эканлигини, яъни $n_p \cdot p_p = p_n \cdot n_n = n_i^2$ эканлигини эсланг. Маълумки (1.9.4-§га

қаранг), кремний учун $n_i = 2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ га, герма-ний учун эса $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

Келтирилган мисоллардан кўринишича, P кремний, P гер-ма ний бўлсин, p - ва n -соПалардаги коваклар концентрацияси ва шу соПалардаги электронлар концентрацияси ўзаро кескин-кремний учун 10^{11} - 10^{12} марта, германий учун эса 10^6 марта фарқ қилади. p - ва n -соПалардаги заряд ташувчилар концентрациясининг бундай фарқи, заряд ташувчиларнинг иссиқлик Паракати натижасида содир бўладиган диффузия жараёнини-ковакларнинг, уларнинг concentra-



2.2-расм. p - n ўтишда зарядларнинг жойлашиши

цияси кўп бўлган p -соПадан концентрацияси кам бўлган n -соПага ва электронларнинг, улар концентрацияси кўп бўлган n -соПадан кон-центрацияси кам бўлган p -соПага диффузиявий ўтишини вужудга келтиради. Коваклар ва электронларнинг бундай диффузияси p -соПа-да акцептор киришмалар ионларининг манфий Пажмий зарядини, n -соПада эса, донор киришмалар ионларининг мусбат Пажмий зарядини Посил қилади.

Ундан ташқари диффузия йўли билан мос равишда p -соПадан n -соПага Памда n -соПадан p -соПага оқиб ўтган коваклар ва электрон-лар Пам асосан p - n ўтиш соПасига мужассамлашган. Ана шу айтил-ган зарядлар иккала соПа чегарасидаги юпқа қатламларда-Пажмларда (2.2-расмга қаранг) жойлашади. Шунинг учун уларни Пажмий заряд-лар деб атайдилар. Бундай Пажмий зарядлар n -яримўтказгичдан p -яримўтказгичга қараб йўналган электрик майдонни вужудга келти-ради. Бу майдон асосий заряд ташувчиларнинг бир соПадан иккинчи соПага диффузия йўли билан ўтишига қаршилик қилади (буни кў-риш қийин эмас) ва ноасосий заряд ташувчиларнинг дайдиш токи-ни-

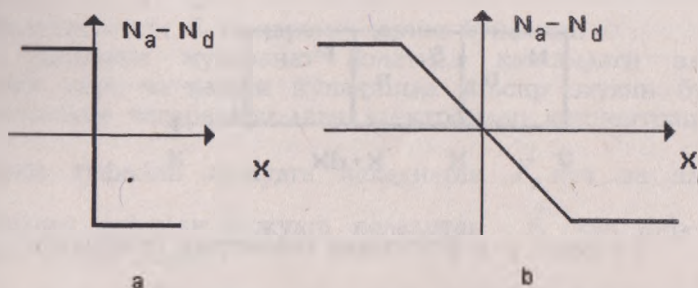
электронларнинг p -сопадан n -сопага ва ковакларнинг p -сопадан p -сопага кўчишини вужудга келтиради. Майдон Пали етарли даража-да катта бўлмаган Полларда электрон ва коваклар диффузияси ва иккиламчи қатлам зарядининг ортиши давом этади. Бу жараён заряд ташувчилар диффузияси ва дайдиши ўртасида мувозанат юзага келгунча давом этади. Бунда диффузиявий тоқлар нолга айланмайди, балки уларнинг таъсири дайдиш тоқлари туфайли бетарафлашади, шунинг учун бу мувозанат динамик мувозанат деб аталади. Ушбу Полатга Пажмий заряд қатламининг маълум кенглиги, ички электрик майдоннинг аниқ қиймати мос келади. Шундай қилиб, p - ва n -со-Палар орасида, яъни Пажмий зарядлар қатламларининг чегаралари орасида маълум потенциаллар фарқи вужудга келади. У p -п ўтиш-даги контакт потенциаллар фарқи деб аталади.

Шундай қилиб, электрон-ковак ёки p -п ўтиш бу турли хил ўт-казувчанликка эга бўлган иккита яримўтказгич чегарасида Пажмий заряд ва ички электрик майдон жойлашган қатламдир. 2.2-расмда p -п ўтиш тузилмаси ва унинг Посил бўлиш жараёнлари кўрсатилган. Унда координата боши $x = 0$ ўтишнинг технологик чегарасига жойлашган. $x = -x_p$ ва $x = x_n$ координаталар эса, мос равишда ўтиш-нинг p - ва n -соПалардаги чегараларини ифодалайди.

2.2. p -п ўтиш турлари

Юқорида таъкидлаганимиздек, аксари кўпчилик яримўтказгич асбобларнинг ишлаш тамойили асосида электрон-ковак ўтишнинг хусусиятлари ётади. Бу хусусиятлардан асосийси p -п ўтиш электрик ўтказувчанлигининг тўпри ва тескари йўналишларда (p -п ўтиш элек-трик занжирга тўпри ва тескари уланганда) турлича эканлигида бўлиб, у кўп жиПатдан p - ва n -соПалар орасидаги чегаравий қатлам кенглигига боқлиқдир.

Агар киришмалар концентрациясининг ўзгариши асосан p -п ўтиш кенглигига нисбатан кичикроқ масофада юз берса, ўтиш кес-кин Писобланади. Бунда киришмалар концентрацияси 2.3а-расмда кўрсатилганидек деярли сакраб ўзгаради. Бошқа хил p -п ўтишларда киришмалар концентрацияси аста-секин силлиқ (2.3б-расм) ўзгаради. Шунинг учун уларнинг тўприлаш хусусияти яхши бўлмайди.

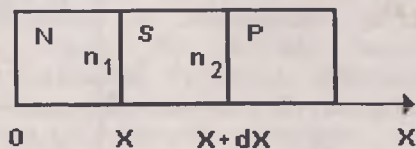


2.3-расм. p - n ўтиш (а-кескин ўтиш; б-силиқ ўтиш)да киришмалар концентрациясининг тақсимоти

Ўтишлар, шунингдек, p - n соПалардаги асосий заряд ташувчилар концентрацияларининг ўзаро нисбатига қараб Пам турларга ажрати-лади. Бунда n - ва p -соПалардаги асосий заряд ташувчилар концен-трациялари бир хил бўлган симметрик ўтишларга Памда n - ва p -со-Палардаги асосий заряд ташувчилар концентрациялари турлича ($p \gg n$ ёки $n \gg p$) бўлган носимметрик ўтишларга ажралади. СоПалар-даги асосий заряд ташувчилар концентрацияси бир-биридан бир не-ча тартибга (масалан, $10^2 \div 10^3$ марта) фарқ қилувчи ўтишлар энг кўп қўлланилади.

2.3. Мувозанатдаги электрон-ковак ўтишда потенциал ва эркин заряд ташувчилар концентрацияси тақсимо-лари орасидаги боПланиш. Контакт потенциаллари фарқи

2.1-§ да кўрилган физик жараёнларни миқдорий муносабат би-лан ифодалайлик. Фикран p - n ўтишда координатлари x ва $x+dx$ бўлган текисликлар орасига жойлашган чексиз юпқа dx қатламни ажратиб (2.4-расм) олайлик. Шу қатламга жойлашган электрон ва ковак газларининг Пар бирига таъсир қилаётган диффузиявий ва электрик кучларни кўриб чиқайлик.



2.4-расм. p-n ўтишнинг геометрик тузилмаси

Агар ушбу қатламдаги электронларга, жумладан, электрон гази туфайли чап томонидан P_1 ва ўнг томонидан P_2 босим таъсир қили-шини ва газ-кинетик назарияга кўра $P_1 = n_1 kT$ ва $P_2 = n_2 kT$ (бу ерда, n_1 ва n_2 электронларнинг қатлам чегараларидаги концентрацияси) эканлигини назарда тутсак, унга таъсир этаётган босимлар фарқи учун

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (n_1 - n_2)kT = kT \frac{dn}{dx} \quad (2.1)$$

муносабатни оламиз. dx қатламга босимлар фарқи туфайли таъсир этувчи куч (ёки диффузиявий куч) эса

$$\vec{F}_p = -kT \left(\frac{dn}{dx} \right) S dx \quad (2.2)$$

га тенг бўлади. Бу ерда, S -газ қатлами чегарасининг юзаси. Ифода-даги "-" ишора кучнинг электронлар концентрацияси градиенти век-торига қарама-қарши, яъни электронлар концентрацияси кўп бўлган n -сола томондан уларнинг концентрацияси кам бўлган p -сола томон-га йўналганини кўрсатади.

Кўриляётган қатламдаги электронлар заряди

$$\Delta Q = -enES dx \quad (2.3)$$

га тенг эканлигини эътиборга олсак, бу зарядга p - n ўтишдаги ички электрик майдон томонидан таъсир этувчи куч

$$\vec{F}_E = -enE S dx \quad (2.4)$$

муносабат билан аниқланади. Бу ерда, n ва E мос равишда қатлам-даги электронлар концентрацияси ва электрик майдон кучланганли-ги.

(2.4) ифодадан кўринишича, \vec{F}_E куч ички майдон
вучланганли-ги \vec{E} га қарама-қарши йўналган.

Динамик мувозанат Полатида қатламдаги электрон
газига қара-ма-қарши йўналишда таъсир этувчи бу икки
куч қатлам чегаралари-даги электронлар концентрациялари
фарқи туфайли вужудга келади-ган \vec{F}_p куч ва электрик
майдони туфайли вужудга келадиган \vec{F}_E куч бир-бирига
тенг бўлади. Яъни,

$$\vec{F}_p = \vec{F}_E \quad (2.5)$$

(2.2) ва (2.4) ифодаларни (2.5) га қўйсак ва $\vec{E} = -\frac{dU}{dx}$
эканлигини Пи-собга олсак, 'қуйидаги муносабатга келамиз:

$$\frac{dn(x)}{n} = -\frac{e}{kT} dU(x) \quad (2.6)$$

НиПоаят, бу дифференциал тенгламани ечиб

$$n(x) = C_1 e^{\frac{-eU(x)}{kT}} \quad (2.7)$$

ни оламиз.

Юқоридагига ўхшаш йўл билан қатламдаги коваклар
концен-трацияси учун

$$p(x) = C_2 e^{\frac{-eU(x)}{kT}} \quad (2.8)$$

ни топамиз.

(2.7) ва (2.8) ифодалардаги интеграллаш доимийларини
аниқ-лаш учун чегаравий шартлардан фойдаланамиз. Бир
жинсли p -сола-да, яъни x нуқтада ва ундан чапда майдон
потенциали нолга тенг эканлигини эътиборга олсак. Бу
чегаравий шартларни

$$x \leq x_p \text{ да } U = 0, \quad n = n_p, \quad p = p_p$$

кўринишда ёзиш мумкин.

У Полда $C_1 = n_p$ ва $C_2 = p_p$ бўлади.

Демак,

$$n(x) = n_p e^{\frac{-eU(x)}{kT}} \quad (2.9)$$

$$p(x) = p_p e^{\frac{-eU(x)}{kT}} \quad (2.10)$$

га тенг бўлади.

Шундай қилиб, p - n ўтишнинг исталган нуқтасидаги эркин заряд ташувчилар концентрацияси ва майдон потенциаллари ўзаро экспоненциал боғланишда бўлар экан.

Ёки (2.9) ва (2.10) ифодаларни қуйидагича ёзишимиз Пам мумкин:

$$U(x) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_p}{n_n} \quad (2.9')$$

$$U(x) = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_n}{p_p} \quad (2.10')$$

(2.9') ва (2.10') муносабатлар p - n ўтишнинг Пар қандай Пажмий элементи учун ўринли бўлгани сабабли уларни электронлар ва ковалентлар концентрациялари n_n ва p_p бўлган бир жинсли n -сопа учун қўллаб бу сопа потенциаллари фарқи ва, бинобарин, p - n ўтишдаги контакт потенциаллари фарқи U_k учун

$$U_k = 0 - U(x_n) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n} \quad (2.11)$$

ифодани топамиз. Бу ерда U_k p - n ўтиш чегаралари орасидаги контакт потенциаллари фарқи.

Агар $n_p \cdot p_p = p_n \cdot n_n = n_i^2$ Памда $n_n = N_g$ ва $p_p = N_a$ эканлигини эсласак (1.9.4 ва қаранг), (2.11) ни қуйидагича ёзишимиз мумкин:

$$U_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_g}{n_i^2} \quad (2.12)$$

Демак, p - n ўтишдаги контакт потенциаллари фарқи ўтиш сопаси воситасида ажратилган бир жинсли яримўтказгич сопаларидаги бир турдаги эркин заряд ташувчилар концентрациялари нисбатининг натурал логарифмига муганосиб экан. Ёки p - n ўтишдаги U_k контакт потенциаллари фарқи шу ўтишнинг икки томонидаги донор ва акцептор киришмалар концентрациялари кўпайтмасининг берилган яримўтказгичдаги хусусий эркин заряд ташувчилар концентрацияси квадратига нисбатининг натурал логарифмига муганосиб экан.

Ушбу ифодадан кўринишича, U_k контакт потенциаллар фарқи p - n ўтиш тайёрланган яримўтказгич хилига, яъни ΔW , N_c , N_v -ларга, киришмалар концентрациялари ва температурага боғлиқ бўлади.

$N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_g = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ бўлган кремний асосида олинган ўтиш учун хона температураси ($T = 300 \text{ К}$) шароитида $U_k = 0,72 \text{ В}$ ни ташкил этади. Киришмалари концентрацияси шундай қийматларга эга бўлган германий асосида тайёрланган p - n ўтиш учун эса, $T = 300 \text{ К}$ да бу катталиқ $U_k = 0,28 \text{ В}$ бўлади.

2.4. Кескин p - n ўтишда киришмалар концентрацияси, Пажмий заряд зичлиги, электрик майдон кучланган-лиги ва потенциали, эркин заряд ташувчилар концентрацияси

Энди ўзининг афзалликлари туфайли амалиётда кенг қўлланиладиган кескин носимметрик p - n ўтишнинг хусусиятлари билан та-нишайлик. Юқорида қўйилган масалаларни Пал этишни осонлаш-тириш мақсадида бундай ўтиш учун киришмалар концентрацияси тақсимоти "зинасимон" кўринишга эга, яъни

$$x \leq 0 \text{ да } N_a(x) = N_a = \text{const}, N_g = 0$$

$$x \geq 0 \text{ да } N_g(x) = N_g = \text{const}, N_a = 0 \quad (2.13)$$

деб (2.5-расмга қаранг) Писоблаймиз.

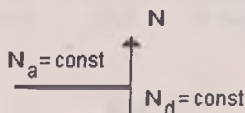
У Палда p - n ўтишнинг координаталари x бўлган ихтиёрий қат-ламидаги Пажмий заряд зичлигини қуйидагича ифодалаш мумкин.

$$\rho(x) = e[(N_g^+ - N_a^-) + (p(x) - n(x))] \quad (2.14)$$

Агар одатдаги температураларда киришма атомларининг деяр-ли барчаси ионлашган бўлишини, яъни $N_g^+ = N_g$, $N_a^- = N_a$ эканлигини назарда тутсак, (2.14) ифода ушбу кўринишга келади:

$$\rho(x) = e[(N_g - N_a) + (p(x) - n(x))] \quad (2.15)$$

(2.14) ва (2.15) ифодаларда $n(x)$ ва $p(x)$ p - n ўтиш Посил бўлишида диффузия жараёни туфайли p -соПлага ўтган электронлар ва n -соПлага ўтган коваларнинг ихтиёрий



қатламдаги концентрациялари эканли-гини эслатиб ўтамиз.

2.5-расм. p - n ўтишдаги киришмалар концентрациясининг "зинасимон" тақсимоти

Улар учун ўринли бўлган (2.9) ва (2.10) ифодалардан фойдаланиб, Пажмий заряд зичлиги учун қуйидаги натижавий муносабатни оламиз:

$$\rho(x) = e \left[(N_g - N_a) + p_p e^{-\frac{eU(x)}{kT}} - n_p e^{\frac{eU(x)}{kT}} \right] \quad (2.16)$$

(2.16) ифодадаги $p_p e^{-\frac{eU(x)}{kT}}$ катталиқ x нинг $x=0$ дан $x=x_n$ томон ортиши билан жуда тез камаяди. Худди шундай

мулоқазат $n_p e^{\frac{eU(x)}{kT}}$ катталиқ учун Пам ўринли бўлади. Шунинг учун p - n ўтишнинг технологик чегарасидан бироз чапроқ ва ўнгроқ қатлам-лардан бошлабоқ $n(x) \ll N_a$ ва $p(x) \ll N_g$ деб Писоблаш яъни, хара-катчан заряд ташувчилар концентрациясини эътиборга олмаслик мумкин. У Полда (2.16) ифодани соддалаштириш ва қуйидагича

$$\rho(x) = e(N_g - N_a) \quad (2.17)$$

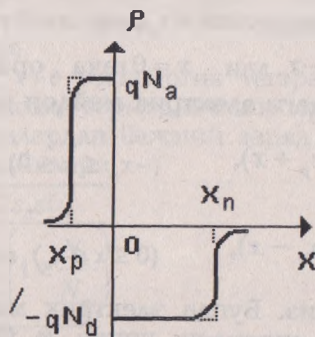
ёзиш мумкин. Бу Полда p - n ўтишдаги электрик майдон кучланган-лиги ва потенциални Писоблаш бирмунча осонлашади.

2.6-расмда узлукли чизиқ билан кескин носимметриқ p - n ўтишдаги (2.17) ифодага кўра Писобланган Пажмий заряд зичлиги-нинг тақсимоти тасвирланган. p - n ўтишнинг p -ва n -собалардаги қат-ламларида аслида Паракатчан заряд ташувчилар-электронлар ва ко-вакларнинг мавжудлиги тугайли $\rho(x)$ амалда узлуксиз чизиқ кў-ринишида бўлади.

Физика курсидан маълумки, электрик майдон потенциали тақ-симоти

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (2.18)$$

кўринишидаги Пуассон тенгламасини тегишли чегаравий шартлар ёрдамида ечиш орқали топилади.



2.6-расм. Кескин носимметрик p - n ўтишдаги Пажмий заряд зичлигининг тақсимоти

Ушбу ифодада ϵ_0 -электрик доимий; ϵ -эса, мухитнинг нисбий диэлек-трик доимийсидир.

p - n ўтишдаги потенциал тақсимоти масаласи кўрилатган биз-нинг Полда (2.18) тенглама $x \leq 0$ ва $x \geq 0$ соПалар учун ўринли бўл-ган иккита тенгламага ажралади. Агар Пажмий заряд зичлиги $\rho(x)$ ни (2.17) муносабат орқали аниқлаш мумкин деб Писобласак, уларни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = \frac{e}{\epsilon_0\epsilon} N_d \quad (x < 0 \text{ соПа учун}) \quad (2.19)$$

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{e}{\epsilon_0\epsilon} N_a \quad (x > 0 \text{ соПа учун}) \quad (2.20)$$

Агар зарядларнинг бетарафлик шарти бажариладиган бир жинсли p - ва n -соПаларда электрик майдон мавжуд эмаслигини ва $-x_p$ дан чаПда ва x_n дан ўнг соПада майдон потенциалининг 2.3-§ да қайд этилган қийматларини назарда тутсак, бу тенгламаларнинг ечимлари

$$x < -x_p \text{ да } U = 0, \quad x \geq x_n \text{ да } U = U_k,$$

$$x < -x_p \text{ да, } E = -\frac{dU}{dx} = 0, \quad x \geq x_n \text{ да, } E = 0 \quad (2.21)$$

чегаравий шартларни қаноатлантириши ва ўз-ўзидан равшанки, уларнинг p - n ўтишдаги узлуксизлиги

мулопазаларига кўра $x=0$ тех-нологик чегарада ўзаро тенг бўлиши зарурдир.

(2.19) тенгламани $x < -x_p$ дан $x=0$ гача оралиқда, (2.20)

тенг-ламани $x < -x_p$ дан $x=0$ гача оралиқда интеграллаб, тегишли сопа-лардаги электрик майдон кучланганлиги учун

$$E(x) = -\frac{e}{\epsilon_0 \epsilon} N_a (x_p + x), \quad (-x_p \leq x \leq 0) \text{ сопада} \quad (2.22)$$

$$E(x) = -\frac{e}{\epsilon_0 \epsilon} N_g (x_n - x), \quad (0 \leq x \leq x_n) \text{ сопада} \quad (2.23)$$

ифодаларни оламиз. Бунда электрик майдон кучланганлиги қиймат-ларининг ишораси унинг x ўқиға қарама-қарши, яъни n -сопадан p -сопа томон йўналганлигини кўрсатади.

(2.22) ва (2.23) ифодалардан кўринадики, кескин p - n ўтишдаги электрик майдон кучланганлиги p - ва n -сопаларнинг Пар бири чизи-Пий қонун билан ўзгариб, унинг мутлақ қиймати ўтишнинг техноло-гик чегараси томон ортиб боради ва ўзининг энг катта

$$|E(0)| = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon} N_a x_p \text{ ва } |E_{\max}| = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon} N_g x_n$$

қийматларига эришади.

$x=0$ да бу ечим айнан бир хил бўлиши заруриятдан уларни ўзаро тенглаштириб, қуйидаги мушум хулосаға келамиз:

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_a}{N_g} \quad (2.24)$$

яъни, кескин p - n ўтишнинг p - ва n -сопалардаги Пажмий заряд қат-ламларининг кенглиги, шу сопалардаги киришмалар концентрация-сига тескари мутаносиб бўлади.

(2.22) ва (2.23) ифодаларни юқорида қайд этилган оралиқда интеграллаб p - n ўтишда потенциал тақсимот учун

$$U(x) = \frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon} N_a (x_p + x_n)^2, \quad (-x_p \leq x \leq 0) \text{ сопада} \quad (2.25)$$

$$U(x) = U_k - \frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon} (x_n - x)^2, \quad (0 \leq x \leq x_n) \text{ сопада} \quad (2.26)$$

муносабаталарни оламиз.

Демак, кўрилатган x текисликдаги майдон потенциали шу те-кислик билан Пажмий заряд соПасининг тегишли чегараси орасидаги масофага боПлиқ равишда квадратик қонун билан ўзгаради.

Потенциалнинг $x=0$ технологик чегарасида узлуксизлик шар-тидан фойдалансак, термодинамик мувозанат Полатида (2.25) ва (2.26) ифодалардан Пажмий заряд соПасининг p - ва n -соПалардаги қалинликлари

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon U_k}{eN_a\left(1 + \frac{N_a}{N_g}\right)}} \quad (2.27)$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon U_k}{eN_g\left(1 + \frac{N_g}{N_a}\right)}} \quad (2.28)$$

ва p - n ўтишининг тўла кенглиги

$$\delta_0 = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon U_k}{e} \cdot \frac{N_a + N_g}{N_a N_g}} \quad (2.29)$$

ни топиш имкониятини беради.

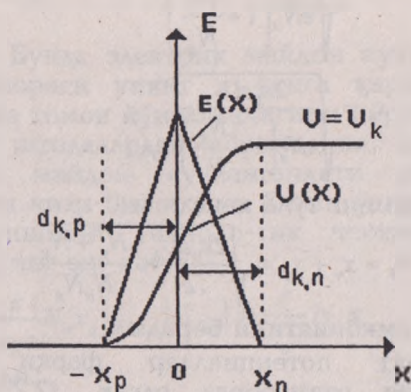
Контакт потенциаллар фарқи U_k учун (2.12) муносабатни эъти-борга олсак, (2.27), (2.28) ва (2.29) ифодалар x_p, x_n ва δ_0 катта-ликларнинг қийматлари p - n ўтиш учун асос қилиб олинган модда-нинг табиатига, бир жинсли p - ва n -соПалардаги киришмалар кон-центрацияси ва температурага боПлиқ эканлигидан далолат беради.

Масалан, кремний асосидаги p - n ўтиш учун ($\varepsilon=12$) акцептор ва донор киришмаларнинг концентрациялари мос равишда $N_a=10^{17}$ см⁻³ ва $N_g=10^{17}$ см⁻³ га тенг деб Писобласак, хона температураси шаро-итида $x_p=1,28 \cdot 10^{-2}$ мкм $x_n=1,23$ мкм ва $\delta_0 \cong 2,26$ мкм ни оламиз. Ди-электрик доимийси $\varepsilon=16$ бўлган германийдан тайёрланган p - n ўтиш учун Пажмий заряд қатламларининг алоПида ва йиПинди қалинлик-лари $x_p=0,8 \cdot 10^{-2}$ мкм, $x_n=0,77$ мкм ва $\delta_0 \cong 0,78$ мкм га тенг бўлади. 2.7-расмда p - n ўтишда камбаПаллашган соПаларнинг қалинликлари d_{kn} ва d_{kp}

электрик майдон кучланганлиги ва потенциалнинг тақсимои кўрсатилган.

(1.20) ва (1.21) ифодаларни (1.7) ва (1.8)ларга қўйсақ, p - n ўтишда эркин заряд ташувчилар-электронлар ва коваклар концен-трациялари тақсимои учун x_1 нинг ошкора функцияси сифатида қу-йидаги жуфт муносабатларни оламыз:

$$n(x) = n_p \exp \left\{ \frac{e}{kT} \left[\frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon} N_a (x_p + x)^2 \right] \right\}, \quad (-x_p \leq x \leq 0 \text{ соха учун}) \quad (2.30)$$



2.7-расм. p - n ўтишда камбағаллашган сопадар қалинликлари, электр майдон кучланганлиги ва потенциал тақсимои

$$p(x) = p_p \exp \left\{ \frac{e}{kT} \left[\frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon} N_a (x_p + x)^2 \right] \right\}$$

$$n(x) = n_p \exp \left\{ \frac{e}{kT} \left[U_k - \frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon} N_a (x_n - x)^2 \right] \right\}, \quad (0 \leq x \leq x_n \text{ соха учун}) \quad (2.31)$$

$$p(x) = p_p \exp \left\{ \frac{e}{kT} \left[U_k - \frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon} N_a (x_n - x)^2 \right] \right\}$$

ўз-ўзидан равшанки, 1- ва 2-жуфт ифодалар $x=0$ да ўзаро тенг бў-лишлари керак.

Юқорида келтирилган муносабатлардан кўринадики, эркин за-ряд ташувчилар концен-трациялари p - n ўтишда x координата бўйича жуда кескин ўзгаради.

2.5. Термодинамик мувозанат Ҷолатдаги p - n ўтишининг энергиявий диаграммаси

Биз I-бобда p - ва n -биржинсли яримўтказгичларнинг энергия-вий диаграммалари билан танишган эдик. Энди ана шундай яримўт-казгичлардан ташкил топган p - n ўтишининг энергиявий диаграммаси-ни кўриб чиқамиз. Бу масалани Ҷалатишда термодинамиканинг ик-кинчи қонунига асосланамиз. Ушбу қонунга кўра, термодинамик му-возанат Ҷолатида Ферми сатҳи p - n ўтишининг Ҷамма Ҷажмий эле-ментларида биржинсли p - ва n -соҶаларда ва p - n ўтиш соҶасида Ҷам бир хил бўлиши лозим. Бошқача айтганда, Ферми сатҳи энергиявий диаграмманинг x ўқиға параллел тўпри чизиқ билан тасвирланади.

Ферми сатҳига нисбатан иккала (n - ва p -) соҶаларда Ҷам энер-гиявий зоналарнинг ва зоналар чегараларининг жойлашиши мут-тасил бўлганлиги сабабли Ҷамда Ферми сатҳининг энергияси бутун p - n тузилма бўйлаб ўзгармаганлиги сабабли p - ва n -соҶаларнинг валент ва шунингдек ўтказувчанлик зоналари бир-бириға нисбатан $\Delta W = W_{Fn0} - W_{Fp0}$ га силжиган (2.8-расм) бўлиши керак.

p - n ўтишда диффузия ва дайдиш Ҷодисаларининг динамик му-возанатдалиги шартидан қуйидаги хулоса келиб чиқади. Электрон-ларнинг, худди шунингдек ковакларнинг Ҷам p - ва n -соҶалардаги энг кичик энергияларининг фарқи $W_{cn} - W_{cp}$ контакт потенциаллар фар-қи eU_k га тенг бўлиши керак (бу 2.8-расмдан яққол кўриниб туриб-ди), яъни

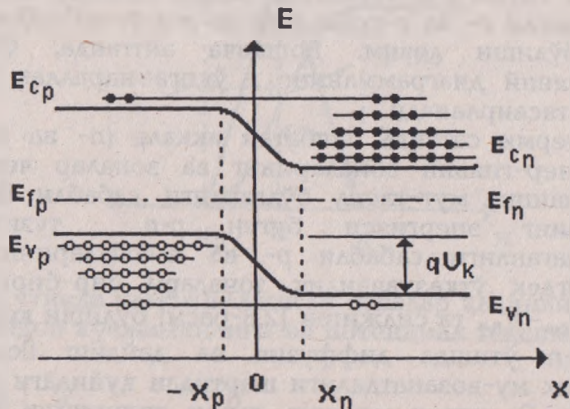
$$W_{cn} - W_{cp} = W_{gn} - W_{gp} = W_{Fn0} - W_{Fp0} = eU_k \quad (2.32)$$

$x = -x_p$ да $\Delta W_c = 0$ га, $x = x_n$ да $\Delta W_c = -eU_k$ га тенг эканлигини эъти-борға олсак, p - n ўтикнинг p - ва n - биржинсли соҶалари энергиявий чегаралари W_{cp} ва W_{cn} , W_{up} ва W_{un} лар орасида eU_k га тенг фарқ вужудға келишини (2.8-расм) кўрамиз.

Ана шу энергиявий фарқ электронларнинг p-сопадан p-сопага ва ковакларнинг p-сопадан n-сопага юқорида айтганимиздек концентрация градиенти туфайли юзага келадиган диффузиялаиб ўтиб туришига тўсқинлик қила бошлайди.

Шундай қилиб, p-n ўтик сопасида ноасосий заряд ташувчилар учун баландлиги eU_k га тенг бўлган энергиявий тўсиқ (анъанага кўра, уни потенциал тўсиқ деб юритилади) вужудга келади.

Энди, юқорида баён этилган мулохазалар асосида p-n ўтиқдаги термодинамик мувозанат Полатини энергиявий жиПатдан таПлил этайлик. n-сопада электронлар асосий заряд ташувчилар бўлиб,



2.8-расм. Термодинамик мувозанат Полатдаги p-n ўтиқнинг энергиявий диаграммаси.

уларнинг умумий концентрацияси n_n га тенг. Бироқ, электронларнинг энергиявий сатПлар бўйича тақсимооти Максвелл-Больцман қо-нуниятига бўйсунушини ва бунда ихтиёрий W энергияли электронлар концентрацияси

$n(W) = n_n e^{-\frac{W}{kT}}$ га тенг эканлиги-ни назарда тутсак, бу электронларнинг Паммаси Пам p-n ўтиш соПа-сидаги энергиявий тўсиқни енгиб ўтишга қодир эмаслиги маълум бўлади.

n -сопада кинетик энергиясининг қиймати eU_k дан катта, би-нобарин, ўзининг бетартиб Паракати жарёнида p -сопага ўта олиши мумкин бўлган электронлар концентрацияси атиги

$$n_{(eU_k)} = n_n e^{\frac{eU_k}{kT}} \quad (2.33)$$

ни ташкил этади.

p -сопада электронлар ноасосий заряд ташувчилар бўлиб, улар-нинг умумий концентрацияси n_p га тенг. Ўзларининг энергиявий По-латларига кўра, бу электронларнинг барчаси бетартиб Паракати жа-рёнида n -сопага ўта оладилар.

Термодинамик мувозанат Полатида вақт бирлиги ичида n -сопа-дан p -сопагага ва аксинча, p -сопадан n -сопага ўтадиган электрон-ларнинг сони ўзаро тенг бўлиши зарур. Ўтишлар сонининг элек-тронлар концентрациясига мутаносиб эканлигини Писобга олсак,

$$n_p = n_n e^{\frac{eU_k}{kT}} \quad (2.34)$$

муносабатни оламиз.

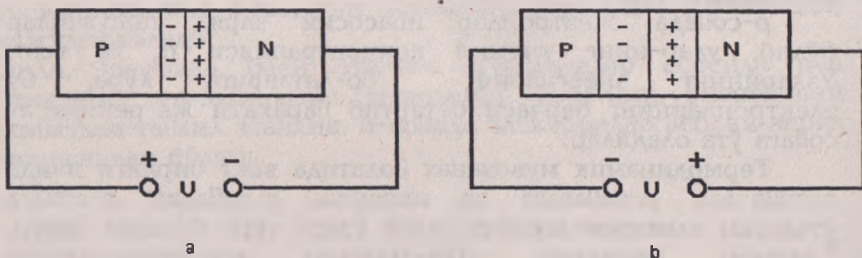
Шу ўринда, бу ифоданинг термодинамик мувозанат Полатидаги p - n ўтишдаги физикавий жараёнларни миқдорий таПлил этиш пай-тида олинган (2.9) ифода билан бир хил эканлигига эътиборингизни жалб этамиз.

Юқорида баён этилган мулоПазалар коваклар учун Пам ўринли бўлиб, худди шундай eU_k га тенг баландликдаги энергиявий тўсиқ, энергиясининг қийматлари етарли даражада бўлмаган ковакларнинг p -сопадан n -сопага ўтишига тўсқинлик қилади ва уларнинг бетартиб Паракати жараёнида p - n ўтиш орқали қарама-қарши йўналишларда ўтишлари сони билан мувозанатланади.

Натижада, термодинамик мувозанат Полатидаги p - n ўтишда эр-кин заряд ташувчиларнинг-электронлар ва ковакларнинг макроско-пик кўринишдаги кўчиши содир бўлмайди ва умумий ток нолга тенг бўлади.

2.6. Номувозанат Полатдаги p - n ўтишнинг энергиявий диаграммаси

Энди p - n ўтишга ташқи манбадан кучланиш берилган Полни таълил қилайлик. Фараз қилайлик, p - n тузилманинг p -ва n -соъала-рининг учларида идеал электрик контакт Посил қилиниб, улар таш-қи манбага уланган бўлсин. p - n тузилманинг p -ва n -соъаларига ман-банинг қайси қутбларига уланганига қараб, p -ва n -ўтиш тўпри ёки



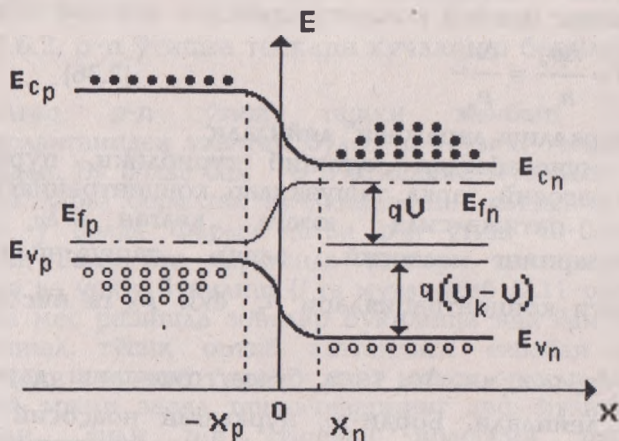
тескари уланган дейилади (2.9-расм).

2.9-расм. p - n ўтишни улаш усуллари: а) тўпри; б) тескари.

Ташқи манбага уланган p - n ўтишнинг мувозанат Полати бузи-лади ва унинг энергиявий диаграммаси тубдан ўзгариб кетади. Ушбу ходисани биз қуйида батафсил кўриб чиқамиз. Агар p - n тузилманинг p -соъаси манбанинг мусбат, n -соъаси эса, манфий қутбига уланса p - n ўтиш тўпри уланган (2.9 а-расм), агар аксинча p -соъаси манба-нинг манфий қутбига, n -соъаси эса, мусбат қутбига уланса, p - n ўтиш тескари уланган бўлади (2.9 б-расм). Ана шундай Полларда p - n ўтишнинг юқорида биз таъкидлаб ўтган электрик токни бир томон-лама ўтказиш хусусияти намоён бўлади.

2.6.1. p - n ўтишга тўпри кучланиш берилган Пол

Тўсувчи қатлам қаршилиги p - ва n -соёларнинг Пажмий қар-шилигига қараганда анча катта деб Писоблаймиз. Шунинг учун таш-қи кучланиш асосан p - n ўтишга қўйилган бўлади. Ушбу ташқи куч-ланиш таъсирида p - n тузилманинг мувозанати бузилганлиги туфайли p - ва n -соёларда Ферми сат-и Полатлари ўзгаради, яъни Ферми сат-и p - n ўтиш соёасида букилади ва бу букилиш ташқаридан берилган U кучланишга тенг (2.10-расм) бўлади. Шунга мос равишда p - n ўтишнинг мувозанат Полатида юз берган зоналар букилиши



тўприла-нади ва ундаги потенциал тўсиқ, $U_k - U$ га қадар камаяди.

2.10-расм. Тўпри кучланиш берилган p - n ўтишнинг энергиявий диаграммаси

Бунинг натижасида p - n ўтиш орқали p -соёлдан n -соёлага қараб ковакларнинг, n -соёлдан p -соёлага қараб эса, электронларнинг диффузиявий оқими юзага келади, яъни p - n ўтиш орқали электрик ток ўтади.

Шундай қилиб, p - n ўтишга тўпри кучланиш берилганда тўсув-чи қатлам орқали заррачаларнинг ўзлари ноасосий бўлган соёларга (масалан, ковакларнинг n -соёлага ва электронларнинг p -соёлага) қараб диффузиявий Паракати юзага келади. Бу жараён ноасосий заряд та-шувчиларнинг пукалиши деб аталади.

Потенциал тўсиқ камайиши билан тўсувчи қатламдаги элек-трик майдон кучланганлиги E_k ва шу қатламнинг

қалинлиги кама-яди. Чиндан Пам, (2.29) тенгламада U_k ни $U_k - U$ билан алмаштирсак, p - n ўтишнинг қалинлиги учун қуйидаги муносабат Посил бўлади:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon (U_k - U)}{e} \cdot \frac{N_a + N_d}{N_s N_g}} \quad (2.35)$$

Демак, p - n ўтишга тўпри U кучланиш берилганда унинг қалин-лиги $\sqrt{U_k - U}$ га мутаносиб равишда камайар экан.

p - n ўтиш чегарасида пуркалган ноасосий заряд ташувчиларнинг нисбий концентрациясини аниқлаб берувчи

$$\delta = \frac{\Delta p_p}{n_{n_0}} = \frac{\Delta n_p}{P_{p_0}} \quad (2.36)$$

катталиқ "пуркалиш даражаси" дейилади.

Ушбу муносабатдан кўриниб турибдики, пуркалиш даражаси ноасосий заряд ташувчилар концентрациясининг пуркалиши натижа-сида юзага келган Δp_n ёки Δn_p орттирмаларнинг асосий заряд ташув-чиларнинг мувозанатдаги концентрациялари n_{n_0} ёки P_{p_0} га нисбати-га тенгдир.

Агар $\Delta p_n \ll n_{n_0}$ ва $\Delta n_p \ll P_{p_0}$ бўлса, пуркалиш даражаси паст ($\delta < 1$) дейилади. Борди-ю, пуркалган ноасосий заряд ташувчилар концентрациялари асосий заряд ташувчиларнинг мувозанатдаги кон-центрациясига яқин, яъни $\Delta n_p \approx P_{p_0}$ ва $\Delta p_n \approx n_{n_0}$ бўлса, у холда пур-калиш даражаси ўртача дейилади. Агар $\Delta p_n \gg n_{n_0}$ ва $\Delta n_p \gg P_{p_0}$ бўлса, у Полда пуркалиш даражаси юксак дейилади.

Хўш, тўпри кучланиш берилган p - n ўтиш орқали ноасосий эр-кин заряд ташувчилар пуркалгандан сўнг қандай физик ходисалар содир бўлар экан? Пуркалган ноасосий эркин заряд ташувчилар p - n ўтиш чегараларида Пажмий заряд Посил қилади. Бу зарядларни компенсациялаш (электрик бетарафликни амалга ошириш) учун ярим-ўтказгичларнинг бошқа софаларидан асосий заряд ташувчилар оқиб келади. Натижада p - n ўтишнинг чегараларида Пам ноасосий, Пам асосий эркин заряд ташувчиларининг концентрациялари ортиб ке-тади. Бу

эркин заряд ташувчилар бир-бирлари билан рекомбинацияланади.

Ноасосий эркин заряд ташувчиларнинг қолган қисми p - n ўтиш чегарасидан яримўтказгичнинг ичига қараб диффузияланади ва йўл-йўлакай асосий заряд ташувчилар билан рекомбинациялашиб боради. Яримўтказгич соқаларининг ташқи чегараларида ноасосий заряд ташувчиларнинг концентрацияси асосий заряд ташувчиларнинг муво-занатдаги концентрациясига яқин бўлади.

2.6.2. p - n ўтишга тескари кучланиш берилган Пол

Агар p - n ўтиш ташқи манбага 2.9а-расмда тасвирланганидек уланган бўлса, p - n ўтиш тескари уланган дейилади. Бу Полда Пам p - n ўтишдаги мувозанат бузилади. Контактларга берилган кучланиш-нинг катталиги U га тенг бўлса, у Полда Ферми сатҳи p - n ўтиш соқасида тўпри уланган Полдагига қараганда тескари томонга қараб букилади ва ушбу букилиш U га мутаносиб (2.11-расм) бўлади. Шунга мос равишда зоналар букилиши яна Пам кучаяди ва потенциал тўсиқ ортиб кетганлиги сабабли p - ва n -соқаларни ажратиб турувчи сирт юзаси орқали оқиб ўтувчи асосий эркин заряд ташувчиларнинг диффузиявий оқими сусаяди. Энди p - n ўтишдан ноасосий эркин заряд ташувчиларнинг оқими билан боқлиқ бўлган ток оқа бошлайди.

Бунда p - n ўтишдаги потенциал тўсиқнинг ортишига мос равишда n -соқадан p -соқага қараб йўналган E_k электрик майдон Пам ортганлиги сабабли p -соқадаги электронлар n -соқага қараб ва n -соқадаги коваклар p -соқага томон қайтиб оқа бошлайди (бу коваклар ва электронлар дастлаб p - n ўтиш Посил бўлган пайтда мос равишда p -соқадан n -соқага ва n -соқадан p -соқага концентрация градиенти таъсирида диффузияланиб ўтиб қолган).

Бу Подиса ноасосий заряд ташувчиларнинг экстракцияси дейилади. Бундай шароитда тўсувчи қатлам қалинлиги (2.29) га биноан ортиб кетади:

$$\delta'_u = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(U_k + U)}{e} \cdot \frac{N_a + N_g}{N_a N_g}} \quad (2.37)$$

қалинлиги кама-яди. Чиндан Пам, (2.29) тенгламада U_k ни $U_k - U$ билан алмаштирсак, p - n ўтишнинг қалинлиги учун қуйидаги муносабат Посил бўлади:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(U_k - U) \cdot \frac{N_a + N_g}{N_a N_g}}{e}} \quad (2.35)$$

Демак, p - n ўтишга тўпри U кучланиш берилганда унинг қалин-лиги $\sqrt{U_k - U}$ га мутаносиб равишда камаяр экан.

p - n ўтиш чегарасида пуркалган ноасосий заряд ташувчиларнинг нисбий концентрациясини аниқлаб берувчи

$$\delta = \frac{\Delta p_p}{n_{n_0}} = \frac{\Delta n_p}{p_{p_0}} \quad (2.36)$$

катталиқ "пуркалиш даражаси" дейилади.

Ушбу муносабатдан кўрииб турибдики, пуркалиш даражаси ноасосий заряд ташувчилар концентрациясининг пуркалиши натижа-сида юзага келган Δp_p ёки Δn_p ортгирмаларнинг асосий заряд ташув-чиларнинг мувозанатдаги концентрациялари n_{n_0} ёки p_{p_0} га нисбати-га тенгдир.

Агар $\Delta p_p \ll n_{n_0}$ ва $\Delta n_p \ll p_{p_0}$ бўлса, пуркалиш даражаси паст ($\delta < 1$) дейилади. Борди-ю, пуркалган ноасосий заряд ташувчилар концентрациялари асосий заряд ташувчиларнинг мувозанатдаги кон-центрациясига яқин, яъни $\Delta n_p \approx p_{p_0}$ ва $\Delta p_p \approx n_{n_0}$ бўлса, у холда пур-калиш даражаси ўртача дейилади. Агар $\Delta p_p \gg n_{n_0}$ ва $\Delta n_p \gg p_{p_0}$ бўлса, у Полда пуркалиш даражаси юксак дейилади.

Хўш, тўпри кучланиш берилган p - n ўтиш орқали ноасосий эр-кин заряд ташувчилар пуркалгандан сўнг қандай физик ходисалар содир бўлар экан? Пуркалган ноасосий эркин заряд ташувчилар p - n ўтиш чегараларида Пажмий заряд Посил қилади. Бу зарядларни компенсациялаш (электрик бетарафликни амалга ошириш) учун ярим-ўтказгичларнинг бошқа соПаларидан асосий заряд ташувчилар оқиб келади. Натижада p - n ўтишнинг чегараларида Пам ноасосий, Пам асосий эркин заряд ташувчиларининг концентрациялари ортиб ке-тади. Бу

эркин заряд ташувчилар бир-бирлари билан рекомбинацияланади.

Ноасосий эркин заряд ташувчиларнинг қолган қисми p - n ўтиш чегарасидан яримўтказгичнинг ичига қараб диффузияланади ва йўл-йўлакай асосий заряд ташувчилар билан рекомбинациялашиб боради. Яримўтказгич соПаларининг ташқи чегараларида ноасосий заряд ташувчиларнинг концентрацияси асосий заряд ташувчиларнинг муво-занатдаги концентрациясига яқин бўлади.

2.6.2. p - n ўтишга тескари кучланиш берилган Пол

Агар p - n ўтиш ташқи манбага 2.9а-расмда тасвирланганидек уланган бўлса, p - n ўтиш тескари уланган дейилади. Бу Полда Пам p - n ўтишдаги мувозанат бузилади. Контактларга берилган кучланиш-нинг катталиги U га тенг бўлса, у Полда Ферми сатПи p - n ўтиш со-Пасида тўпри уланган Полдагига қараганда тескари томонга қараб букилади ва ушбу букилиш U га мутаносиб (2.11-расм) бўлади. Шунга мос равишда зоналар букилиши яна Пам кучаяди ва потенциал тўсиқ ортиб кетганлиги сабабли p - ва n -соПаларни ажратиб турувчи сирт юзаси орқали оқиб ўтувчи асосий эркин заряд ташувчиларнинг диф-фузиявий оқими сусаяди. Энди p - n ўтишдан ноасосий эркин заряд ташувчиларнинг оқими билан боПлиқ бўлган ток оқа бошлайди.

Бунда p - n ўтишдаги потенциал тўсиқнинг ортишига мос ра-вишда n -соПадан p -соПага қараб йўналган E_x электрик майдон Пам ортганлиги сабабли p -соПадagi электронлар n -соПага қараб ва n -со-Падagi коваклар p -соПага томон қайтиб оқа бошлайди (бу коваклар ва электронлар дастлаб p - n ўтиш Посил бўлган пайтда мос равишда p -соПадан n -соПага ва n -соПадан p -соПага концентрация градиенти таъсирида диффузияланиб ўтиб қолган).

Бу Подиса ноасосий заряд ташувчиларнинг экстракцияси дейи-лади. Бундай шароитда тўсувчи қатлам қалинлиги (2..29) га биноан ортиб кетади:

$$\delta'_a = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(U_k + U)}{e} \cdot \frac{N_a + N_g}{N_a N_g}} \quad (2.37)$$

бу ерда U_k ўрнига мавжуд $U_k + U$ қўйилади.

Агар тескари кучланишни орттира борсак, p - n ўтишдаги E_k майдон ортади, бироқ у орқали оқаётган токнинг қиймати ўзгармай-ди. Бунга сабаб шуки, p - n ўтишга берилаётган U кучланиш ортса Пам p - n ўтиш чегарасида ноасосий заряд ташувчиларнинг концен-трациялари n_{p_0} ва p_{n_0} лар ортмайди. Шунинг учун Пам p - n ўтиш-нинг тескари тавсифномасида доимо тескари тўйиниш I_0 токини кўзатамиз. I_0 токнинг катталиги n_{p_0} ва p_{n_0} ларнинг ортиши Писобига, яъни температуранинг кўтарилиши Писобига ортиши мумкин. Шу сабабли Пам I_0 тескари ток кўпинча иссиқлик токи номи билан Пам юритилади. Бу ерда p - n тузилмада содир бўладиган бошқа Подиса-лар Писобга олинмади. Улар 3.2-бўлимда батафсил қаралади.

II Боб бўйича мустақил назорат учун саволлар:

1. Яримўтказгич материалларнинг ўтказувчанлик тури нима-ларга бошқарилган?
2. Электрон-ковак ўтиш қандай қилдирилади?
3. p - n ўтиш қандай хоссаларга эга?
4. p - n ўтиш қилдирилади юзага қилдирилган физикавий жараёнларни тушунилинг.
5. p - n ўтиш вольт-ампер тавсифномасини тасвирланган ва тушунилинг.
6. Заряд ташувчилар диффузияси ва қилдирилади қандай юз бера-ди?
7. Контакт потенциаллари фарқи нима деб нимага айтилади?
8. "Кескин ўтиш" нима?
9. "Силлиқ ўтиш" нима?
10. Мувозанатдаги электрон-ковак ўтишда потенциал ва эркин заряд ташувчилар концентрацияси тақсимотлари орасидаги бошқарилганлини қилдириб қилдирилган.
11. p - n ўтишда қилдирилганлар концентрацияси тақсимоти қандай қилдирилганларга эга қилдирилади мумкин?
12. Кескин носимметрик p - n ўтишда Пажмий заряд қилдирилган тақсимоти қандай қилдирилганга эга?
13. Пуассон тенгласини ёзинг ва тушунилинг.
14. Электрик майдон қилдирилганлиги ва Пажмий заряд қилдирилган учун математик қилдирилганларни ёзинг ва тушунилинг.
15. p - n ўтишда потенциал тақсимоти математик қилдирилганлини ёзинг.
16. Термодинамик мувозанат қилдирилгандаги p - n ўтишнинг энергиявий диаграммасини қилдирилган ва тушунилинг.
17. Потенциал қилдирилган деб нимага айтилади?
18. Заряд ташувчилар учун Максвелл-Больцман тақсимотини ёзинг ва тушунилинг.
19. Номувозанат қилдирилгандаги p - n ўтишнинг энергиявий диаграммасини қилдирилган ва тушунилинг.

20. *p-n* ўтишга тўпри кучланиш берилган Полда қандай физик жараёнлар юз беради?

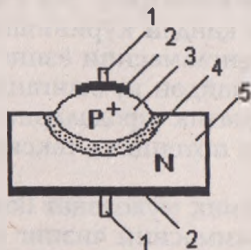
21. *p-n* ўтишга тескари кучланиш берилган Полда қандай фи-зик жараёнлар юз беради?

III БОБ. ЯРИМУТКАЗГИЧ ДИОДЛАР.

3.1. Яримўтказгич диоднинг тузилиши

Яримўтказгич диод деб, умуман олганда, асоси *p-n* тузилмага эга (*p*- ва *n*-тур соПалардан ташкил топган) икки электродли элек-трон асбобга айтилади. Одатда *p-n* тузилманинг *p*- ва *n*-соПаларидан бири иккинчисига нисбатан асосий заряд ташувчиларга бойроқ бўлади. Шунга қараб, биринчи соПа эмиттер-Э, иккинчиси эса, база-Б (3.1-расм) дейилади. У база (Б) ва эмиттер (Э) лар билан омик контакт Посил қилувчи металл сим (С) ёрдамида занжирга уланади.

Юқорида айтганимиздек, диоднинг асосий функционал хосса-ларини белгилаб берувчи мулим элементи бу ундаги *p-n* ўтиш, яъни *p*- ва *n*-соПаларни бир-биридан ажратиб турувчи юпқа оралиқ қат-ламдир. Фикримизни тушунтириш учун қотишмали германий (3.1-расм) ва диффузиявий кремний диодларининг (3.2-расм) тузилиши ва ясалиш



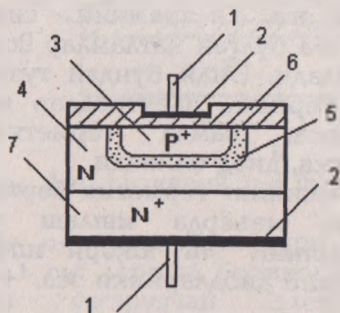
тамойиллари Пақида қисқача тўхталиб ўтамиз.

3.1-расм. Қотишмали германий диод тузилмаси.

- 1 - ташқи симлар; 2 - ток ўтказгич металл электродлар;
3 - p^+ -қатлам (эмиттер); 4- *p-n* ўтиш соПаси; 5- *n*-қатлам

(база)

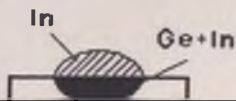
Германий диодини яшаш учун n -тур (таркибига 10^{14} - 10^{16} см⁻³ миқдордаги сурьма киритилган) германий пластинаси олинади. Бу пластинани кимёвий йўл билан яхшилаб тозаланиб, устига кичик индий бўлакчаси қўйилади ва водород оқими ўтиб турадиган печ-кага киритилади. Печканинг температураси 550°C га қадар кўтарил-ганда индий суюлиб, ўз навбатида германийни ҳам қисман суюлтиради. Натижада германий пластинаси устида қотишма билан тўл-ган чуқурча (3.3-расм) пайдо бўлади. Бундан кейин печка аста-секин совитилади. Совуқ индийда германийнинг эрувчанлиги кичик бўл-ганлиги сабабли совиш давомида германий атомлари қисман қотишма таркибидан чиқиб қайта кристалланади. Шу жараёнда қайта кристалланаётган германий ўз таркибига индий атомларини қисман қўшиб олади ва натижада индий билан (10^{18} см⁻³ концентрациялар-



3.2-расм. Диффузиявий кремний диод тузилмаси.

- 1 - ташқи симлар; 2 - ток ўтказгич металл электродлар;
- 3 - p^+ -қатлам; 4 - n -қатлам; 5 - p - n ўтиш соҳаси;
- 6 - Пимоявий қоплама p - n ўтиш соҳаси; 7 - омик контактнинг n^+ -қатлами

гача) бойитилган p -тур германий қатлами осил бўлади, яъни p - n ўтиш юзага келади. Энди ушбу тузилмага тегишлича кимёвий ишлов берилиб, унинг n - ва p -қисмлари электродлар ва чиқиш симлари билан жиловланса, ҳамда



герметик беркиладиган қопламага жойланса, диод Посил бўлади.

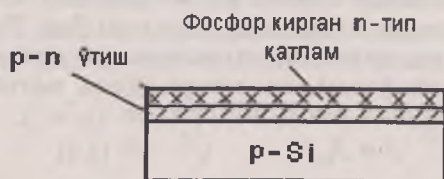
3.3-расм. Қотишмали *n*-германий диод тузилмаси

Энди диффузия усули билан ясаладиган диодларга мисол кел-тирайлик. Ушбу усул ёрдамида асосан кремний ясси диодлари яса-лади. Диод ясаш учун керакли ўлчамдаги, тегишли механик Памда кимёвий ишлов берилган ва керакли турдаги (*p*- ёки *n*-тур) кремний пластинаси олинади. Сўнгра, махсус реакторларда 1100-1200°C тем-ператураларда пластинанинг бир томонига тахминан микрометр ат-рофидаги чуқурликкача фосфор (*p*-тур кремнийга) ёки бор (*n*-тур кремнийга) диффузия йўли билан (3.4а,б-расм) киритилади. Бундай усул билан кремнийнинг маълум қатламини 10^{18} - 10^{19} см⁻³ концен-трацияларгача бор ёки фосфор билан бойитиш мумкин.

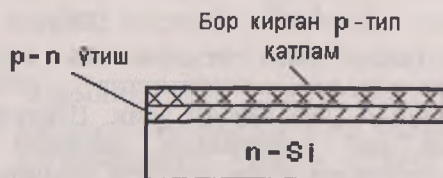
Шундай қилиб, *p*-кремний сиртида *n*-тур ўтказувчанликка эга, *n*-кремний сиртида эса, *p*-тур ўтказувчанликка эга бўлган қатламлар Посил бўлади, яъни *p-n* ўтиш юзага келади. Энди бундай тузилма-ларга тегишли кимёвий ишлов берилса, электродлар ва чиқиш сим-лари билан жиПозланса, Памда герметик беркитиладиган қопламага жойланса, диод олинади.

Диод қопламасининг герметик беркитилиши унинг нам муПит-ларда Пам меъёردа ишлаш имконини беради. Германий диодларнинг энг юқори ишлаш температураси +70°C гача, кремний диодларники эса, +150°C гача боради.

Яримўтказгич диодларни икки гуруҳга: нуқтавий ва ясси диод-ларга ажратиш мумкин. Нуқтавий диодларнинг $p-n$ ўтиши тахминан яримсфера шаклига эга ва контакт юзаси $10^{-13}-10^{-14}$ см² лар атрофида бўлади. Улар юқоритакрорийликлар соҳасида ишлаш учун мўл-жалланган.



а



б

3.4а,б-расм. Диффузиявий $p-n$ ўтиш олиш

Ясси диодларда $p-n$ ўтиш ўлчамлари етарли даражада катта (юзаси Патто 1 см² ларгача бориши мумкин) бўлади. Бундай диод-лар ўзгарувчан электрик токларни тўприлагичларда, қудратли қурил-маларда қўлланилади.

3.2. Диодда содир бўладиган физикавий Подисалар

Одатда диоднинг асосий хоссасини ундаги $p-n$ ўтиш белги-лайди. Шу сабабли идеаллаштирилган диоднинг вольт-ампер тавсиф-номаси $p-n$ ўтиш учун чиқарилган (2.3 га қаранг) формула

$$J = J_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

билан ифодаланади.

Бироқ, Пақиқий диодларни олсак, уларда II бўлимда эътиборга олинмаган бошқа физик Подисалар Пам содир бўлади. Шу сабабли юқоридаги боВланишнинг хусусиятига қатор қўшимча сабаблар Пам таъсир кўрсатади. Ана шу омилларнинг асосийларини базаси л-яримўтказгичдан иборат диод мисолида таПлил қилиб ўтамиз.

Диодга тескари кучланиш берилган Пол. Бу шароитда р-л ўтишда ёпувчи қатламнинг қалинлиги ортади, потенциал тўсиқ баландлиги ўсади, ва демак, диод катта қаршиликка эга бўлади, ва ниПоят р-п ўтиш орқали

$$J \approx J_0 \quad (3.2)$$

тескари ток оқади.

Бироқ, J_0 тескари токнинг қиймати диодга фақат тескари куч-ланиш берилгандагина эмас, балки тўри кучланиш берилганда Пам аПамиятга эга. Чунки

$$J = J_0 e^{\frac{eU}{kT}} \quad (3.1)$$

Аввал II бобда биз тескари ток асосан иссиқлик таъсирида за-рядлар жуфтнинг генерацияланиши натижасида кучаяди, деб айтган эдик. Шунинг учун бу ток иссиқлик токи деб юритилади. Пақиқий яримўтказгич диодларда эса, иссиқлик токи тескари токнинг бир қисмини ташкил қилади. Умуман тескари ток яна р-п ўтишда эркин заряд ташувчиларнинг генерацияланиш токи, сизиш токи ва бошқа-лардан ташкил топади.

Иссиқлик токи катталигини белгиловчи сабабларни қисқача кўриб чиқайлик.

Иссиқлик токи. Иссиқлик токи учун қуйидаги формулани ёзиш мумкин:

$$J_0 = eS \left(L_p \frac{p_{n_0}}{\tau_p} + L_n \frac{n_{p_0}}{\tau_n} \right) \quad (3.3)$$

бу ерда, p_{n_0} ва n_{p_0} - ноасосий заряд ташувчиларнинг мувозанатий концентрациялари, τ_p ва τ_n - коваклар ва электронларнинг яшаш вақтлари, L_p ва L_n - коваклар ва электронларнинг диффузиявий йўл узунлиги, e - электрон заряди, S - р-п ўтиш юзаси.

Демак, иссиқлик токи ана шундай параметрларга боғлиқ экан, диод яшаш вақтида унинг ана шу хусусиятларини Писобга олмоқ ке-рак.

Иссиқлик токининг ноасосий заряд ташувчиларнинг концен-трациялари P_{n_0} ва n_{p_0} ларга боғлиқлиги Пам муҳим омидир. Маса-лан, маълум даражада соддалаштириш йўли билан қуйидаги тахми-ний муносабатни олиш мумкин:

$$J_0 \approx eS \frac{D_p}{d_n} \cdot \frac{n_i^2}{N_g} \quad (3.4)$$

бу ерда, d_n - n -сола узунлиги, D_p -ковакнинг диффузия коэффиценти, N_g - n -соладаги донорлар концентрацияси, n_i -хусусий яримўтказгич-да заряд ташувчиларнинг мувозанатий концентрацияси.

Шундай қилиб, иссиқлик токининг қиймати n_i^2 га мутаносиб экан. Масалан, $T=300$ К да германий учун $n_i \approx 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, кремний учун эса $n_i \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. D_p нинг германий учун қиймати кремнийни-кига қараганда 3,5 марта каттароқ. Бу катталикларни ўрнига қўйиб, ва германий билан кремний учун S , W_n , ва N_g лар қийматларини бир хил деб Писоблаб, германийда иссиқлик токи кремнийникига нисба-тан тахминан 10^6 марта катта ($J_{0(Si)} \cong J_{0(Ge)}$) эканлигини кўрсатиш мумкин.

Генерация токи. Пақиқий диодларда тўсувчи қатлам қалинлиги чекли қийматта эга бўлиб, бу солада Пам унинг ташқарисида Пам заряд ташувчилар генерацияланиб ва рекомбинацияланиб туради. p - n ўтишда генерацияланувчи заряд ташувчилар, ўтишдаги E_k электрик майдон таъсирида тўсувчи қатламдан чиқариб юборилиб J_g генера-ция токини Посил қилади. Эркин заряд ташувчилар тўсувчи қатлам-да Посил бўлганми ёки диоднинг эмиттер, ёки база қисмида Посил бўлиб, кейин тўсувчи қатламга кириб қолганми, ундан қатъий назар, шу тўсувчи қатламда генерацияланган заряд ташувчилар сони реком-бинация токи J_r ни Посил қилади.

Генерация токи учун қуйидаги ифодани ёзиш мумкин:

$$J_g \approx eSd \frac{n_i}{\tau_n + \tau_p} \quad (3.5)$$

қараганда тезроқ ўсади ва тўпри тоқда диффузиявий токнинг улуши ортиб кетади.

Заряд ташувчиларнинг пуркалиши. Пақиқий диодларда эмиттер одатда киришмалар билан асосга қараганда кўпроқ бойитилади:

$$N_a \gg N_g \quad (3.9)$$

Шу сабабдан Пам тўпри ток эмиттердан асосга қараб ковакларнинг пуркалиши натижасида юзага келади. Бунда пуркалиш коэффиценти қуйидагича аниқланади:

$$\gamma = \frac{J_p}{J_p + J_n} \quad (3.10)$$

бу ерда, J_p ва J_n - p-n ўтик технологик чегарасидан ўтаётган токнинг ковак ва электрон ташкил этувчилари.

Эмиттер ва асоси узун ($d_p > L_n$ ва $d_n > L_p$) бўлган диод учун қуйидагича муносабатни ёзиш мумкин:

$$\gamma \approx 1 - \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad (3.11)$$

бу ерда, ρ_s , ρ_a - эмиттер ва базанинг солиштира қаршиликлари. Одатда, $N_a \gg N_g$ бўлганлигидан $\frac{\rho_s}{\rho_a}$ жуда кичикдир, ва демак, γ бирга яқин сондир.

Диод асосида содир бўладиган физикавий Подисалар. Пуркалиш натижасида асоснинг тўсувчи қатламга чегарадош қисмида ноасосий заряд ташувчиларнинг ортиқча $\Delta p = p_n - p_{n_0}$ концентрацияси юзага келади.

Бундай заряд ташувчиларнинг диффузиявий Паракати туфайли қалин асос ($d_n > L_p$) учун

$$p(x) = p_{n_0} + \Delta p e^{-x/L_p} \quad (3.12)$$

ва юпқа асос ($d_n \ll L_p$) учун

$$p(x) = p_{n_0} + \Delta p \left(1 - \frac{x}{d_n} \right) \quad (3.13)$$

тақсимотлари юзага келади.

Базанинг Пажмий қаршилиги. База киришмалар билан унча кўп бойитилмаган бўлса, унинг Пажмий қаршилиги р-п ўтик қаршилигига яқин бўлиб қолиши мумкин. Бу Подда ташқи манбанинг кучланиши батамом р-п ўтикка қўйилган бўлмасдан, унинг бир қисми базанинг Пажм қаршилигида тушади:

$$U = U_{ym} + U_{ac} \quad (3.14)$$

База қаршилигининг модуляцияланиши. Пуркалиш даражаси юқори бўлганда, асосга пуркалган коваклар сони базадаги эркин заряд ташувчиларнинг умумий сонига нисбатан анчагина катта бўлиши мумкин.

Натижада базанинг қаршилиги сезиларли даражада ўзгаради. Бу Подиса база қаршилигининг модуляцияланиши дейилади. Юпқа асос ($W_n \leq L_p$) учун унинг қаршилигининг пуркалиш даражасига боқлиқ равишда ўзгаришини қуйидаги формула билан ифодалаш мумкин:

$$r_\delta(\delta) = \frac{r_{\delta_0}}{\delta} \ln \delta \quad (3.15)$$

бу ерда, δ - диоднинг пуркалиш даражаси деб аталувчи параметр.

Диод базасидаги электрик майдон. р-п ўтик орқали ноасосий заряд ташувчилар пуркалганда тўсувчи қатлам чегарасида мусбат зарядлар, яъни ковакларнинг ортиқча концентрацияси юзага келади.

Натижада, базада кучланганлиги E_{ac} бўлган ва р-п ўтиқдан базага қараб йўналган ички электрик майдон юзага келади. Ана шу майдон таъсирида базанинг ички қисмларидан р-п ўтикка қараб электронлар Паракатланади. Бу электронлар р-п ўтик ёнида миқдори коваклар миқдорига деярли тенг бўлган Пажмий заряд Посил қилади. Базада катталиги асосий заряд ташувчилар p_n нинг концентрациясига нисбатан ортиқча бўлган коваклар концентрацияси Δp га, яъни пуркалиш даражасига боқлиқ бўлган қолдиқ электрик майдон доим мавжуддир.

Пуркалиш даражаси кичик, яъни $\Delta p_\delta \ll p_n$, бўлганда бу майдон-нинг қиймати етарли даражада кичик ва пуркалган коваклар база ичи-га қараб асосан градиент таъсирида Паракатланади.

Пуркалиш даражаси юқори, яъни $\Delta p_0 \gg n_n$ бўлганда бугунлай бошқача Подисалар юз беради. Бундай шароитда юзага келадиган E_0 майдон базада ноасосий заряд ташувчиларнинг - ковакларнинг дайдиш (майдон таъсиридаги) Паракатини юзага келтириш учун етарли бўлади. Шу билан бир вақтда ковакларнинг диффузия Паракати Пам амалга ошаверади.

Диод базасида юзага келадиган электрик майдон катталигини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$E_{ec} = \frac{j}{e(\mu_n n_n + \mu_p p_n)} - \frac{D_n - D_p}{\mu_n n_n - \mu_p p_n} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.16)$$

бу ерда, $j = j_p + j_n$ р-п ўтик орқали ўтувчи тўлиқ диффузиявий ток, μ_p, μ_n - мос равишда электрон ва коваклар Паракатчанликлари.

(3.15) тенгламадаги биринчи қўшилувчи Пад база орқали ток ўтган вақтда унинг Пажмий қаршилигида кучланиш тушиши натижасида юзага келадиган майдонни ифодаласа, иккинчи қўшилувчи Пад асосий ва ноасосий заряд ташувчилар концентрацияси градиенти таъсирида юзага келувчи майдонни ифодалайди.

Биз шундай қилиб Пақиқий диодларда содир бўладиган физикавий Подисаларни таълил қилиб чиқдик. Ана шу Подисалар Пақиқий диоднинг хоссаларини идеаллаштирилган р-п ўтикнинг хоссаларидан тубдан фарқ қилишига сабабчи бўлишини кўрдик. Бундан кейин Пақи-қий диодларнинг турларини кўриб чиқишда уларнинг ана шу хусусиятларига ашамият беришимиз керак.

Диод вольт-ампер тавсифномасига температуранинг таъсири. Диоднинг вольт-ампер тавсифномасига температура жуда кучли таъсир кўрсатади. 3.6 ва 3.7-расмларда мисол сифатида кремний ва германий диодлар вольт-ампер тавсифномаларининг температурага қараб ўзгариши келтирилган. Температура кўтарилиши билан $I_{тес}$ тескари ток кескин ортиб кетиши, тавсифноманинг тўри қисми тикроқ бўла бориши кўриниб турибди. Бунга сабаб, ноасосий заряд ташувчилар концентрациясининг температурага кескин бошлиқлигидир. Яримўтказгич тақиқ-

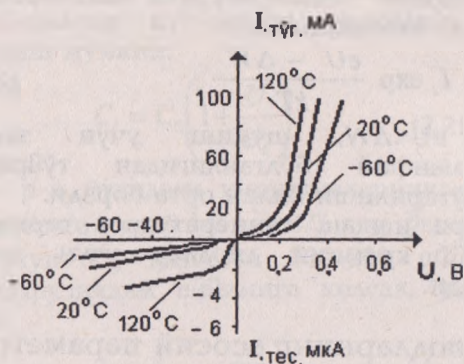
ланган зонасининг кенлиги қанча кичик бўлса, ундан ясалган диодга температуранинг таъсири шунча кучлироқ бўлади.

Масалан, электрон яримўтказгичда коваклар концентрацияси температурага қараб қуйидаги қонуният билан ортиб боради:

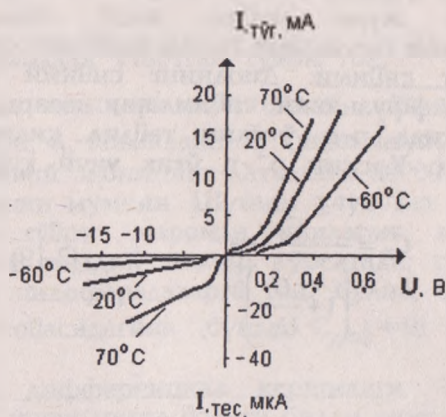
$$P_n = \frac{N_c^2}{N_g} \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) \quad (3.16)$$

Шунинг учун электрон-ковак ўтиқнинг экстракция токи

$$I_0 = \frac{eSD_p N_c^2}{L_p N_g} \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right) \quad (3.17)$$



3.6-расм. Кремний диоднинг вольт-ампер тавсифномаси.



3.7-расм. Германий диоднинг вольт-ампер тавсифномаси.

га тенг бўлади. Бу ерда, e^- электрон заряди; D_p - ковакнинг диффузия коэффицентиги; L_p - ковакларнинг диффузия йўли узунлиги; N_c ва N_v мос равишда ўтказувчанлик ва валент зоналардаги Полатлар зичлиги; S- p-n ўтик юзаси.

Экспоненциал Пад олдидаги катталиқ $I_1 = \frac{eSD_p N_c^2}{L_p N_v}$

температурага деярли бошлиқ эмас. Демак, температура ортиши билан, экстракция токи экспоненциал қонуният билан ортиб борар экан.

Тўри токнинг температурага бошлиқлиги қуйидаги муносабат билан ифодаланеди:

$$I = I_1 \exp \frac{eU - \Delta W}{kT} \quad (3.18)$$

Одатда, $eU < \Delta W$, шунинг учун экспонентанинг кўрсаткичи манфий бўлганлигидан тўри ток Пам температура кўтарилиши билан орта боради.

Энг юқори ишлаш температураси германий диодлар учун 80-100°C, кремний диодлар учун эса, 150-200°C атрофида бўлади.

3.3. Диодларнинг асосий параметрлари

Ишлаш жараёнида диодларнинг сифими, дифференциал қарши-лиги, ўзгармас токка қаршилиги каби параметрлари жуда муҳим касб этади. Ана шу параметрларнинг баъзилари билан танишиб чиқайлик.

Диоднинг сифими. Диоднинг сифими деганда унинг тўсий ва диффузиявий сифимлари назарда тутилади. Бу сифимлар Пақида p-n ўтикни таълил қилганда батафсил гапирган эдик. Кескин p^+ -n ўтик учун қуйидагини ёзиш мумкин:

$$C_T = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{U}{U_k}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.19)$$

Бу ерда

$$C_0 = S \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 N_g}{2U_k}} \quad (3.20)$$

$U=0$ даги бошлангич тўсилий сийм; S - р-п ўтик юзаси, қолган катталиклар Паммаси бизга юқоридан таниш.

Демак, яримўтказгич диод гўё электрик конденсатор бўлиб, унинг қопламалари вазифасини р- ва п-соПалар, диэлектрик вазифасини эса, эркин зарядлари деярли йўқ бўлган электрон-ковак ўтик бажаради.

Шуни айтиш керакки, (16) муносабат кескин р-п ўтикка эга бўлган диодлар учун ўринлидир. Умумий Полда сийм ва берилган куч-ланиш орасидаги боПланишни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$C_i = C_0 \left(1 + \frac{U}{U_k}\right)^{-\gamma} \quad (3.21)$$

бу ерда, γ - р-п ўтикдаги киришмаларнинг концентрация бўйича тақсимомага қараб 1/2 дан 1/3 гача ўзгаради. Юпқа р-п ўтиklar учун C_0 қиймати 300-600 пФларга боради. Диоднинг диффузиявий сиймига келсак, уни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$C_{\text{диф}} = HI\tau_p \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_p}}\right) \quad (3.22)$$

бу ерда, I - диоддан ўтаётган тўпри ток; $H = \frac{e}{kT} / \frac{1}{N}$ - микрозарранинг иссиқлик потенциали дейилади, t_1 - ток I нинг ўтиш вақти, τ_p -ковакларнинг яшаш вақти.

Диффузиявий сиймнинг катталиги 50000 пФ ва ундан Пам катта бўлиши мумкин. Шунинг учун Пам диффузиявий сийм диод тўпри маромда ишлаган вақтда унинг тавсифномасига жиддий таъсир кўрсатади; тўсилий сийм эса, ўн ва юз пикофарадаларга тенг бўлиб, фақат тескари кучланишлар соПасидагина (бунда, $C_{\text{диф}}=0$) ўз таъсирини кўрсатади.

Диоднинг дифференциал қаршилиги. Бу қаршилиқ кучланишнинг ишчи нуқта Полати билан аниқланувчи бирор

U қиймати атрофида ўзгарган вақтда диод орқали ўтаётган токнинг ўзгаришини белгилайди:

$$r_{\text{диф}} = \frac{\partial U}{\partial I} \quad (3.23)$$

Идеаллаштирилган диод учун қуйидаги ифодани ёзиш мумкин:

$$r_{\text{диф}} = \frac{\partial U}{\partial I} = \frac{kT}{e(I+I_0)} \quad (3.24)$$

Дифференциал қаршилик токка ёки диодга берилган кучланишга бошлиқ. $U < 0$ бўлганда $r_{\text{диф}}$ жуда катта: бир неча килоомлардан юзлаб мегаомларгача боради.

Тўпри кучланиш берилганда Пам дифференциал қаршилик токка бошлиқ бўлиб, у ўтган сари камая боради. Пақиқий диодлар учун $r_{\text{диф}}$ ни қуйидаги тапминий формуладан топиш мумкин

$$r_{\text{диф}} \approx \frac{26}{I(\text{mA})}, \text{ Ом} \quad (3.25)$$

Бу формула (3.24) дан $I > I_0$ ва $kT/e = 0,026$ В деб олинган.

Диоднинг ўзгармас токка қаршилиги. Бу қаршилик диодга қўйилган ўзгармас кучланишнинг шунга мос ўзгармас ток катталигига нисбатига тенг:

$$r_{\text{д}} = \frac{U}{I} \quad (3.26)$$

Тескари кучланиш берилганда идеаллаштирилган диод учун:

$$r_{\text{тес.д}} = \frac{U}{J_{\text{тес}} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)} \quad (3.27)$$

Тўпри кучланиш берилганда эса,

$$r_{\text{тузд}} = \frac{kT \ln \left(\frac{J}{J_0} + 1 \right)}{eJ} \quad (3.28)$$

Пақиқий диодлар учун одатда, $J_{\text{тузд}} > J_{\text{диф}}$. ва $J_{\text{тес.д}} < J_{\text{диф}}$.

Биз диодларда содир бўладиган физикавий Подисаларни Памда уларнинг асосий параметрларини қисқа бўлсада, кўриб чиқдик. Албатта, битта йўл билан турли хил назифаларни бажара оладиган, яъни универсал диод яшаш мумкин эмас.

Масалан, яримўтказгич диодларни бажарадиган вазифасига қараб қуйидаги асосий турларга ажратиш мумкин:

1. Тўприлагич диодлар.
2. Стабилитронлар.
3. Импульс диодлар.
4. Юқоритакрорийликли диодлар.
5. Шоттки диодлари.
6. Туннел ва тескари диодлар.
7. Кўчкисимон (ишлайдиган) диодлар.
8. Ганн диодлари.
9. p-i-n диодлар.
10. Варикаплар.
11. Ёритувчи диодлар.
12. Ёритгич диодлар.

Бу рўйпатга катта қувватларга мўлжалланган асбоблар-қудратли яримўтказгич венти́ллар кирмади (улар Пақида тиристорлар мавзусида қисқа гапириб ўтилади). Биз қуйида ана шу зикр қилиб ўтилган диодларнинг асосий вазифалари, тузилиши, параметрлари, ишлатилиш соПалари ва Показолар Пақида маълумот бермоқчимиз.

Диодларнинг динамик хоссалари. Биз юқорида яримўтказгич диоднинг статик маромдаги ёки унга бериладиган кучланиш секин ўзгарган шароитдаги хоссаларини, унинг базасида содир бўладиган Подисаларни кўриб чиқдик. Бироқ, бундай Полат учун топилган муносабатлар диодга бериладиган кучланиш тез ўзгарганда, яъни унинг ўзгариш вақти диоднинг базасида номувозанатий заряднинг р-п ўтик-даги компенсацияланмаган Пажмий заряднинг тупланиш ва сизиб кетиш вақти чамасида бўлган Полларда ўринсиз бўлиб қолади. Диоднинг бундай мароми динамик маром дейилади.

Ана шундай динамик маромда ишлаётган диоддаги Подисаларни таЛлил қилайлик. Қулайлик учун р-п турдаги диодни оламиз. Бундай диодда тўпри кучланиш остида қонаклар асосан n-соПага (базага) пуркалади. Шу билан бирга, базада электрбетарафлик амалга ошиши учун ташқи

занжирдан базага худди шунча электрон келиб тушади. Ушбу тўпри ток ўтиш жараёнида базага келган ковак ва электронлар миқдори диоднинг тупланган зарядини ташкил қилади.

Базада юзага келадиган зарядлар миқдорининг ўзгариш жараёнини батафсил таълил қилишдан қуйидаги ифодани топиш мумкин:

$$C_6 \frac{dU}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \frac{Q_p}{\tau_p} = i \quad (3.29)$$

бу ерда, C_6 - р-п тузилманинг тўсилий сипими; U - р-п ўтика берилган кучланиш; Q_p - базага пуркалган ковакларнинг умумий заряди; τ_p - базадаги номувозанатий зарядларнинг яшаш вақти; i -диод орқали ўтувчи электр токи.

Келтирилган муносабат заряд тенгламаси деб аталади ва диоддаги динамик жараёнларни таълил қилишда кенг қўлланилади.

Тегишли математик амаллар ёрдамида диод орқали тўпри тўрт-бурчак шаклидаги J_1 ток импульси ўтган Пол учун тупланган Q_T зарядни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$Q_e = J_1 \frac{d^2}{D_p} = J_1 \tau_{диф} \quad (3.30)$$

бу ерда, d -базанинг қалинлиги; D_p -ковакларнинг диффузия коэффициентини; $\tau_{диф}$ -заряд ташувчиларнинг диффузия вақти дейилади, у заряд та-шувчиларнинг база орқали югуриб ўтиш вақтини англатади.

Диоднинг динамик хоссаларига мушм таъсир кўрсатадиган параметрлари бу - унинг тўсилий C_T ва диффузиявий $C_{диф}$ сипимларидир.

Биз ушбу сипимлар Пақида 3-параграфда батафсил тўхталиб ўт-ган эдик. Масалан (3.19), (3.20), (3.21), (3.22) формулаларга қаранг. Уша формулалардан диоднинг C_T ва $C_{диф}$ сипимлари диодга кучланиш берилганда анча кенг миқёсда ўзгаришини кўриш мумкин. Бу Поди-салар р-п-ўтик қалинлигининг ўзгариши билан Памда базада Пажмий зарядларнинг тупланиши билан боПлиқдир. Демак, диоднинг динамик хоссаларини текширган вақтда албатта сипимлар хоссаларини Пам Писобга олмоқ керак.

Диоднинг $C_g(U) = C_T + C_{diff}$ сиПимини Писобга олган Одатда, у орқали ўтувчи ток катталигини қуйидаги тенгламадан топиш мумкин:

$$i = J(U) + C_g \frac{dU}{dt} \quad (3.31)$$

Бу ерда, $J(U)$ -диоднинг статик вольт-ампер тавсифномасидан олинган ток қиймати.

Ана шу муносабат ёрдамида кучланишнинг турлича ўзгариш тез-ликлари $\frac{dU}{dt}$ учун диоднинг $i = f(U, \frac{dU}{dt})$ тавсифномалари тупла-мини чизиб чиқиш мумкин.

3.4. Электрон-ковак ўтикнинг тешилиши

Яримўтказгич диод вольт-ампер тавсифномасини ўрганиш бўйича ўтказилган тажрибалар р-п-ўтикка тескари йўналишда бериладиган кучланишни исталганча ошириш мумкин эмаслигини кўрсатди. Тес-кари кучланишнинг маълум чегаравий қийматларидан бошлаб унинг ортиши тескари ток қийматининг кескин ортишига олиб келади. Бу Подисани р-п ўтикнинг тешилиши деб аталади. Унинг олдини олиш учун махсус чоралар кўрилади ёки ундан маълум мақсаларда фойда-ланилади.

Ўз-ўзидан равшанки, тескари ток кескин ортаётган экан, бу Пол р-п ўтикдаги заряд ташувчилар сонининг у ёки бу физикавий жараён-лар туфайли кўпайиши Писобига юзага келади.

Одатда тешилишни ўз табиатига қараб, тўрт турга ажратилади:

1. Иссиқликдан тешилиш.
2. Туннел тешилиш.
3. Кўчкисимон ёки электрик тешилиш.
4. Сиртий тешилиш.

Иссиқликдан тешилиш Подисаси р-п ўтик орқали ўтаётган ток таъсирида ортиқча қизиб кетиш натижасида содир бўлади. Назарий Писоблар U_T тешилиш кучланиши ва диод орқали оқаётган J_T тешилиш токининг қиймати орасида қуйидагича болланиш мавжуд эканлигини кўрсатади:

$$U_T = \frac{\chi \Delta T}{J_T}$$

бу ерда, χ -диоднинг иссиқлик сочиш коэффициенти, Вт/град; J_T -теши-лиш пайтидаги тескари токнинг қиймати; ΔT -диод температурасининг ортиши.

Иссиқликдан тешилиш Подисаси яримўтказгич атомларининг иссиқлик таъсирида ионлашиши натижасида юзага келади. Шунинг учун, диодни ясашда уларнинг иссиқликни атрофга сочувчанлигига алоҳида аҳамият берилади. Шу сабабли диодларнинг иссиқлик қаршилиги

$$R_T = \frac{\delta_u}{\lambda S_g}$$

кичик қилиб ишланади (бу ерда, δ_u - диоднинг ўтказувчан қисмининг қалинлиги; λ -яримўтказгичнинг иссиқлик ўтказувчанлиги; S_g - р-п ўтик юзаси). Масалан, кремнийнинг иссиқлик ўтказувчанлиги ($\lambda = 2,19$ Вт/см⁰С) германийникига қараганда анча каттароқ ($\lambda = 0,52$ Вт/см⁰С). Демак, кремнийдан ясалган диодлар германий диодларга қараганда ис-сиқликдан тешилишга чидамлироқ бўлар экан.

Туннел тешилиш киришмалар концентрацияси жуда катта бўл-ган (10^{18} - 10^{20} см⁻³), айниган деб юритиладиган ва тақиқланган зонаси кенг бўлмаган яримўтказгичлар асосида тайёрланган р-п ўтиклар учун хосдир. Бундай ўтикларда Пажмий заряд соласининг кенглиги (2.27) ва (2.28) ифодаларга мувофиқ, жуда кичик бўлади. Тескари кучланиш қўйилган р-п ўтикда потенциал тўсиқ кенглигининг кичиклиги р-яримўтказгич валент зонасидаги электронларнинг потенциал тўсиқни сизиб п-яримўтказгич ўтказувчанлик зонасидаги бўш Полатларга (ўз энергияларини ўзгартирмасдан) ўтишига, яъни туннел Подисаси юз беришига имконият беради.

Одатда тешилишни у юз берадиган майдон кучланганлигининг қиймати $E_{кр}$ билан баПолайдилар. Тажриба натижаларига кўра, бу кучланганлик германий асосидаги р-п ўтик учун $\sim 2 \cdot 10^5$ В/см ларга, кремний асосидаги р-п ўтик учун $\sim 4 \cdot 10^5$ В/см ларга тенг.

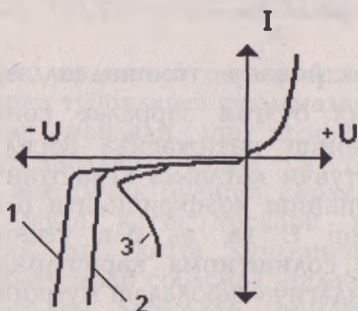
р-яримўтказгич валент зонасидаги электронлар ва п-яримўтказгич ўтказувчанлик зонасидаги бўш Полатлар сонининг ниПоютда кўпчилиги сабабли бу Подиса р-п ўтик тескари токининг 3.8-расмда кўрсатил-гандек кескин ортишига олиб келади. Туннел тешилиш солишгирма

қаршиликлари кичик ва тақиқланган зонаси кенг бўлмаган яримўт-казгичлардан ясалган p-n ўтикларга хосдир.

Туннел тешилишнинг бошланиши $J_{\text{тун}}$ туннел токнинг тескари J_0 тоқдан тахминан 10 марта ортиб кетиши билан боғланади.

Туннел тешилиш юзага чиқадиган майдон кучланганлиги $E_{\text{тун.теш.}}$ p-n ўтикка берилган U кучланишга ва яримўтказгичнинг солиштира қаршилигига боғлиқ. Масалан, кремний учун бу боғланиш қуйидагича ифодаланади:

$$U_{\text{тун.теш.}} \approx 20 \cdot 10^3 \rho_n + 73 \cdot 10^2 \rho_p$$



3.8-расм. Диоднинг вольт-ампер тавсифномаси. Рақамлар билан тешилишнинг турлича механизмлари кўрсатилган:

1. Кўчкисимон тешилиш; 2. p-n ўтиқнинг туннел тешилиши;
3. Иссиқлик тешилиш.

Қаршилиги юқори бўлган яримўтказгичларда $U_{\text{тун.тем}} > U_{\text{куч.тем}}$. Қаршилиги кичикроқ бўлган яримўтказгичларда туннел тешилиш кичикроқ кучланишларда бошланади: $U_{\text{тун.тем}} < U_{\text{куч.тем}}$. Туннел тешилиш шароитида лам тескари токнинг хусусияти кўчкисимон тешилиш шароитидагидан фарқ қилмайди.

Кўчкисимон тешилиш қалинлиги катта бўлган p-n ўтикларда содир бўлади. Бундай ўтикка катта кучланиш берилганда ундаги эркин заряд ташувчилар ўз Паракатлари давомида етарлича катта кинетик энергия оладилар ва атомдаги валент электронларни боғланишлардан уриб чиқарадилар. Натижада янги электрон-ковак жуфтлари Посил бўлади ва бу жараён янги заряд ташувчилар иштирокида давом этади.

Зарбавий ионланиш деб аталадиган бу Подиса р-п ўтиқдаги ток-нинг кўчкисимон ортишига, яъни кўчкисимон тешилишга олиб келади. Кўчкисимон тешилишнинг юз бериши учун икки шарт бажарилиши зарур: р-п ўтиқнинг кенглиги, юқорида қайд этилганидек, етарли даражада кенг бўлиши керакки, заряд ташувчилар ундан ўтиш давомида бир неча марта кристалл панжарасига урилиш имкониятига эга бўлсинлар; р-п ўтиқдаги майдон кучланганлиги зарбавий ионлашиш Подисаси содир бўлиши учун етарли бўлиши керак. Кўчкисимон тешилишни баёлаш учун электрон ва коваклар сонининг кўчкисимон кўпайиш коэффиценти қўлланилади:

$$M = \frac{N_1 + N_2 + N_2'}{N_1} \quad (3.32)$$

бу ерда, N_2 -электронлар томонидан зарбавий ионланиш натижасида Посил бўлган зарралар сони, N_2' - коваклар томонидан ионланиш натижасида Посил бўлган зарралар сони, N_1 - беркитувчи қатламга келаётган зарралар сони. M - кўчкисимон кўпайиш коэффиценти р-п ўтиқка берилган тескари кучланиш U га, ва р-п ўтиқни Посил қилувчи яримўтказгичлар солиштирма қаршиликларига боғлиқ. Бу боғланишни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{куч.теши}} \right)^2} \quad (3.33)$$

бу ерда, р-Si ва n-Ge учун $v=3$ ва n-Si ва p-Ge учун $v=5$.

Тешилиш кучланишини қуйидаги боғланиш орқали топиш мумкин:

$$U_{куч.теши} = A\rho_\delta^m$$

бу ерда, ρ_δ - базанинг солиштирма қаршилиги, Ge учун $m \approx 0,6$ ва Si учун $m \approx 0,7$; n-Ge учун $A=83$; p-Ge учун $A=52$; n-Si учун $A=86$ ва p-Si учун $A=23$. Кўчкисимон тешилиш учун 3.8-расмда кўрсатилганидек, тескари токнинг кескин ортиб кетиши хосдир.

р-п ўтиқ яримўтказгич сиртига чиққан жойда сиртий заряд юзага келиб, р-п ўтиқдаги майдонни кескин ўзгартириб юбориши натижаси-да сиртий тешилиш юз бериши мумкин. Сиртий тешилиш жараёнига яримўтказгич

сиртига бевосита тегиб турган муПитнинг диэлектрик хоссалари Пам жуда кучли таъсир кўрсатади.

Яримўтказгич диодларни ишлаб чиқариш жараёнида р-п ўтик яримўтказгич сиртига чиққан жойларда идеал тоза сиртлар Посил қилишга доимо эришиб бўлмайди; сиртий зарядларнинг ишораси Пам кўпроқ тасодифий кўринишга эга бўлади. Яримўтказгич сирти хоссаларини барқарор қилиш Памда сиртий тешилиш эПтимоллигини камайтириш мақсадида диодларнинг сиртлари диэлектрик сингдирувчанлиги жуда юқори бўлган Пимояловчи моддалар (локлар) билан қопланади.

3.5. ТуПрилагич диодлар

ТуПрилагич диодлар саноат такрорийликларида (50-2000 Гц) ишлайдиган турли туПрилагич тузилмаларда қўлланилади.

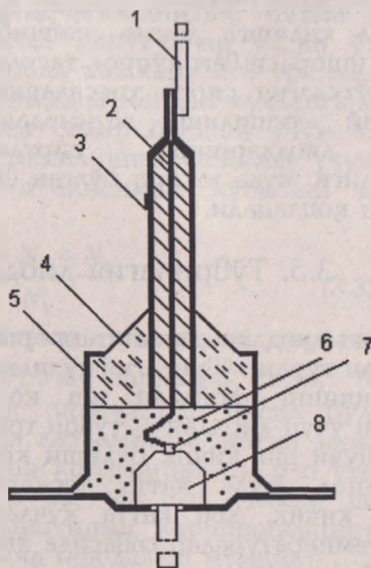
ТуПрилагичнинг фойдали иш коэффициентини (ФИК) юқори бўлиши учун диоддан J_T туПри ток ўтганида ундаги U_T кучланиш тушуви энг кичик бўлиши керак. Ундан ташқари туПрилагич диод жуда катта тескари қаршиликка эга бўлиши, хоП кичик, хоП катта кучланишларни туПрилай олиши, кенг температуралар соПасида ишлай олиши керак.

Бу талабга маълум даражада германий ва кремний диодлар жавоб беради.

Германий ва кремний диоди намунасининг тузилиши 3.9- ва 3.10-расмларда тасвирланган.

ТуПрилагич диодлар яшаш учун солиштирма қаршилиги 0,15-0,2 Ом·м, заряд ташувчиларининг диффузия йўли 1,2 мм бўлган германий ишлатилади. Олинадиган германий пластиналарининг диаметри ундан ўтган токнинг зичлиги тахминан 0,5 А/мм² дан ортмайдиган қилиб танланади. Пластиналар қалинлиги 0,4-0,6 мм атрофида бўлади. Кремний диодлар учун мос равишда солиштирма қаршилик 0,8 Ом·м, диффузия йўли узунлиги 0,3 мм атрофида бўлиши, ток зичлиги эса 1 А/мм² дан ортмаслиги керак!

Қудратли диодлар ажралиб чиқадиган иссиқликни атрофга сочиш мақсадида иссиқлик ўтказувчанлиги юқори бўлган металлдан ясалган махсус радиаторларга



ўрнатилади; атрофга

3.9-расм. Германий тўприлагич диод тузилмаси.

1 - ташқи сим; 2, 4, 6 - изоляторлар; 3 - штенгель;

5 - қоплама (металл балон); 7 - ички сим;

8 - p-n ўтикли кристалл.

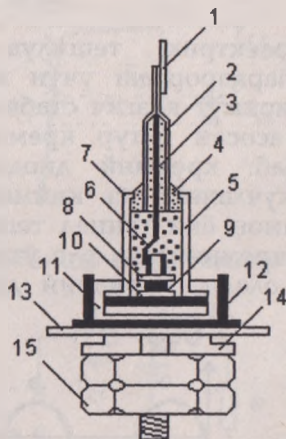
кўпроқ иссиқлик сочиш учун радиаторлари Паво ва суюқлик ёрдамида совутилиб туриладиган диодлар Пам мавжуд.

Кўпчилик тўприлагич диодларнинг қуввати 0,1 дан 10 Вт гача, тешилиш тескари кучланишлари эса, 50 В дан 2500 В гача, ўтиш вақтлари камқувватли диодлар учун 50 нс дан, қудратли диодлар учун 500 нс ларга боради ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с.}$)

Диодларни махсус тузилмаларга асосан кетма-кет улаш йўли билан юқори кучланишли тоқларни тўприловчи тўприлагич устунчалари ёки тўприлагич блоклари ясалади. Ана шу усулларга асосланиб қудратли юксак кучланишли тўприлагич блоклари ясалмоқда. Уларнинг қуввати 100 МВт ларга, тўприланган токи 1000 А ларга, кучланиши эса, 100 кВ ларга боради.

Яримўтказгич диодга асосланган тўприлагичнинг энг оддий тузил-маси 3.11-расмда тасвирланган.

Электр занжиридаги ўзгарувчан ток трансформатор ўрдамида ке-ракли U_T катталиккача юксалтирилиб, D диод орқали катта сипимли C_Φ конденсаторга берилади. Диод

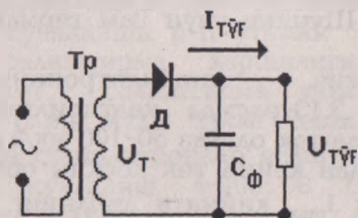


унга берилган ўзгарувчан

3.10-расм. Кремний тўприлагич диод. 1 - ташқи симлар; 4 - шиша изолятор; 5, 7 - қопама; 8, 10 - ток ўтказув туташувлари; 9 - p-n

ўтикли кристалл; 11 - изолятор; 12 - иссиқлик ажратгич;

13 - радиатор; 14 - ажратгич втулка; 15 - маПКамлагич гайка.



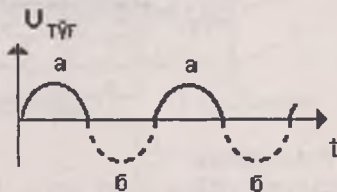
3.11-расм. Тўприлагич диодни улаш тузилмаси.

кучланишнинг мусбат яримдавида ўзидан электр токи ўтказиб C_Φ конденсаторни (3.12-расм) зарядлайди. Манфий яримдаврда, эса диодга тескари кучланганлик берилиб, у

орқали электрик ток ўтмайди. Шундай қилиб, занжирдан тўриланган, лекин пульсацияланувчи электр токи ўтади. C_{ϕ} конденсаторнинг вазифаси ана шу пульсацияланишларни маълум даражада текислаб туришдир.

3.6. Стабилитрон

Диоднинг электрик тешилув мароми амалиётда кучланишларни барқарорлаш учун кенг қўлланилади. Ана шундай диодлар яримўт-казгич стабилитронлар деб аталади. Стабилитронлар асосан n-тур кремнийдан ясалади. Бунга қуйидагилар сабаб: кремний диодларда тескари тоқлар кичик тескари кучланиш оз қийматта ўзгарган полларда кремний кўчкисимон ёки туннел тешилиш соласига кескин ўтиб кета олади, кремнийдаги p-n ўтик кенг температуралар соласида ишлай олади. Германий диодларда эса, тешилув



жараёни осонгина иссиқлик тешилув шаклига ўтиб кетади ва бу маромда

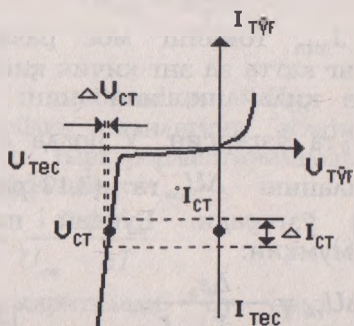
3.12-расм. Тўрилагич диоднинг ишлаш тамойили.

уларнинг тавсифномасида барқарор бўлмаган тик қисм пайдо бўлади. Шунинг учун лам германийдан стабилитрон ясалмайди.

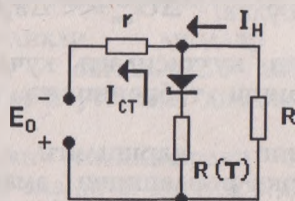
Яримўтказгич стабилитроннинг вольт-ампер тавсифномаси 3.13-расмда келтирилган. Тешилув турпун бўлган A нуқтада ток одатда 50-100 мкА атрофида бўлади.

Шу нуқтадан кейин ток кескин ортиб кетади ва унинг мумкин бўлган J_{\max} қиймати диоднинг P_{\max} қуввати билан чегараланади, холос:

$$J_{\max} = \frac{P_{\max}}{U_{cm}} \quad (3.34)$$



3.13-расм. Стабилитроннинг вольт-ампер тавсифномаси.



3.14-расм. Стабилитронни электр занжирга улаш тузилмаси.

Позирги замон стабилитронларида энг катта ток бир неча мА дан бир неча А ларгача боради.

Одатда кўчкисимон ёки туннел тешилув жараёнларида диоднинг тешилув кучланиши р-п ўтикни Посил қилаётган примўтказгичлар солиштирма қаршилигига боқлиқдир. Шунинг учун турли солиштирма қаршиликли n-тур кремнийни танлаб олиш йўли билан тешилув кучланиши $U_{Тес}$ Пар хил бўлган стабилитронлар яшаш мумкин. Ана шу йўл билан ишчи кучланиш 4-400 В оралиқда ётган стабилитронлар ясаса бўлади.

Стабилитронни электр занжирга улаш тузилмаси 3.14-расмда тасвирланган. Тузилмадаги чегараловчи r қаршилиқ стабилитроннинг R_i дифференциал қаршилигидан анчагина катта бўлиши керак. Стабилитроннинг тавсифномасида ишчи нуқта ишчи соланинг ўртасида, яъни стабилитроннинг иш мароми қуйидагича танлаб (3.13-расмга қаранг) олинади:

$$J_{cm} = \frac{J_{\max} + J_{\min}}{2} \quad (3.35)$$

бу ерда, J_{\max} , J_{\min} токнинг мос равишда барқарорлаш мумкин бўлган энг катта ва энг кичик қийматлари.

Энди фараз қилайлик, манбанинг кучланиши бирор сабаб билан $\Delta \varepsilon_0$ га ўзгарсин. У Полда стабилитрондаги ва юкламадаги кучланиш ΔU_{cm} га (3.13-расмдан $\Delta U_{cm} \ll \Delta \varepsilon_0$ эканлиги аниқ) ўзгаради. Бундай шароитда қуйидаги тенгликни ёзиш мумкин:

$$\Delta U_{cm} = \frac{\Delta \varepsilon_0}{1 + \frac{r}{R} + \frac{r}{R_i}} \quad (3.36)$$

Бундан, $\frac{r}{R_i} \gg 1$ бўлса, $\Delta U_{cm} \ll \Delta \varepsilon_0$ ни оламиз, яъни тузилманинг чиқиш нуқтасидаги кучланиш унинг кириш нуқтасидаги кучланиш тебранишига қараганда анча кам ўзгаради.

Истеъмолчининг қаршилиги ўзгарганда Пам кучланишининг барқа-рорлашиши амалга ошиши мумкин эканлигини кўрсатиш мумкин. Мабодо, ана шу сабаб билан юкламадаги ток ΔJ_n га ўзгарган бўлса, у Полда

$$\Delta U_{cm} = \frac{r \cdot \Delta J_n}{1 + \frac{r}{R_i}} \quad (3.37)$$

Ушбу формуладан Пам, $\frac{r}{R_i}$ нисбат қанча катта бўлса, барқарорлашиш шунча юқори бўлиши кўриниб турибди. Бироқ чегараловчи r қаршилик ортиқча катта қилиб олинса, унда кўп иссиқлик ажралиб чиққанлиги туфайли ортиқча қувват исроф бўлади. Шунинг учун Пам бу усулдан чексиз даражада фойдаланиб бўлмайди.

Стабилитроннинг яна муҳим параметрлари унинг дифференциал

$$r_{\text{диф.см.}} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta J_{cm}}$$

Памда статик

$$R_{cm} = \frac{U_{cm}}{J_{cm}}$$

қаршиликларидир.

Барқарорлаш кучланиши $U_{ст}$ стабилитроннинг температурасига боғлиқ эканлигини эслатиб ўтамиз. Буни Писобга олиш учун барқарорлаштириладиган кучланишнинг температуравий коэффициенти

$$\alpha_{cm} = \frac{1}{U_{cm}} \cdot \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T} \quad (3.40)$$

деган параметр киритилади. Бу ерда, $\Delta U_{ст}$ - катталик температура ΔT оралиқда ўзгарганда кучланишнинг $U_{ст}$ қийматидан чекланишидир.

3.7. Юқори такрорийликли диодлар

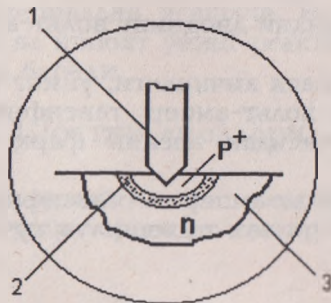
Юқоритакрорийликли диодлар деганда биз юқоритакрорийликли сигналларга ишлов бериш учун мўлжалланган қатор яримўтказгич диодларни тушунамиз. Бу гурупа:

модуллаштирилган сигналлардан қуйитакрорийликли сигналларни ажратиб оладиган детектор диодлар;

модуллаштирилган сигналларнинг ташувчи такрорийлигини ўз-гартириш (силжитиш) учун ишлатиладиган силжитувчи диодлар;

юқоритакрорийликли сигналларни модуллаштириш учун мўлжалланган модуллаштирувчи диодлар ва бошқа диодлар киради. Бу диодларнинг Паммаси юқоритакрорийликлар сопасида ишлайди.

Маълумки, пасттакрорийликларда диод занжиридаги ток фақат электрон-ковак ўтикнинг (R_1) Памда яримўтказгичнинг p- ва n-сопаларининг (r_6) фаол



қаршилиқларига бошлиқ бўлади.

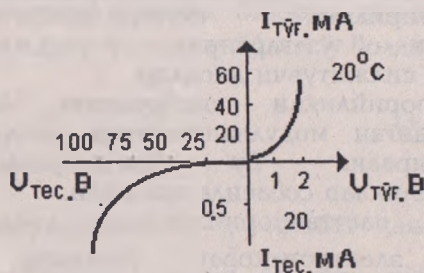
3.15-расм. р-п ўтик туташуви юзасининг шакли.

1 - игна; 2 - ўтиш сопаси; 3 - диод базасининг п-сопаси.

Юқоритакрорийликлар сопасида эса, ушбу параметрларга яна тўсибий ва диффузиявий сипимларнинг роли ҳам қўшилади. Ана шу параметрлар имкони борича қанча кичик бўлса, диодлар шунча юқорироқ такрорийликларда ишлай оладиган бўлади. Ундан ташқари, ноасосий заряд ташувчиларнинг яшаш вақти ҳам мумкин қадар кичик бўлмоли керак.

Диодларнинг такрорийлик хоссаларини яхшилаш усулларида бири туташув юзасини кичрайтириш орқали р-п ўтик сипимини камайитиришдир. Ана шунинг учун ҳам амалда туташувга нуқтавий шакл бериш йўли билан унинг диаметри кичрайтирилади. Масалан, шу йўл билан туташув диаметрини 10 мкм ларгача яқин қилиб (3.15-расм) олиш мумкин.

Заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини қисқартириш учун эса, одатда диоднинг базаси олтин киришмаси билан бойитилади. Олтин киришмаси заряд ташувчиларнинг рекомбинациясини кучайтириб, уларнинг яшаш вақтини 10^{-8} с ларгача қисқартириб бера олади.

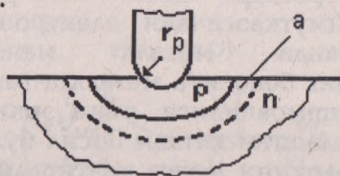


3.16-расм. Пақикий диоднинг вольт-ампер тавсифномаси.

р-п ўтикнинг юзаси кичиклиги, унинг тузилиши бир жинсли эмаслиги диод вольт-ампер тавсифномасининг идеал р-п ўтик тавсифномасидан кескин фарқ қилишига (3.16-расм) олиб келади.

Диод вольт-ампер тавсифномасининг тескари тармоқда тескари ток то тешилув кучланишига қадар текис

ортади. Тўри тармоқдаги токни р-п ўтик билан база орасидаги қаршилиқ чегаралаб туради. Чунки, бу қаршилиқ кўпинча р-п ўтиқнинг юзаси ниҳоятда кичик бўлганлиги туфайли унинг қаршилигига қараганда каттароқ бўлади. Бу ерда гап 3.17-расмдаги шартли равишда узлукли ёй ичига олинган "а" соҳанинг қаршилиги Пақида бормоқда.



3.17-расм. Нуқтавий диод базасининг сизиш қаршилигини Писоблашга оид.

Адабиётларда бу қаршилиқ базанинг сизиш қаршилиги R_s деб юритилади. Нуқтавий диод учун уни қуйидаги тенглиқдан аниқлаш мумкин:

$$R_s = \frac{\rho}{2d} \quad (3.41)$$

бу ерда, ρ - база моддасининг солиштирма қаршилиги; d - металл-р-соҳа туташувининг диаметри.

Кўпчилик хил диодларда юқоритакрорийликларда кетма-кет қар-шилиқ R_s ортиши, дифференциал қаршилиқ $r_{\text{диф}}$ эса, камайишини эслатиб ўтамиз. Шу сабабли маълум чегаравий такрорийликка етилганда диоднинг тўприлаш қобилияти кескин тушиб кетади.

Диоднинг такрорийликлар тавсифномасини яхшилашнинг яна бир йўли бу, базани солиштирма қаршилиги кичик материалдан ясашдир. Бу усул диоднинг диффузиявий сипими ва ниҳоят унинг реактив қаршилигини кичрайтиришга имкон беради.

3.8. Шоттки диодлари

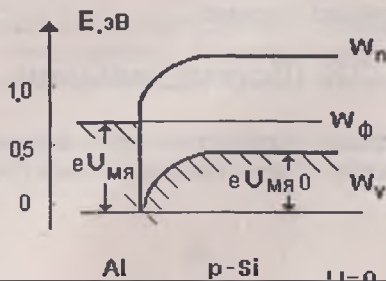
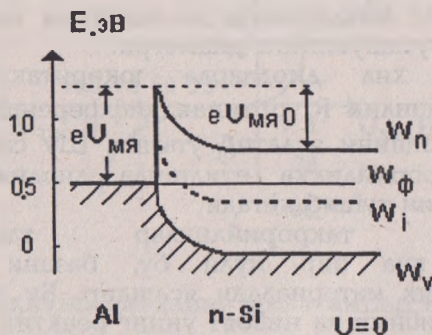
Металл билан яримўтказгич бевосита туташувга келтирилган вақтда улар орасида электронлар алмашиш

Подисалари содир бўлади. Бунинг натижасида металл билан яримўтказгич орасида туташув потенциаллар фарқи, яъни потенциал тўсиқ юзага келади.

Ана шу Подисаларни батафсилроқ кўриб чиқайлик. Электронларнинг металлдаги чиқиш иши χ_m яримўтказгичдаги $\chi_{яу}$ га нисбатан катта бўлсин, яъни $\chi_m > \chi_{яу}$. Бундай металл билан n-тур яримўтказгич орасида яхши электрик туташув юзага келтирилса, яримўтказгичдан электронлар металлга қараб ўтади. Натижада металл манфий зарядланади. Яримўтказгичнинг бевосита металлга тегиб турган қатламида электронлар етишмовчилиги, яъни эркин заряд ташувчилар билан кам бағаллашган қатлам ҳосил бўлади. Бу эса, туташув потенциаллар фарқини юзага келтиради ва натижада металл билан яримўтказгичдаги Ферми сатҳлари тенглашиб (3.18-расм ва 3.19-расм), динамик мувозанат қарор топади. Яримўтказгичнинг металлга ёндошган қисмида Пажмий заряд ҳосил бўлиши натижасида электрик майдон юзага келади ва энергиявий сатҳлар 3.18а ва 3.18 б-расмларда кўрсатилганидек эгилади. Агар электронларнинг чиқиш иши металлдан кўра ковак яримўтказгичда каттароқ бўлса, уларнинг туташувида 3.19-расмда

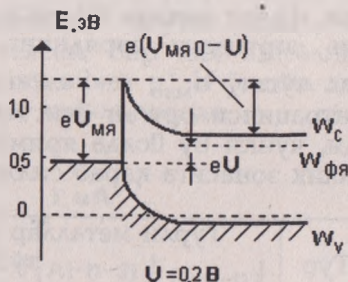
а)

б)



3.18-расм. Яримўтказгич-металл туташуви Полида энергетик сатпларнинг эгилиши:

а) n-яримўтказгич; б) p-яримўтказгич.



3.19-расм. Металл-яримўтказгич тузилмага тўпри кучланиш берилганда потенциал тўсиқнинг пасайиши.

тасвирланганидек Подиса юз беради, яъни электронлар металлдан яримўтказгичга ўтиб туташув яқинида манфий зарядлар қатламини Посил қилади. Бу эса, туташув потенциал тўсиби $U_{МЯ}$ ни юзага келтиради. $U_{МЯ}$ -электрон металлдан (Ферми сатплдан) яримўтказгичнинг ўтказувчанлик зонасига ўтаётганда ошиб ўтиши зарур бўлган потенциал тўсиқнинг баландлиги; $U_{МЯ0}$ -тескари йўналишда ўтувчи электронлар учун потенциал тўсиқнинг бадаллиги.

Немис олими В.Шоттки металл билан яримўтказгич орасида Посил бўладиган туташув потенциаллар фарқи металл (H_{Me}) ва яримўтказгичдаги ($H_{яў}$) чиқиш ишлари айирмасининг электрик зарядга нисбатига тенг эканлигини кўрсатди:

$$U_{МЯ} = \frac{H_{Me} - H_{яў}}{e} \quad (3.42)$$

Демак, ана шу йўл билан p-n ўтикка ўхшаш униқутбий хусусиятга эга бўлган, яъни токни бир томонлама

ўтказадиган яримўтказгич тузилмаси Посил қилиш мумкин экан.

Потенциал тўсиқ баландлиги одатда тажриба йўли билан аниқланади, уни назарий йўл билан Писоблаш мураккаб масаладир. 3.1-жадвалда $eU_{\text{мя}}$ потенциал тўсиқнинг баъзи металл ва яримўтказгичлар жуфти учун тажрибада топилган қийматлари келтирилган. Тўсиқ баландлиги $U_{\text{мя}}$ киришмаларнинг концентрациясига Пам, температурага Пам боғлиқ бўлмасдан, фақат металл билан яримўтказгич турига ва яримўтказгич сиртидаги заряднинг зичлигига боғлиқ холос. Потенциал тўсиқ $U_{\text{мя0}}$ га келсак, унинг баландлиги донорлар концентрацияси ортган ёки температура пасайган сари орта боради, чунки бу Полда яримўтказгичдаги Ферми сатПи ўтказувчанлик зонасига қараб силжийди.

3.1-Жадвал

Яримўтказгич	Тур	Турли металллар учун потенциал тўсиқ, $U_{\text{мя}}$ нинг қийматлари, эВ					
		0,72	0,8	0,9	0,45	0,78	
Si	n						
	p	0,58	0,34			0,54	
Ge	n	0,8	0,9			0,54	0,64
	p		0,42	0,9		0,5	0,55

Агар ана шундай металл-яримўтказгич тузилмага тўри U кучланиш берилса, электроннинг яримўтказгичдан металлга ўтишига қарши-лик кўрсатувчи $U_{\text{мя}}$ потенциал тўсиқ U қийматга (3.19-расм) пасаяди. Яримўтказгичдаги Ферми сатПи $E_{\text{фя}}$ юқорига қараб eU га силжийди. Шундай қилиб, тўри ток бу Полда яримўтказгичдаги электронлар металл туташувга қараб ўтиши натижасида Посил бўлади.

Идеаллаштирилган металл-яримўтказгич туташув учун вольт-ампер тавсифнома p-n ўтикникига ўхшаш бўлади:

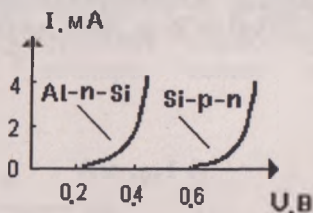
$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (3.43)$$

Фақат бу ерда тескари ток p-n-ўтишдаги тескари токдан фарқ қилади:

$$I_0 = SBT^2 \exp\left(-\frac{eU_{\text{мж}}}{kT}\right) \quad (3.44)$$

бу ерда, S-туташув юзаси; B-ўзгармас катталиқ бўлиб, n-тур кремний учун $110 \text{ A}/(\text{см}^2 \cdot \text{Кл}^2)$. Температураси, юзалари ва n-тур яримўтказгичдаги киришмалар концентрацияси бир хил бўлган шароитда Шоттки тўсиқнинг токи p^+ -n ўтиқниқига қараганда анча катта бўлади. Масалан, $T=300\text{K}$, $S=10^{-4} \text{ см}^2$ ва $N_0=10^{15} \text{ см}^{-3}$ бўлганда p^+ -n ўтиқ учун $I_0=2 \cdot 10^{-9} \text{ A}$ бўлади.

Тўпри токка келсак, бир хил катталиқдаги тўпри ток олиш учун Шоттки тўсиқига p^+ -n ўтиққа қараганда камроқ (3.20-расм) кучланиш кифоя қилади.



3.20-расм. Идеал p-n ўтиқнинг вольт-ампер тавсифномаси.

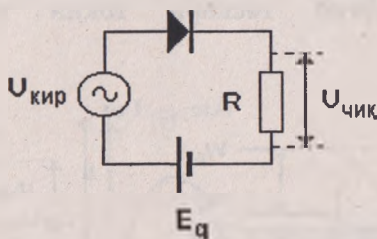
Бунга сабаб Шоттки туташувида камбағаллашган қатламдаги рекомбинация токининг жуда кичик бўлишидир. Чунки бу полда тўпри ток асосий заряд ташувчиларнинг паракати натижасида юзага келади, ноасосий заряд ташувчиларнинг пуркалиши эса содир бўлмайди. Шу сабабдан, металл-яримўтказгич туташуви фақат тўсиқий сипимга эгадир. Диффузиявий сипимнинг йўқлиги металл-яримўтказгич туташув асосида p-n ўтиқли диодларга қараганда тезроқ ишловчи диодлар яшаш имконини беради.

3.9. Туннел диодлар

Агар киришмалар концентрацияси юқори ($\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) бўлган яримўтказгичдан p-n тузилма яратилса, у оддий p-n ўтиқнинг тавсифномасидан тубдан фарқ қиладиган (3.21-расм) пайри табиий тавсифномага эга бўлади. Оддий p-n ўтиқлардан фарқли равишда, бундай p-n ўтиқлар электр токини тескари йўналишда ҳам яхши ўтказаверади.

(3.22 в-рasm) қолади. Бу шароитда электронлар n -соладан p -солага туннел йул билан ўтиб $I_{T, \text{тун}}$ тўпри токни Пoсил қилади. Бу ток n -соланинг Ферми p -сола валент зонасининг юқори сатПига тенглашган шароитда энг катта $I_{T, \text{max}}$ қийматга эришади. U_T ни бундан кейин ортгирсак n - ва p -солалардаги зона-ларнинг устма-уст тушиши камаяди ва натижада $I_{T, \text{тун}}$ камайиб, ниПо-ят, нолга (3.22 г-рasm) яқинлашади. Бироқ амалда яримўтказгичдаги ёт киришмаларнинг энергиявий сатПлари таъсирида юзага келувчи ток ва токнинг диффузиявий ташкил этувчиси мавжудлиги туфайли $U_{T, \text{тун}}$ нолгача (3.22 г-рasm) камаяди. Кучланишни бундан кейин яна ортирилса, ток соф диффузиявий токка айланиб кетади.

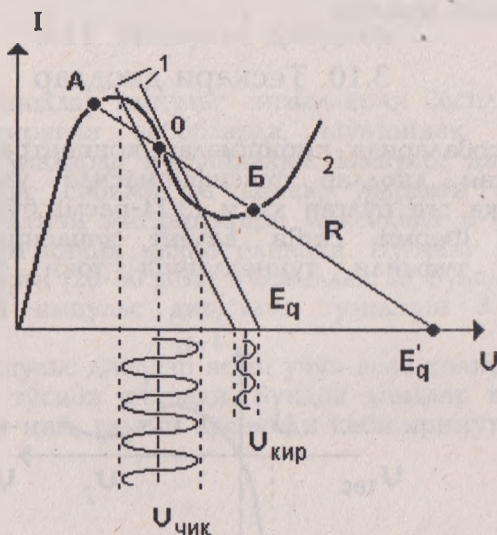
Туннел диоднинг асосий параметрлари бу - унинг энг катта нуқтадаги $I_{T, \text{max}}$ туннел токи ва энг катта токнинг энг



кичик I_{min} токга нисбати, Памда диоднинг тавсифномасидаги токнинг камайиш қисми марказидаги манфий ўтказувчанлиги $s = \frac{dI}{dU}$ га тенг бўлади. p - n солалардаги киришмалар концентрацияси ортган сари $I_{T, \text{max}}$. Пам орта боради.

3.23 а-рasm. Туннел диоддан кучайтиргич сифатида фойдаланиш.

Туннел диодларнинг манфий ўтказувчанликка эга эканлиги улардан тебранишларни Ўсил қилиш, кучайтириш, Ўамда сигналларни ўзгар-тириш ва қайта улаш мақсадларда фойдаланишга имкон беради. Масалан, 3.23 а-расмда туннел диодни кучайтиргич сифатида қўлланиш тузилмаси келтирилган. 3.23 б-расмда эса, бу кучайтиргичнинг ишлаш



тамойили график усудда тасвирланган.

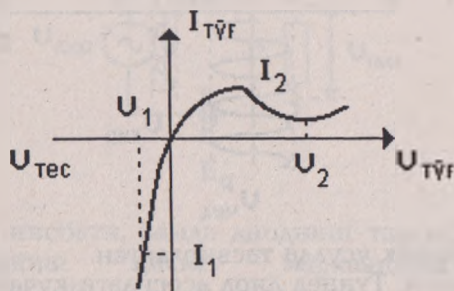
3.23 б-расм. Туннел диод асосидаги кучайтиргичнинг ишлаш таможили.

Туннел диодда токни асосий заряд ташувчилар Ўсил қилганлиги ва уларнинг р-п ўтиқдан ўтиши ортиқча заряднинг тўпланишига олиб келмаганлиги сабабли бу диод тез ишлайдиган бўлади. Туннел диоднинг чегаравий такрорийлиги фақат р-п ўтиқнинг сипимига, база қаршилигига ва чиқиш сипимларининг индуктивлигига бошлиқ бўлиб, юзлаб гигагерцларга боради. Диоднинг тавсифномаси температурага қараб жуда заиф ўзгаради. Улар жуда кам қувват истеъмол қилади, радиациянинг таъсирига чидамли, митти ва енгил қилиб ясалиши мумкин. Бироқ, туннел диодлардан ясалган асбобларда кириш электроди билан чиқиш электроди орасида кучли электрик боғланиш борлиги уларнинг катта камчилигидир.

Туннел диодлар яшаш учун ишлатиладиган материаллар технология йўли билан юпқа, юзаси ва сипими кичик p-n ўтиклар олишга имкон берадиган Памда заряд ташувчиларнинг Паракатчан бўлиши керак. Бундай материалларга индий фосфид, индий сурма, галлий сурма, галлий арсениди, германий киради. Ана шундай йўл билан 30-50 ГГц такрорийликларгача ишлай оладиган туннел диодлар яшаш мумкин.

3.10. Тескари диодлар

p-n соПаларида киришмалар концентрацияси $10^{18} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$ бўлган диодлар тавсифномасида умуман манфий қаршиликка эга бўлган қисм (3.24-расм) бўлмайди. Бундай шароитда Ферми сатПи валент зонасининг қирПоПиди ётганлиги туфайли туннелланиш токи фақат тескари



кучланиш берилгандагина ўтиши мумкин. Бундай
3.24-расм. Тескари диоднинг вольт-ампер тавсифномаси.

диодларнинг ток ўтказадиган йўналиши вольт-ампер тавсифномасининг тескари тармоПига, ток беркитиладиган йўналиши эса, тўПри тармоПига мос келади. Ана шунинг учун Пам диодлар тескари диодлар деган ном олган.

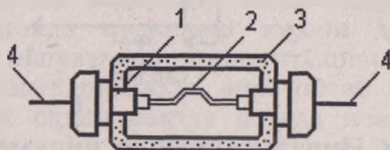
Тескари диодда p-n ўтикнинг диффузиявий сипими $C_{\text{диф}} = 0$ бўлганлиги ва диод базасида зарядлар тупланмаслиги сабабли бундай диодлар оддий диодларга қараганда юқорироқ такрорийликларда юқорида зикр қилиб ўтилган яримўтказгич материаллардан ясалади.

Тескари диодлар Пақида тасаввур пайдо қилиш учун галлий арсенидидан ясалган тескари диоднинг параметрларини эслатиб ўтамиз: ток ўтказадиган йўналишдаги кучланиш $U_1 < 0,15$ В бўлганда, энг катта ток $J_{\max} = 3$ мА, токни беркитадиган йўналишда кучланиш $U_2 < 0,9$ В бўлганда, ток $J_{\min} = 0,05 \div 0,15$ мА бўлади.

3.11. Импульс диодлар

Импульс диодлар импульс сигналларни Посил қилувчи, уларни ўзгартирувчи асбобларда, шунингдек калит ва мантиқий тузилмаларда қўлланилади. Импульс диодлардаги р-п ўтикларнинг сипими ва демак, улардаги ток ўтиш жараёнлари вақтини қисқартириш мақсадида р-п ўтиклар юзаси жуда Пам кичик қилиб олинади. Шунинг учун улар кичик қувватларга (20-30 мВт) мўлжалланган бўлади. Одатда қўлланиладиган импульс диоднинг тузилиши 3.25-расмда келтирилган.

Одатда импульс диодлар яшаш учун асос қилиб р-п ўтик Памда Шоттки тўсиби олинади. Бундай диодлар яшаш учун германий, крем-ний, галлий арсениди каби яримўтказгичлар ишлатилади.



3.25-расм. Импульс диод тузилмаси.

- 1 - р-п ўтиккли кристалл; 2 - вольфрамли қисма туташув;
3 - шиша қоплама; 4 - металл симлар.

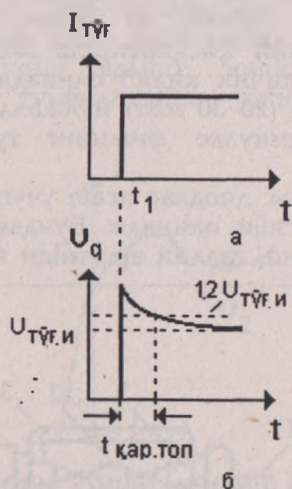
Саноатда яна диод йиПмалари ва матрицалари Пам ишлаб чиқарилади. Бундай йиПмалардаги диодлар сони 4 дан 16 гача бўлиб, улар ўзаро турли тузилмалар асосида электрик уланган бўлади.

Импульс диодлар қаторига зарядлар тўпловчи диодлар Пам (қуйироққа қаранг) киради. Импульс диодларнинг 3 хил

параметрлари мавжуд: статик параметрлар, фойдаланишда чегаравий маром параметр-лари ва импульс параметрлари.

Дастлабки икки параметрлар бошқа диодларникидан деярли фарқ қилмайди. Шу сабабли биз импульс диодлар учун мушум бўлган импульс параметрлари Пақида батафсилроқ тўхталиб ўтамиз.

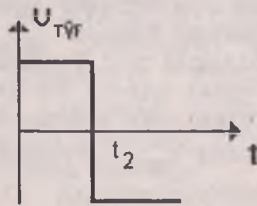
Импульс диодлари учун импульс параметрлари ичида энг мушуми, бу диодда тўпри кучланишнинг қарор топиш вақти $t_{қ.т}$ дир. Бу параметр базага пуркалган заряд ташувчиларнинг ўртача диффузия вақти ва бу диффузия натижасида база қаршилигининг



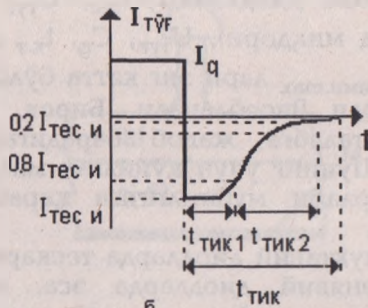
3.26-расм. Импульс диоднинг импульс параметри.

камаиш суръати билан белгиланади. Бу параметр 3.26-расмда тасвирланган.

Яна бир мушум импульс параметри - диод тескари қаршилиги-нинг тикланиш вақти $t_{тикл}$ дир. Бу вақт икки ташкил этувчини ўз ичига олади. Бири ўзгармас тескари ток фазасининг давом этиш вақти $t_{тикл.1}$, иккинчиси ўтувчи тескари токнинг камаиши вақти $t_{тикл.2}$ дир. Бу вақтлар мос равишда $0,8J_{тес}$ ва $0,2 J_{тес}$ ток қийматларга эришиши



а



б

3.27-расм. Диод тескари қаршилигининг тикланиш вақтини ўлчаш.

Импульс диоднинг бундай хусусиятига унда содир бўладиган физикавий Подисалар сабабчидир. Диодга тўпри кучланиш берилганда пуркалиш юқори даражада ошиб, ноасосий заряд ташувчилар концентрацияси асосий заряд ташувчилар концентрациясидан анча ортиб кетади. Шундай қилиб, тўпри ток оққан вақтда базада ноасосий зарядлар (масалан, коваклар) тўпланиб диод қаршилигини камайтиради.

Диодга тескари кучланиш берилганда тўпланган коваклар диод орқали тескари ток ўтишини таъминлайди. Бу ток маълум бир вақт давомида статик тескари тўйиниш J_s токидан анча катталигича қолади. Шу сабабдан диодда ток кескин тушмасдан, биз юқорида кўргандек тескари токнинг аста-секин тикланиш Подисаси содир бўлади.

Импульс диодларнинг тикланиш вақтини қисқартириш мақсадида баъзи диодларнинг базасига олтин киришмаси киритилади. Бу киришма ноасосий заряд ташувчилар

рекомбинациясини кучайтириб диоднинг тикланиш вақтини 10^{-9} с гача қисқартириб беради.

Импульс диодларда р-п ўтиқнинг сифими имкон борича кичик бўлиши керак; одатда бу сифим пикофарадалар ёки унинг ўндан бир улушлари атрофида бўлади.

Тикланиш вақти $t_{\text{ТИКЛ}}$ га қараб диодлар миллисекундли ($t_{\text{ТИКЛ}} > 0,1$ мс), микросекундли ($0,1 \text{ мс} < t_{\text{ТИКЛ}} < 0,1$ мкс) ва наносекундли ($t_{\text{ТИКЛ}} < 0,1$ мкс) турларга ажратилади.

Агар импульс диоднинг $J_{\text{тес}}$, $U_{\text{туг}}$, $t_{\text{ТИКЛ}}$, Q_6 (базада тўпланган заряд миқдори), $U_{\text{туг}}$, C_g , $t_{\text{к.т}}$ лари энг кичик ва U_{max} , $J_{\text{туг.max}}$, $J_{\text{имп.max}}$ лари энг катта бўлса, бундай диод энг яхши параметрли ҳисобланади. Бироқ бир вақтда барча параметрлари талабга жавоб берадиган диодлар яшаш мумкин эмас. Шунинг учун қўйилган мақсад учун диоднинг қайси параметрлари мувоимлигига қараб у ёки бу диод танлаб олинади.

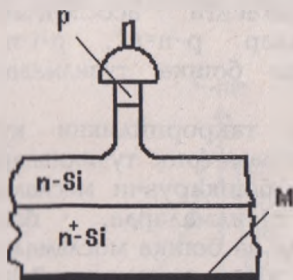
Масалан, нуқтавий диодларда тескари токнинг сакраши кичик, диффузиявий диодларда эса, энг катта бўлади. Тескари токнинг камайиш тезлиги эса аксинча, нуқтавий диодда кичик, диффузиявий диодда энг каттадир. Демак, ишлаш тезлиги бир хил бўлган диодлар ичида нуқтавий диодларда ясси диодларга қараганда $t_{\text{ТИКЛ}}$ каттароқ, Q_6 эса, кичикроқ бўлар экан.

Импульс диодлар сифатида Шоттки диодлари Памда р-п ўтиқли заряд тўловчи диодлар ишлатилади.

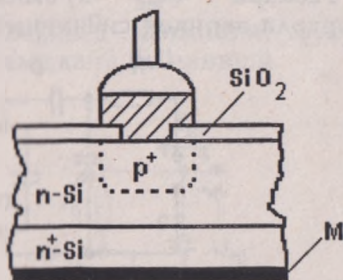
Шоттки импульс диодларида номувозанатий зарядлар базада тўпланмайди. Шу сабабдан унинг импульс тавсифномалари фақат Шоттки тўсибининг $C_{\text{тўс}}$ сифими га ва электронларнинг юқори қаршиликка эга бўлган кремний қатламини босиб ўтиш вақтига (у тахминан 10^{-11} с га тенг) бошлиқ бўлади. Шоттки импульс диодлари ўзларининг импульс тавсифномалари бўйича Позирги вақтда бошқа турдаги диодларга қараганда энг яхшисидир. Шоттки диодлари 10-15 ГГц такрорийликларгача ишлаши мумкин.

Заряд тўловчи диод (ЗТД). Заряд тўловчи диод тузилмаси мезадиффузиявий диодниқига (3.28-расм) ёки эпитаксиал-планар диодниқига (3.29-расм) ўхшайди. Диод базасида киришмалар нотекис тақсимланганлиги учун диод базасида пуркалган заряд ташувчиларни секинлаштирувчи электрик майдон юзага келади.

Пурқалган коваклар базада ички майдон таъсирида р-п ўтикка қариб сурилади ва натижада базанинг п-сопасида мусбат заряд тўпланади. Дiodдаги кучланиш тўпри йўналишдан тескари йўналишга ўзгарганда диоднинг қаршилиги $t_{\text{ТКА.1}}$ вақт давомида кичиклигича қолади, тўпланган заряд ташувчилар р-сопага экстракцияланади ва диоднинг тескари токи кескин камаяди.



3.28-расм. Заряд тўловчи диод тузилмаси.



3.29-расм. Эпитаксиал-планар диод тузилмаси.

Базанинг ички майдони ковакларнинг р-п-ўтик орқали экстракцияланишига ёрдам қилганлиги туфайли тескари токнинг камайиш вақти $t_{\text{ТКА.2}}$ кескин қисқаради, демак, диод тез ишлайди. Заряд тўловчи диодлар такрорийликларни йўнайтиргич ва бўлгич мосламаларда, диод учайтиргичларда, мантиқий ва модуловчи тузилмаларда,

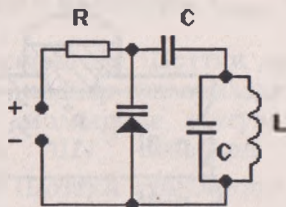
импульслар Посил қилгич тузилмаларда ва шунга ўхшаш асбобларда ишлатилади.

3.12. Варикаплар

Варикап электрик йўл билан бошқариладиган сипим сифатида қўлланилади. Унинг ишлаш тамойили электрик ўтикниң сипими тескари кучланишга боқлиқ Полатда ўзгариши Подисасига асослангандир. Варикаплардаги электрик ўтиклар р-n-n⁺, р-i-n, металл-диэлектрик-яримўтказгич ва бошқа тузилмаларга ўхшаш мураккаб тузилишга эга.

Варикаплар такрорийликни кучайтирувчи, бўлувчи, кўпайтирувчи параметрик тузилмаларда, тебраниш контури такрорийлигини бошқарувчи мосламаларда, такрорийликни модуловчи тузилмаларда, бошқариладиган фаза айлантиргичларда ва бошқа мосламаларда қўлланилади.

Варикапни улаш тузилмаси 3.30-расмда тасвирланган. Варикапга тескари кучланиш R ажратгич қаршилиқ орқали берилади. Бу қаршилиқ варикап сипимининг ток манбаининг кичик ички қаршилиги томонидан шунтланишига йўл қўймайди. Тескари U_{тес} кучланишнинг катталигини ўзгартириш орқали варикап сипимини бошқариш мумкин.



3.30-расм. Варикапни улаш тузилмаси.

Варикаплар ясаш учун асосан кремний ишлатилади. Кейинги вақтда галлий арсениди Пам қўлланимоқда.

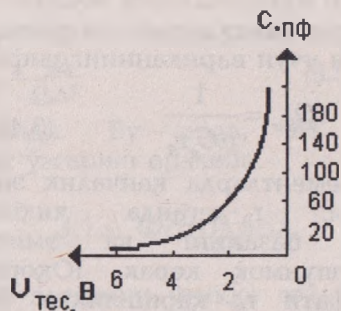
Варикап сипимини қуйидаги формула билан ифодалаш мумкин:

$$C = C_0 \left(1 + \frac{U_{\text{мес}}}{U_x} \right)^{\gamma} + C_B \quad (3.45)$$

бу ерда, C₀-ташқи кучланиш нолга тенг (U=0) бўлганди варикапнинг сипими; C_B-варикапнинг чиқиш симлари

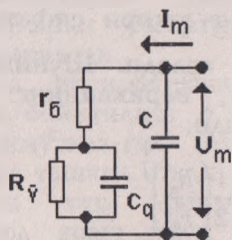
орасидаги кучланишга бошлиқ бўлмаган сипими; γ -электрик ўтиқдаги киришмалар концентрациясининг тақсимотига қараб 1/2 билан 1/3 орасида ётади. Варикап сипимининг унга берилган тескари кучланишга қараб ўзгариши 3.31-расмда тасвирланган.

Варикапнинг муҳим параметрларидан яна биттаси бу унинг сифатидир. Варикапнинг сифати деб, сигналнинг берилган теорорийлигидаги қаршилик сипимининг берилган қийматидаги шерициянинг йўқолишига сабаб бўладиган қаршиликка нисбатига



лигилади.

3.31-расм. Варикап сипимининг тескари кучланишга бовланиши.



3.32-расм. Варикапнинг эквивалент тузилмаси.

Варикапни 3.32-расмда берилган оддий эквивалент тузилма билан тасвирлаш мумкин. Шу тузилмадан фойдаланиб варикапнинг сифатини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

3.33-расм. p⁺-n тур фотодиод тузилмаси.

Фотодиод қайси тўлқин узунлигидаги ёрушликка мўлжалланганига қараб у ёки бу яримўтказгич танлаб олинади. 3.33-расмда кўрсатилган диод n-тур кремний пластинкасига бор киришмасини диффузиявий киритиш орқали олинган. Умуман фотодиодлар яшаш учун Пар хил турдаги электрик ўтик; кескин симметрик p-n ўтик, базанинг қалинлиги бўйлаб киришмалар концентрацияси ўзгариб борадиган p-n ўтик(ичига электрик майдон жойлаштирилган p-n ўтик), p-i-n ўтик, металл-яримўтказгич ўтиги(Шоттки тўсилий диоди), гетероўтик ва бошқалар асос қилиб олинади.

Кўриниб турибдики, тузилиш жиқатидан фотодиод оддий яримўтказгич диодлардан фарқ қилмас экан. Шунинг учун унинг вольт-ампер тавсифномаси ҳам Пақиқий диодникига деярли ўхшаш бўлади.

Фотодиоднинг иш маромида унга тескари кучланиш берилади. Бу шароитда агар фотодиодга ёрушлик тушмаса, у орқали заиф тўйиниш токи ўтиб туради. Ана шундай шароитда фотодиод базасига ёрушлик тушса ёрушлик квантлари таъсирида электрон-ковак жуфтлари Посил бўлади. Айниқса, базанинг ёрушлик тушаётган ташқи юзасида электрон-ковак жуфтлари Посил бўлади. Бу Посил бўлган зарядлар база бўйлаб p-n ўтика қараб диффузияланади. Бу ерга етиб келган коваклар E_к туташув майдони таъсирида p-солага ўтиб асбобда тескари ток-ни кучайтиради. Базада Посил бўлган коваклар p-n ўтика етиб бориши учун базанинг қалинлиги d ковакларнинг диффузия йўли L_p дан кичик бўлмоли керак. Базанинг қалинлиги ана шу шартни қондириши керак.

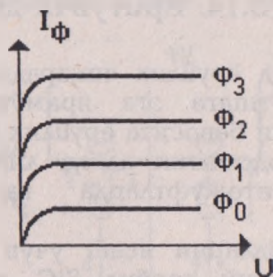
Фотодиод вольт-ампер тавсифномасини қуйидагича кўринишда ёзиш мумкин:

$$J = J_{\phi} - J_0 \left[e^{\frac{e(JR_n - U)}{kT}} - 1 \right] \quad (3.52)$$

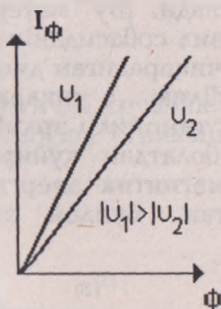
бу ерда, J-умумий ток, J_φ-ёрушлик таъсирида юзага келган ток; J₀-қо-ронлида турган фотодиоднинг тўйиниш токи; R_n-юклама қаршилиқ; U-фотодиодга берилган тескари кучланиш.

Фотодиоднинг юқоридаги формулага асосан чизилган намунавий вольт-ампер тавсифномаси 3.34-расмда келтирилган. Унинг намунавий энергиявий тавсифномаси расм. 3.35-расмда берилган. Фотодиоднинг яна муҳим тавсифномаларидан нисбий спектрал тавсифномасини, такрорийлик тавсифномасини эслатиб ўтиш керак. Фотодиоднинг спектрал тавсифномасини керакли примўтказгични танлаб олиш йўли билан бошқариш мумкин.

Фотодиоднинг такрорийлик тавсифномасига келганда, бу жуда муҳим тавсифномадир. Фотодиоднинг инертлиги қатор омилларга боғ-лиқ бўлиб, улар ичида энг муҳими р-п ўтик сийимининг зарядланиш вақти, шунингдек заряд ташувчиларнинг р-п ўтиккача диффузияланиш вақти $t_{диф}$ ва заряд ташувчиларнинг р-п ўтикдаги Пажмий заряд соҳасини ўтиш вақти $t_{хэ}$ дир. Кўпчилик полларда р-п ўтикдаги Пажмий заряд соҳаси анчагина юққа бўлганлигидан, фотодиоднинг тезкорлиги кўпроқ заряд ташувчиларнинг базадаги диффузия вақтига боғлиқ бўлади. Хозирги вақтда 10 ГГц лар атрофидаги такрорийликларда ишлайдиган фотодиодлар мавжуд.



3.34-расм. Фотодиоднинг намунавий вольт-ампер тавсифномаси.



3.35-расм. Фотодиоднинг намунавий энергиявий тавсифномаси.

Фотодиоднинг параметрлари деганда, унинг меъёрий ишчи куч-ланиши $U_{иш}$, берилиши мумкин бўлган энг катта тескари кучланиши, ёрушликка сезгирлиги, чегаравий ишлаш такрорийлиги, сеза оладиган чегаравий ёрушлик оқими ва D сезгирлиги тушунилади.

Кейинги вақтда фотодиодларнинг ана шу параметрларини яхшилаш мақсадида турли-туман тузилишга эга бўлган фотодиодлар турлари ишлаб чиқилган. Буларга базасида ички электрик майдони бўлган фотодиодлар, $p-i-n$ турдаги фотодиодлар, Шоттки тўсилий фотодиодлар, ва нишоят, кўчкисимон фотодиодларни мисол сифатида келтириш мумкин. Биз бу диодлар устида батафсил тўхталиб ўта олмаймиз. Қизиққан ўқувчи булар Пақида махсус адабиётдан ўқиб олиши мумкин.

Фотодиодлар Позирги замон электроникасининг муҳим тармони бўлган оптоэлектроникада ёритувчи диод билан бир қаторда асосий элемент сифатида катта аҳамиятга эга.

3.14. Ёритувчи диод

Ёритувчи диод ёрушлик чиқарадиган ва битта ёки бир неча электрик ўтишга эга яримўтказгич асбоб бўлиб, электрик энергияни бевосита ёрушлик нурига айлантиради.

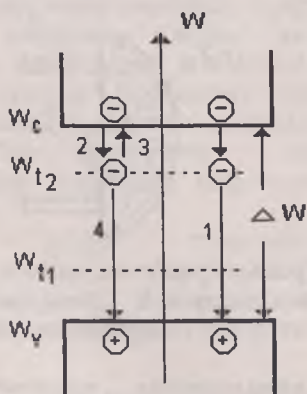
Ёритувчи диод оптик алоқа линияларида, кўрсатувчи мосламаларда, оптожувфларда ва Показо соПаларда ишлатилади.

Ёритувчи диодларни ясаш учун одатда яримўтказгич бирикмалар: кремний карбид SiC , галлий фосфоди GaP , галлий арсениди $GaAs$, галлий нитриди GaN , галлий фосфиди ва арсениди асосида кўп таркибли қотишмалар $GaAs_{1-x}P_x$ ва қатор икки таркибли Памда кўп таркибли қотишмалар ишлатилади. Бу материаллардан фойдаланиб спектрнинг инфрақизил соПасидан тортиб то ультрабинафша соПаси-гача ёрушлик чиқарадиган диодлар ясаш мумкин.

Умуман, ёрушлик чиқарадиган яримўтказгич асбобларнинг ишлаш тамойили эркин заряд ташувчиларнинг юқори энергиявий Полатдан қуйроқ энергиявий Полатта ўтган вақтда электрмагнитик энергия квантларини нурлаш Подисасига асосланган. Бундай электрон ўтишлар нур

чиқарадиган электрон ўтишлар дейилади. Нур чиқарадиган электрон ўтишлар натижасида люминесценция ва мажбурий (индукцияланган) нур чиқариш Подисалари содир бўлади. Биринчи тур ўтишлар электрлюминесценциявий ёритувчи диодларда, иккинчи тур ўтишлар эса, квант асбобларда (лазерларда) амалга ошади. Яримўтказгичда нур чиқарадиган электрон ўтишлар юзага келиши учун яримўтказгич ташқи энергия Писобидан уйПонган Полатга ўтказилиши керак. Хусусан олганда, яримўтказгични уйПонган Полатга ўтказиш йўлларида бири заряд ташувчиларни р-п ўтик орқали пуркашдир. Натижада пуркалган электронлар ёки коваклар асосий заряд ташувчилар билан рекомбинацияланиб яримўтказгичда люминесценцияни юзага келтиради. Яримўтказгичда содир бўладиган ёруПлик чиқарадиган баъзи электрон ўтишларнинг типик тузилмаси 3.3 б-расмда келтирилган.

Бу шароитда люминесценция нурланишининг спектри асосан ўт-казувчанлик зонаси билан валент зона орасидаги электрон ўтиш билан белгиланади, яъни $\nu \approx \frac{\Delta W}{h}$. Баъзи Полларда нур чиқарадиган электрон ўтишлар киришмаларнинг ёки кристал панжара



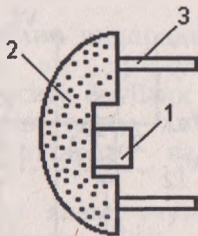
нуқсонларининг

3.36-расм. Яримўтказгичда ёруПлик чиқарадиган баъзи электрон ўтишлар.

маПаллий энергиявий соПаларининг нурланиш спектрининг энг катта тўлқин узунлигидан каттароқ бўлган соПага силжиган бўлади.

Кўпчилик Полларда яримўтказичларда нур чиқарадиган электрон ўтишлар билан бир қаторда нур чиқармайдиган электрон ўтишлар Пам амалга ошади. Кейинги ўтишларда ажралган энергия иссиқлик (фо-нон) сифатида кристалл панжарани қиздиришга сарфланади. Шу сабабли кристаллга берилган уйПониш энергиясининг Паммаси Пам ёруПлик энергиясига айланавермайди, унинг бир қисми юқорида айтилганидек, фонон кўринишида нурланади, яъни яримўтказгичнинг квант чиқиши бирга тенг бўла олмайди.

Ёритувчи диоднинг одатда учрайдиган тузилиши 3.37-расмда тас-вирланган. Асосига р-п ўтикка эга бўлган яримўтказгич монокристалли жойлаштирилган линза диоддан чиққан ёруПликни йиПиб маълум бурчак бўйлаб йўналтириб беради. Яримўтказгич кристалларда р-п ўтиklar диффузиявий усул билан ёки қотишма йўли билан Посил қилинади. Ёритувчи диодлар турли индикаторлар, масалан, рақамли индикаторларни яшаш учун Пам қўлланилади. Масалан, Позирги вақтда кремний карбиди асосида ясалган ёруПлик диодлари техникада кенг қўлланилади.



3.37-расм. Ёритувчи диод тузимаси.

- 1 - р-п ўтиккли кристалл; 2 - пластмасса (шиша) линза;
3 - ташқи симлар;

Ёритувчи диодларнинг параметрларига нурланиш равшанлиги билан қуввати, доимий тўПри ишчи кучланиши, энг катта доимий ёки импульс тескари кучланиши, ёруПлик импульсининг ўсиш ва камайиш вақти, нурланаётган ёруПликнинг тўлқин узунлиги ёки унинг ранги, энг катта тўПри доимий ёки импульс токи, фойдали иш коэффиценти, узоқ ишлаш олиши ва бошқалар киради.

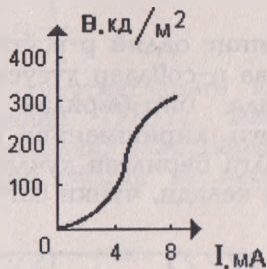
Бу параметрлар устида тўхталиб ўтиш учун имконият йўқ. Қизиққан ўқувчи махсус адабиётдан бу параметрлар ҳақида батафсил маълумот топиши мумкин. Биз бу ерда энг муҳим параметрлардан В_{равшанликнинг} қиймати ёритувчи диодлар учун бир квадрат метрга бир неча юз канделага етиб боришини, вақт доимийси микросекунднинг улушларига тенг эканлигини айтиб ўтмоқчимиз.

Ёритувчи диодларнинг асосий тавсифномалари - равшанлик, спектрал ва вольт-ампер тавсифномалардир. Диоднинг тавсифномаси - равшанликнинг р-п ўтик орқали оқувчи ток катталигига қараб ўзгаришидир. Спектрал тавсифнома эса, ёрулик оқимининг тўлқин узунлигига боғлиқлигидир. Ёритувчи диодлар вольт-ампер тавсифномалари эса, оддий диодлардагидек $J=f(U)$ боғланишдан фарқ қилмайди.

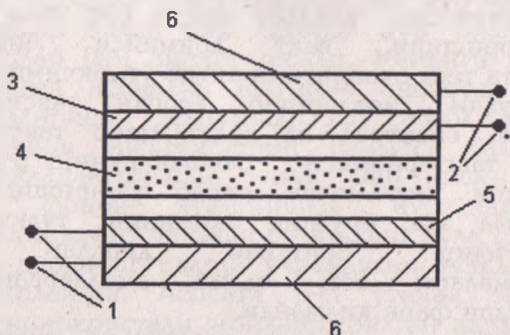
Ёритувчи диодларнинг равшанлик тавсифномаси р-п ўтик ҳамда асосан рекомбинация содир бўладиган соҳанинг тузилишига боғлиқ бўлади. Кичик кучланишларда, демак, мос равишда кичик тоқларда ёрулик нурланиши содир бўлмайди. Нурланаётган фотон энергиясига мос кучланишларда диод ёрулик чиқара бошлайди. Бундан кейин кучланиш (ток) ортган сари (3.38-расм) ёритувчи диоднинг равшанлиги ҳам орта боради.

Ёритувчи диодлар оптоэлектрон жуфтларининг муҳим таркибий қисми сифатида жуда кенг қўлланилади. Оптоэлектрон жуфт оптикавий жиҳатдан бир-бири билан оптикавий муҳит орқали боғланган ёритувчи диод ва ёрулик сезувчан асбобдан ташкил топқандир. Оптоэлектрон жуфтнинг энг муҳим афзаллиги - кириш ва чиқиш занжирлари гальваник жиҳатдан бир-бири билан тамоман боғланмаганлигидир.

Оптоэлектрон жуфт тузилмаси 3.39-расмда тасвирланган. Опто-электрон жуфтларда ёрулик чиқарувчи сифатида ёритгич диодлар, лазерлар ва бошқа ёрулик чиқарувчилар, ёрулик қабул қилувчи сифатида эса,



фотодиодлар, фототранзисторлар, фоторезисторлар ва
3.38-расм. Ёритувчи диод равшанлигининг
кучланишга бошлиқлиги.



3.39. Оптоэлектрон жуфтнинг тузилмаси.

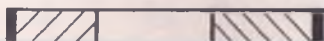
фототиристорлар қўлланилади. Ёрулик қабул қилувчининг турига қараб оптоэлектрон жуфтлар диодли, транзисторли, тиристорли ва резисторли турларга ажратилади.

Оптоэлектрон жуфтнинг ишлаш тамойили қуйидагичадир. Оптоэлектрон жуфтнинг кириш қисмига - ёрулик диодига электрик сигнал берилганда ёритгич диод электрик сигнални тегишли тўлқин узунлигидаги ёрулик сигналга айлантириб, уни оптик мулит орқали ёрулик қабул қилувчи асбобга - фотодиодга узатади. Фотодиод унга тушган оптик сигнални электрик сигналга айлантириб беради. Сўнгра бу сиг-нал тегишли мосламаларга узатилади.

Оптоэлектрон жуфти рақамли ва импульс қурилмаларида, аналог сигналларни узатувчи қурилмаларда, юксак кучланишли манбаларни туташувсиз бошқаришда ва бошқа қурилмаларда икки занжирни электрик жипатдан бир-биридан ажратувчи элемент сифатида қўлланилади.

3.15. p-i-n-диодлар

p-i-n диодларнинг оддий p-n ўтикли диодлардан фарқи шундаки, унда p- ва n-соПалар хусусий яримўтказгичнинг i-қатлами воситасида бир-биридан ажралган (3.40-расм) бўлади. i-қатламдаги киришманинг концентрацияси кичик бўлганлигидан диодга берилган кучланишнинг асосий қисми шу қатламга тўпри келади, чунки патто кучланиш нолга тенг



булганда Пам i -катлам тўла камбаПаллашган Полатда бўлади. p - i - n диодларнинг U_T электрик тешилиш кучланиши тахминан $E_m \cdot l$ га тенг, бунда E_m -электрик тешилишга мос энг катта электрик майдон, l -катламнинг қалинлиги. Кремнийда $E_m \cong 2 \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ бўлганлигидан қалинлиги 50 мкм га тенг i -катлам учун $U_T = 1000 \text{ В}$ бўлади. Шундай қилиб, p - i - n диодларнинг тешилиш кучланиши оддий p - n диодларникига қараганда бир неча марта катта бўлар экан.

3.40-расм. p - i - n диод тузилмаси.

p - i - n диоднинг вольт-ампер тавсифномаси оддий p - n диодникдан бир мунча фарқ қилади. Бу фарқ айниқса, унинг вольт-ампер тавсифномасининг тескари тармоПидан анча каттадир.

p - i - n -диодга тўпри кучланиш берилганда p -катламдан коваклар, n -катламдан эса, электронлар пуркалади. p - ва i -катлам чегарасидан оқиб ўтаётган ток қуйидагига тенг бўлади:

$$J = \frac{epl}{\tau_p} \quad (3.52)$$

бу ерда, A -диоднинг юзаси, p -ковакларнинг концентрацияси, τ_p - ковакларнинг яшаш вақти. Худди шу каби n - ва i -соПалар чегарасидан оқиб ўтувчи ток электронлар токига тенгдир. Пуркалиш вақтидаги i -катламнинг ўтказувчанлиги

$$\sigma = e(\mu_p \cdot p + \mu_n \cdot n) \quad (3.53)$$

бу ерда, μ_n ва μ_p -мос равишда электрон ва ковакларнинг ҳаракатчанликлари.

p - i - n диодларнинг ўзига хос хусусиятларидан бири ундаги i -катламнинг қаршилиги диод орқали оқиб ўтаётган электронлар ёки ковакларнинг токига тўпридан-тўпри боПлиқлигидир:

$$R_i = \frac{e}{\sigma A} \approx \frac{1}{J_\phi} \quad (3.54)$$

Ўзларининг кўп хусусиятларига кўра, p - i - n диодлар ўтаюқо-ритакрорийликлар (ЎЮТ) электроникасида кенг татбиқ қилинмоқда, масалан, улар беркитувчи қатламининг сипими деярли доимий бўлган ва катта қувватлар билан

ишлайдиган УЮТ қайтаувовчи асбоб сифатида ишлатилиши мумкин. Уларнинг қайтаулаш тезлиги тахминан $\frac{e}{29,4}$ га тенг,

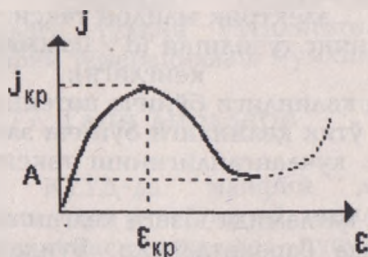
бу ерда v_{31} - заряд ташувчиларнинг i -қатламдаги Паракат тезлиги (бу тезликни асосан заряд ташувчиларнинг сочилиш Подисаси чегаралайди). Ундан ташқари $p-i-n$ диод қаршилиги диоддан ўтаётган тўпри токка чизибий болик бўлган бошқарилувчи аттенуатор сифатида ишлатилиши мумкин. $p-i-n$ диод гигагерц такрорийликларга қадар ишлайдиган модулятор сифатида Пам қўлланилиши мумкин. $p-i-n$ диодлар варикаплар сифатида Пам ишлатади. $p-i-n$ диоднинг кенг қўлланиладиган турларидан яна бири бу фотодиоддир. Фотодиодларнинг базасини мумкин қадар юпқа қилиб олинганлиги сабабли фотонлар асосан i -солада ютилиб, шу жойда электрон ва ковак жуфтларини юзага келтиради. Сўнгра, бу заряд ташувчилар электрик майдон таъсирида i -соладан чиқиб мос равишда p - ва n -содаларга ўтади ва фототок Посил қилади.

3.16. Кўчкисимон-учиб ўтиш диодлари (КУУД)

Кўчкисимон-учиб ўтиш диодларида УЮТ оралипада манфий қар-шилиқ олиш учун яримўтказгич тузилмалардаги кескин ионланиш ва заряд ташувчиларнинг учиб ўтиш самаралари қўлланилади. $p-n$ ўтик КУУ маромида ишлаш учун биринчидан, кўчкисимон тешилиш Подисаси юзага чиқиши учун унга тескари кучланиш берилган бўлиши, иккинчидан, у микротўлқинли резонатор ичига жойлаштирилган бўлиши керак. КУУД Позирги вақтда ўтаюксактакрорийликлар оралипада энг қувватли яримўтказгич энергия манбаидир.

КУУД ўзига хос хусусиятларидан бири бу унда учиб ўтиш самаралари туфайли (3.41-расм) манфий қаршилиқнинг пайдо бўлишидир.

КУУДлар оиласига оддий р-р диод, р-і-п диод ва р⁺-п-і-п⁺ диодлар ёки п⁺-р-р⁺ диодлар (Рид диодлари) киради.

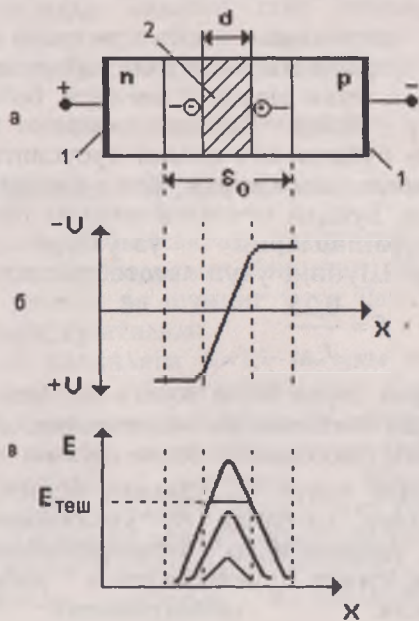


3.41-расм. Кўчкисимон учиб ўтиш диоднинг вольт-ампер таъсифномаси.

3.42-расмда тескари кучланиш таъсирида турган р-п ўтикда U потенциал билан $E = \frac{dU}{dx}$ электрик майдоннинг

тақсимооти тасвирланган. Тескари кучланиш берилган р-п ўтикда эркин заряд ташувчиларнинг концентрацияси жуда кам бўлади. Электрик майдон кучланганлиги р-п ўтикнинг технологик чегарасида берилган анганлиги Δm оорта боради.

$E = E_{\text{теш}}$ қий тешилади: яри натижасида кўпаяди. Буна майдонларда айтилганидек, чегарасида, я кўпайиши со, соша 3.42-рас ташувчиларни қатламнинг қи кичикдир.



кўчкисимон ионлашишии кўчкисимон $(10^5 - 10^6 \text{ В/см})$ лар юқорида технологик кўчкисимон ади. Ана шу бўлиб, заряд илади. Ушбу и d дан анча

3.42-расм. Тескари кучланиш берилган р-п ўтиқда потенциал билан

электрик майдон тақсимоти:

а - р-п ўтиқнинг тузилиши (d - Пажмий заряд соласининг кенлиги);

б - р-п ўтиқ қалинлиги бўйича потенциалнинг тақсимоти;

в - р-п ўтиқ қалинлиги бўйича электрик майдон кучланганлигининг тақсимоти.

Кўпайиш қатламида юзага келган заряд ташувчилар р-п ўтиқ майдонида Паракатланади. Бунда электронлар п-сола бўйлаб, коваклар эса, р-сола бўйлаб мос равишда туташувларга қараб кўчади.

Энди чегаравий қийматга яқин бўлган ўзгармас кучланишга юксактакрорийликли пульсацияланувчи кучланиш қўшилган вақтда р-п ўтиқда қандай Подисалар содир бўлади деган савол туилади. Бундай шароитда р-п ўтиқ даврий равишда пульсацияланувчи кучланиш такрорийлиги билан кўчкисимон тешилиб туради. Эркин заряд ташувчилар ўз энергиясини юксактакрорийликли майдонга берилганлиги туфайли диоднинг фаол қаршилиги манфий бўлади.

Кўпайиш қатламида юзага келувчи эркин заряд ташувчилар бу қатламдаги электрик майдонни камайтиради. Бу Подиса диодда ички манфий тескари бопланишни юзага келтиради. Шу билан бирга, диоддаги ток электрик майдондан фаза бўйича кеч қолиш хусусиятига эга. Бу эса, тескари бопланиш занжирида Пам кечикиш Подисасини юзага келтиради. Бундай кечикиш маълум такрорийликларда тизимда тебранишларни ўз-ўзидан уйПонишини энгиллаштиради. Шунинг учун автотебранишлар

$$f = \frac{0,25}{t_{кеч}} \quad (3.55)$$

такрорийликларда жуда осон юзага келади, бу ерда, $t_{кеч}$ - токнинг майдонга нисбатан кечикиш вақти.

Кўчкисимон Подисанинг Посил бўлиш тезлиги ва мос равишда кечикиш вақти $t_{кеч}$ диодга берилган кучланишга бошлиқ бўлганлиги са-бабли бу кучланишни ўзгартириш йўли билан тебранишлар такрорийлигини бошқариш мумкин. Кўчкисимон учиб ўтиш диодлари ўтаюк-сактакрорийликли монохроматик сигналлар

генераторларини, шовқин тебранишлар генераторларини, регенератив кучайтиргичларни ясашда ишлатилади. Позирги замон КУУДлари ёрдамида дециметрдан тортиб миллиметргача сопадаги тўлқин узунлигига эга бўлган электрик тебранишларни генерациялаш мумкин.

3.17. Ганн диодлари

Биз юқорида КУУД-да манфий дифференциал қаршилиқ Посил қилиш учун р-п ўтик қўлланилишини кўриб ўтдик. Ганн диодлари-нинг ўзига хос хусусияти шундан иборатки, уларнинг ишлаш тамойили бир жинсли яримўтказгичнинг Пажмида кучли электрик майдон таъсирида содир бўладиган Подисаларга асослангандир. Бу Подиса натижасида баъзи бир яримўтказгич кристалларда токнинг ўтаюксак - такрорийлик билан тебраниши юзага келади. Токнинг бундай тебранишига кристалда кескин намоён бўладиган доменлар - юксак электрик майдонга эга сопалар пайдо бўлиши сабабчидир. Ана шу Подиса натижасида яримўтказгичдан ўтаётган ток зичлиги билан майдон кучланганлиги орасидаги боПланишда, яъни вольт-ампер тавсифномада манфий соПа юзага келади. Агар узунлиги h га тенг яримўтказгичга берилган U ўзгармас кучланиш шундай бўлсаки, яримўтказгичдаги ўртача майдон

$E = \frac{U}{h}$ вольт-ампер тавсифномасининг дифференциал

қаршилиқ $\frac{dE}{dj}$ манфий бўладиган камаювчи қисмига мос

келса, диодда ўтаюксактакрорийликли тебранишлар генерацияланади. Бу Подисани биринчи бўлиб 1963 йилда Ж.Ганн кашф қилган ва шунинг учун Пам бундай диодлар унинг номи билан юритилади.

Ганн диоди қалинлиги $h \approx 1,5-10$ мкм га, диаметри эса $d \approx 20-150$ мкм га тенг бўлган GaAs ёки JnP монокристаллардан олинган дискдан иборат бўлиб, унинг икки томонига металл тута-шувлар ишланган. Ганн диоди ўтаюксактакрорийлик занжири бўлмиш Пажмий резонаторнинг фаол элементи вазифасини бажаради.

Ганн диодларининг ишчи такрорийликлари 10-120 ГГц ларга тенг, фойдали иш коэффиценти эса, 2-10% атрофида бўлади. Узлуксиз маромда ишлайдиган диодларнинг

генерацияланган тебранишларининг қуввати тахминан 200 мВт га, импульс маромда эса, тахминан 200 Вт га тенг.

Ганн диодларига асосланган генераторлар асосан радиолокация қабул қилгичларидаги гетеродинлар, кичик қувватли радиолокация узатгичларидаги генераторлар, такрорийликни кўпайтирувчи тузилма-лардаги таянч генераторлар сифатида ишлатилади. Ганн диодларига асосланган мантиқий асбоблар Пам тез ишлай олганлиги (~10 нс) сабабли катта истиқболга эга. Фақат катта қувват истеъмол қилиши уларнинг мушум камчилигидир.

Кўпчилик Ганн диодлари қаторига яримўтказгичнинг ўтказувчанлик ва валент зоналаридаги водийлар орасидаги электрон ўтишлар Подисасига асосланган асбобларни Пам киритади. Уларда Ганн доменларининг хоссаларидан эмас, ана шу водийлар орасида электрон ўтишлар натижасида юзага келадиган турпунсизликлардан фойдаланилади. Ана шундай турпунсизликлардан фойдаланиб, ўтаюксактакрорийлик-лар соПасига яроқли кучайтиргичлар, генерация такрорийлиги 200 ГГц ларгача борадиган генераторлар, тез ишлайдиган мантиқий уячалар яратилган.

III Боб бўйича мустақил назорат учун саволлар:

1. Яримўтказгич диод деб нимага айтилади?
2. Қотишмавий ва диффузиявий диодлар Пақида маълумот беринг. Улар қандай ясалади?
3. Нуқтавий ва ясси диодларнинг ишлатилиши соПалари Пақида нималар биласиз?
4. Диодда содир бўладиган физикавий жараёнларни тушунтиринг ва математик ифодаланг.
5. р-п ўтик орқали оқувчи тескари ток қандай токлардан ташкил топади?
6. Иссиқлик токи нима?
7. Генерация токи нима?
8. Сизиш токи нима?
9. Тўла тескари токни математик ифодаланг.
10. Рекомбинация токи нима?

11. Диод вольт-ампер тавсифномасига температура қандай таъсир қилади?
12. Диодга тўпри ва тескари кучланишлар берилганда содир бўладиган физикавий жараёнларни тушунтиринг.
13. Диодларнинг асосий параметрлари нималардан иборат?
14. Диоднинг сиПими учун ифодаларни ёзинг.
15. Диоднинг дифференциал қаршилиги нима?
16. Яримўтказгич диодларни бажарадиган вазифасига қараб қандай асосий турларга ажратилади?
17. Диодларнинг динамик хоссалари Пақида маълумот беринг.
18. Электрон-ковак ўтикнинг тешилиши қандай юз беради?
19. р-п ўтик тешилишининг қандай турлари мавжуд?
20. Тешилиш турлари учун математик ифодаларни ёзинг ва тушунтиринг.
21. Тўприлагич диодлар деб нимага айтилади?
22. Стабилитронлар деб нимага айтилади?
23. Стабилитрон электр занжирга қандай уланади?
24. Юқоритакрорийликли диодлар олиш учун қандай талаблар ва усуллар мавжуд?
25. Шоттки диодларида юз берувчи физикавий жараёнлар нималардан иборат?
26. Туннел диодлар деб нимага айтилади?
27. Туннел диоднинг энергиявий диаграммасини чизинг ва тушунтиринг.
28. Туннел диоддан кучайтиргич сифатида фойдаланиш чизмасини келтиринг.
29. Тескари диодлар деб нимага айтилади?
30. Тескари диоднинг вольт-ампер тавсифномасини тушунтиринг.
31. Импульс диодлар нима мақсадларда қўлланилади?
32. Импульс диодлари учун импульс параметрлари нималардан иборат?
33. Заряд тўпловчи диодларда қандай физикавий жараёнлар юз беради?
34. Варикаплар деб нимага айтилади?
35. Варикапни улаш чизмасини келтиринг.
36. Варикапнинг сиПими учун математик ифодани ёзинг.
37. Варикаплар қандай параметрларга эга?
38. Варикапнинг эквивалент тузилмасини чизинг ва тушунтиринг.
39. Варикапнинг сифати учун математик ифодани ёзинг.

40. Варикапнинг сифати температурага қандай бошланган?
41. Фотодиод деб нимага айтилади?
42. Фотодиод яшаш учун қандай талаблар мавжуд?
43. Фотодиоднинг вольт-ампер тавсифномаси учун математик ифодани ёзинг ва тушунтиринг.
44. Фотодиоднинг параметрлари деганда нимани тушунаси?
45. Ёритувчи диод нима?
46. Ёритувчи диодлар тайёрлаш учун қандай яримўтказгич материаллар ишлатилади?
47. Ёрулик чиқарувчи диодларнинг ишлаш тамойилларини тушунтиринг.
48. p - i - n диодлар қандай тузилишга эга i-қатламнинг вазифаси нимадан иборат?
49. p - i - n диодларнинг қўлланилиши Пақида маълумот беринг.
50. Кўчкисимон-учиб ўтиш диодларнинг ишлашини тушунтиринг.
51. Ганн диодларининг ишлаш тамойили нимадан иборат?
52. Ганн диодларининг ишлатилиши Пақида маълумот беринг.

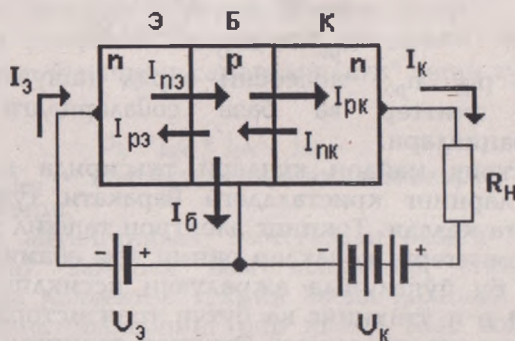
IV БОБ. ТРАНЗИСТОРЛАР.

4.1 Транзистор ишлашининг физикавий асослари

Транзистор-энг кўп тарқалган яримўтказгич кучайтиргич асбобдир. Транзистор яримўтказгич материал асосида ясалган бўлиб, яқин жойлашган икки ўзаро таъсирлашувчи p-n ўтиклардан ташкил топган. Иккала p-n ўтикларни яримўтказгичнинг уч сопаси ажратиб туради. Бу сопалар мос равишда "эмиттер", "коллектор" (чекка сопалар) ва "база" (ўрта сопа) деб аталади. Шу сопалардаги асосий заряд ташувчиларнинг турига қараб транзисторларни икки

турга: п-р-п (эмиттер ва коллектор соПалар электрон ўтказувчанликка, база соПаси эса ковак ўтказувчанликка эга); р-п-р (эмиттер ва коллектор соПалар р-тур ўтказувчанликка, база соПаси п-тур ўтказувчанликка эга) тузилмали тран-зисторларга ажратиш мумкин.

4.1-расмда п-р-п транзистор тузилмаси келтирилган бўлиб, транзистор электродларига ташқи кучланишлар берилганда у орқали оқувчи тоқлар йўналишлари расмда



кўрсатилган.

4.1-расм. п-р-п транзистор тузилмаси.

Эмиттер-база ўтишга (4.1-расмда келтирилган эмиттер ўтиш, яъни транзисторнинг энг чекка чап ва ўрта соПаларидаги р-п ўтик) тўпри йўналишда кучланиш берилган. Бу электронлар асосий ташувчилар бўлган эмиттер соПага U_3 кучланиш манбаининг манфий қутблари уланганлигини англатади. Ковак ўтказувчанликка эга бўлган ўртадаги базавий соПага U_3 манбанинг мусбат қутби уланган. Коллектор ўтишга (ўрта базавий соПа билан коллекторнинг энг чекка ўнг соПаси ораси-даги р-п ўтик) тескари кучланиш берилган, яъни базанинг р-соПасига $U_к$ кучланиш манбаининг манфий қутби уланган, коллекторнинг п-соПасига эса $U_к$ манбанинг мусбат қутби уланган.

Электрон ўтишга U_3 тўпри кучланиш берилганда база-эмиттердаги р-п соПалардаги потенциал тўсиқларнинг пасайиши амалга ошади. Потенциал тўсиқларнинг пасайиши шисобига асосий заряд ташувчилар (эмиттер соПасидаги

электронлар ва база соласидаги коваклар) электрик майдон таъсирида р-п солада пуркалади ва у ерда ноасосий заряд ташувчиларга айланадилар. Яъни, электронлар эмиттер соласидан базавий р-солага, коваклар эса базанинг р-соласидан эмиттернинг п-соласига ўтадилар. Эмиттер ўтиш чегараларида ноасосий заряд ташувчиларнинг ортиқча концентрацияси пайдо бўлади. Бу концентрациялар қуйидаги тенгламалар билан аниқланадилар:

$$p_{ni} = p_{n0} \cdot e^{qU_3 / kT}$$

$$n_{pi} = n_{p0} \cdot e^{-qU_3 / kT}$$

бу ерда, p_{n0} , n_{p0} - ноасосий заряд ташувчиларнинг, мос равишда эмиттер ва база солаларидаги мувозанатли концентрациялари.

Электрик майдон кучлари таъсирида ноасосий заряд ташувчи-ларнинг кристаллдаги Паракати туфайли эмиттер токи юзага келади. Токнинг электрон ташкил этувчиси, яъни базадан эмиттерга коваклар оқими кам аламиятлидир, ундан ташқари бу йўналишда ажралувчи иссиқлик (Жоуль-Ленц Подисаси) р-п ўтикнинг ва бутун транзисторнинг ишлашига зарарли таъсир кўрсатади. Эмиттер токининг ковак ташкил этувчисини электрон ташкил этувчига нисбатан камайтириш учун база соласи эмиттер соласига нисбатан анча кам легирланган (чунки, $n_3 \gg p_6$).

Натижада электронларнинг эмиттердан базага оқими, ковакларнинг базадан эмиттерга оқимидан анча кўпдир. Эмиттер ўтишни миқдорий тавсифлаш учун "эмиттер ўтишнинг самарадорлиги" деган тушунча киритилади:

$$\gamma = j_{n3} / j_{p3} + j_{n3}$$

бу ерда, j_{n3} - эмиттер токининг электрон ташкил этувчиси; $j_{p3} + j_{n3}$ - тула эмиттер токининг ташкил этувчилари.

Бу ифодадан кўринишича ковак ташкил этувчи электрон ташкил этувчига нисбатан қанчалик кам бўлса, эмиттер ўтишнинг самарадор-лиги бирга шунчалик яқинлашар экан.

Транзисторнинг базавий соласига пуркалган электронлар диффузия натижасида коллектор ўтишга томон Паракатланадилар. Агар базавий соланинг кенглиги электронларнинг диффузиявий югуриш йўлидан кичик бўлса, пуркалган электронларнинг кўп қисми коллекторга етиб келади. Юқорида айтилганидек, коллектор ўтишга

тескари кучланиш берилса, яъни база ва коллектор соПалар орасидаги электрик майдон шундай йўналганки, электрик майдон таъсирига тушган электронлар коллекторга узатиладилар ва ундан ташқарига чиқиб ташқи занжирда Паракатлана бошлайдилар, аниқроқ айтганда коллектор токи, яъни коллектор токининг электрон ташкил этувчиси пайдо бўлади. Коллектор токининг ковак ташкил этувчиси коваклар (ноасосий заряд ташувчилар) оқимининг коллектор соПасидан база соПасига оқимиға боПлиқ бўлиб, транзисторнинг ишлаши учун кам аПамиятлидир.

Коллектор ўтишнинг ишлашини миқдорий тавсифлаш учун "кол-лектор ўтишнинг самарадорлиги" деган тушунчани киритамиз:

$$J_k = j_{nk} + j_{pk} / j_{nk} ,$$

Бу ерда, j_{nk} , j_{pn} - коллектор токининг электрон ва ковак ташкил этувчилари.

Юқорида айтилганидек, эмиттердан базага пуркалган электронларнинг Паммаси Пам коллектор ўтишга етиб бормайдилар ва коллектор токини Посил қилишда иштирок этмайдилар. Электронларнинг бир қисми база соПасида бу соПанинг асосий заряд ташувчилари бўлган коваклар билан рекомбинацияланади. Эмиттер ва коллектордаги токларнинг фарқи, яъни базада рекомбинацияланувчи электронлар, базанинг рекомбинация токи деб аталади. Токнинг рекомбинациявий ташкил этувчисини камайтириш мақсадида базавий соПанинг кенглигини электронларнинг диффузиявий югуриш узунлигидан кичикроқ қилинади.

Базавий соПадаги рекомбинациявий йўқотишларни миқдорий тавсифлаш учун эмиттер токининг электрон ташкил қилувчисини коллектор токининг электрон ташкил этувчисига нисбатидан фойдаланилади (одатда бу нисбатни β Парфи билан белгиланади):

$$\beta = j_{nз} / j_{mk}$$

Шунингдек, $\beta = 1 - 1/2 (d/z_n)^2$ эканлигини Пам кўрсатиш мумкин. Бу ерда, d -базавий соПанинг қалинлиги, Z_n -электронларнинг диффузиявий югуриш йўли. Агар $d \ll Z_n$, $\beta = 1$ шарт бажарилса, яъни базавий соПанинг қалинлиги заряд ташувчиларнинг диффузиявий югуриш йўлидан кичик бўлса, рекомбинациявий йўқотишлар энг кичик бўлади ва коллектор токи эмиттер токидан жуда озгина фарқ қилади.

Умуман транзисторда тоқларнинг ўзаро муносабати учун қуйидаги ифода ўрин-лидир:

$$I_s = I_k + I_с$$

Коллектор ўтишга тескари кучланиш берилгани учун унинг омик қаршилиги тўпри кучланиш берилган эмиттер ўтишнинг қаршилигидан бир неча тартибга каттадир. Шунинг учун коллекторли занжирга етарлича юқориомли қўшимча R_n қаршилиқни 4.1-расмда кўрсатилганидек улаш мумкин. Юқориомли қўшимча қаршилиқдан оқа-ётган коллектор токи кучланишнинг катта тушишини ($U_n = I_k \cdot R_k$) По-сил қилади. Натижада транзисторнинг эмиттер занжиридаги кучланишнинг нисбатан кичик ўзгариши, қўшимча қаршилиқда, яъни, коллектор занжиридаги кучланишнинг катта ўзгаришига олиб келади. Коллектор токи эмиттер токига нисбатан кичик бўлишига қарамасдан, кириш ва чиқиш қаршилиқларининг фарқи Писобга транзистор қувват бўйича кучайтиришни таъминлайди. Кириш ва чиқишдаги қаршилиқлар қийматларида фарқнинг мавжудлиги "транзистор" номининг келиб чиқишига олиб келди. Транзистор сўзи инглиз тилидаги икки сўзнинг қисқарттирилганидан - "transformer of resistor"дан - "transistor" - (қар-шилиқни ўзгарттиргич) пайдо бўлди.

Биз юқорида п-р-п тур транзистордаги тоқларнинг ўтиш меха-низмларини кўриб чиқдик. р-п-р транзисторда тоқларнинг кўчишидаги физикавий жараёнлар Пам юқоридагидекдир. Фақат бу Пол учун эмиттердан базага пуркалувчи заряд ташувчиларнинг кўриниши ўзгаришини Писобга олиш кифодидир.

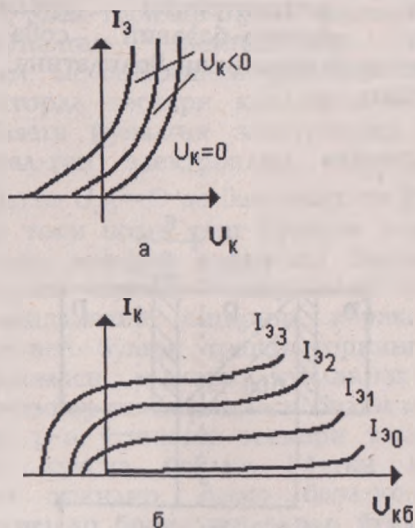
4.2. Транзисторнинг статик вольт-ампер тавсифномалари

Транзисторнинг (4.1-расм) базавий соласи Пам, коллектор Пам, эмиттернинг кучланиш манбаларига умумий улангандир. Транзисторнинг бундай уланиши умумий базали уланиш (УБ) тузилмаси деб ата-лади. Транзисторни умумий эмиттер бўйича ва умумий коллектор (УК) бўйича улаш мумкин. Пар бир уланиш ўзининг ижобий ва салбий Пусусиятлари билан тавсифланади.

Транзистор ўзининг Пар қандай уланишида кириш ва чиқишдаги бир гуруҳи вольт-ампер тавсифномалари бўйича фарқланади.

Умумий базали уланишда транзисторнинг статик тавсифномалари

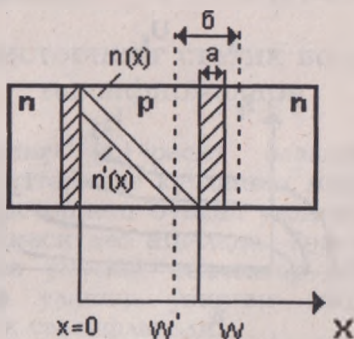
Транзисторни умумий база бўйича улашда киришдаги вольт-ампер тавсифномалар гуруҳи I_x эмиттер токининг эмиттер билан база орасига берилган кучланиш бўйича боғланишини (4.2 а-расм) ифодалайди. Чиқишдаги тавсифномалар коллектор токининг эмиттердаги маълум бир ток қийматларида, коллектор билан база орасидаги кучланишга боғлиқлигини (4.2 б-расм) ифодалайди. Келтирилган боғланишлардан кўринишича, транзисторнинг $U_{кб} = 0$ даги кириш тавсифномаси тўпри кучланиш берилган р-п ўтикнинг вольт-ампер тавсифномаси билан бир хилдир. Лекин коллекторга кучланиш берилса, вольт-ампер тавсифнома эмиттернинг манфий кучланишлари томон силжийди. Бу



4.2 а,б-расм. Умумий базали уланишда транзисторнинг вольт-ампер тавсифномалари.

силжиш коллектор ўтишга бериладиган кучланиш ортган сари шунчалик ортади. Бу силжиш натижасида эмиттерга берилган кучланиш нол бўлганда Пам эмиттер-база ўтиш орқали ўтувчи ток нолга тенг бўлмайди.

Кириш вольт-ампер тавсифномаларининг бундай табиатини ту-шунтириш учун 4.3-расмни кўриб чиқайлик. Ушбу расмда эмиттердан базавий солага пуркалган ноасосий заряд ташувчилар концентрациясининг тақсимоти кўрсатилган. Ноасосий заряд ташувчиларнинг базавий сола қалинлиги бўйича чизбий қонун асосида тақсимланиши расмда кўринмоқда. Агар эмиттер токи доимий бўлса (эмиттер-базадаги кучланиш ўзгармас), унда ноасосий заряд ташувчиларнинг базавий соладаги градиенти доимий қолади. Коллектор-база орасидаги манфий кучланишнинг ошиши тескари кучланиш берилган р-п ўтиқдаги Пажмий заряд қатламининг тақсимланишига (4.3-расмда узлукли чизиқлар билан кўрсатилган) олиб келади. р-п ўтиқнинг кенглиги а қийматдан в қийматгача (расмга қаранг) ортади. Бу Полда базавий со-Панинг кенглиги W дан W' гача камаяди. Базавий соПанинг кенглиги камайганда ноасосий заряд ташувчиларнинг концентрация градиенти, заряд ташувчиларнинг эмиттер-базавий сола чегарасидаги концентра-циясининг камайиши Полидагина, яъни пуркалиш даражаси камайган



4.3-расм. Транзистор эмиттеридан базавий солага пуркалган ноасосий заряд ташувчилар концентрациясининг тақсимоти.

Полда, доимий қолиши мумкин. Бу эмиттер-база ўтишдаги кучланишнинг камайишига мос келади ва натижада ўтиш вольт-ампер тавсифномасининг кичик кучланишлар томонига силжийди. Коллектор-база ўтишга бериладиган тескари кучланиш қиймати қанча катта бўлса, базавий сопанинг самаравий кенглиги шунча кўп камаяди, натижада база-эмиттер ажралиш чегарасидаги база сопасида заряд ташувчиларнинг концентрацияси шунча кўп камаяди. Бу тавсифномаларнинг кичик кучланишлар томон шунчалик кўп силжишига (4.2 а-расм) олиб келади. Ундан ташқари, агар база-эмиттер орасидаги кучланиш нолга тенг бўлса, коллектордаги манфий кучланиш база-эмиттер ўтиш орқали қандайдир токнинг оқишига олиб келади. Агар коллектордаги кучланиш нолга тенг бўлса, унда эмиттер ўтишдаги ток нолга тенг (база-эмиттердаги кучланиш нол бўлганда) бўлади. Базавий сопа қалинлигини $W-W^1$ қийматта камайтириш Писобига коллектор ўтишга тескари кучланиш берилса, базавий сопадаги электронлар концентрацияси камаяди ва эмиттер ўтиш учун термодинамик мувозанат Пولاتи бузилади. Бошқача айтганда, эмиттер ўтишдаги ва база-коллектор ўтишдаги кучланиш нол бўлганда эмиттердан базага йўналган, электронлар оқими қарама-қарши, базадан эмиттерга йўналган электронлар оқими билан мувозанатлашади ва натижавий эмиттер токи нолга тенг бўлади. Коллекторда тескари кучланиш мавжуд бўлганда эмиттердан базага йўналган электронлар оқими базадан эмиттерга йўналган электронлар оқимидан кўпроқдир. Шунинг учун Патто $U_{эб} = 0$ да Пам эмиттер ўтиш орқали ток оқади. Эмиттер токи нолга тенг бўлиши учун база-эмиттер ўтишга қандайдир манфий кучланиш бериш керак. Яъни, эмиттердан базага оқувчи электронлар учун потенциал тўсиқнинг баландлигини ошириш керак. Кириш токи (эмиттер токи) нол бўлган транзисторнинг чиқиш вольт-ампер тавсифномаси тескари кучланиш берилган р-п ўтикнинг вольт-ампер тавсифномаси билан мос (4.2 б-расмга қаранг) келади. р-п ўтикнинг тескари токи, тескари кучланишга жуда кучсиз бошлиқ бўлган ноасосий заряд ташувчиларнинг токидир. Аммо база-коллекторга катта тескари кучланишлар берилганда р-п ўтикнинг тешилиши юзага келади. Эмиттер токи ошиши билан базага пуркалган ва коллекторга етиб борган ноасосий заряд ташувчиларнинг

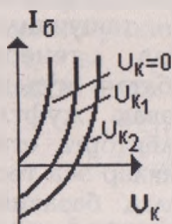
оқими ортади ва бунинг натижасида эса коллектор токи ортади. Шуни айтиш керакки, коллектордаги тескари кучланиш орти-ши билан базавий соПанинг кенглиги камаяди. Демак, эмиттер токи-нинг доимий қийматида коллекторга етиб борувчи электронлар оқими (қурилаётган п-р-п транзисторда) коллектордаги кучланиш ошиши билан ошади.

Умумий базали қилиб уланган транзисторнинг (4.2-расм) чиқишидаги вольт-ампер тавсифномалари мажмуидан кўринишича, эмиттернинг белгиланган токи қийматида, ўтишга берилган кучланиш Патто нол бўлганда Пам ($U_{кб} = 0$) коллектор ўтиш орқали қандайдир ток оқар экан. Бунинг сабаби коллектор ўтиш орқали оқувчи электронлар оқимлари ўртасидаги термодинамик мувозанатнинг бузилганлигидадир. Хақиқатдан, электронларнинг базадан пуркалиши мавжудлигида, базадан коллекторга йўналган электронлар оқими коллектордан базага йўналганларига нисбатан анча кўп бўлади. Ушбу оқимларни тенглаштириш учун ўтишга кичикроқ тўпри кучланиш бериш керак. Бунинг натижасида базадан коллекторга йўналган ортиқча электронлар оқимини компенсациялаш имкони пайдо бўлади.

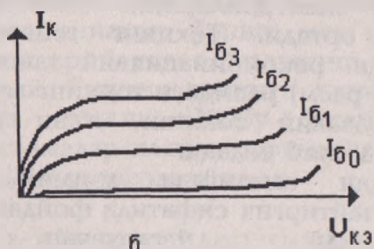
4.2.2. Умумий эмиттерли уланишдаги транзисторнинг статик тавсифномалари

Транзисторни умумий эмиттерли уланишдаги вольт-ампер тавсиф-номалар мажмуи $I_б$ база токининг база ва эмиттерлар орасига берилган $U_{бэ}$ кучланишга боПлиқлигини (4.4 а-расм) ифодалайди. Чиқиш тавсифномалари эса $I_к$ коллектор токининг коллектор ва эмиттерга берилган $U_{кэ}$ кучланишга боПлиқлигини (4.4 б-расм) ифодалайди.

Келтирилган бошланишлардан кўринишича, агар коллектор кучланиши ($U_{к3} = 0$) нол бўлса, кириш тавсифномаси координата бошланиши орқали ўтади ва у яқка р-п ўтик тавсифномасидан фарқ қилмайди. Коллектор-эмиттер ўтишга манфий кучланиш берилганда эса, чиқиш вольт-ампер тавсифномалари (4.4 а-расмга қаранг) базавий кучланишларнинг катта қийматлари томонига силжийди ва паства тушади. Бу силжишларнинг катталиги манфий коллектор кучланиши ортиши билан ортади. Бундай силжиш сабабини кўрайлик. Эмиттер ўтишга берилган кучланиш доимий ($U_б = \text{const}$) деб таъмин қилайлик. Бу ҳолда база-



а



б

эмиттер ўтиш орқали ўтувчи

4.4-расм. Умумий эмиттерли уланишдаги транзисторнинг вольт-ампер тавсифномалари.

ток ҳолда эмиттер яқинидаги база соҳасидаги электронларнинг умумий концентрацияси камаяди, ва демак электрон-коваклар жуфтнинг рекомбинацияси эҳтимоллиги камаяди. Эмиттер соҳасидаги электронлар базага эмиттер ўтиш орқали етиб келадилар. Рекомбинация учун зарур коваклар базавий чиқишдан етиб келадилар. Шунинг учун, рекомбинация камайса, базавий чиқиш орқали ковакларнинг келиши камаяди, яъни берилган $U_б$ кучланишда базавий ток

камаяди. Бу эса вольт-ампер тавсифномаларнинг катта $U_{бэ}$ кучланишлар қиймати томонига силжишини англатади. Тавсиф-номаларнинг базанинг манфий тоқлари соПасига (яъни, паст томонга) силжиши базавий соПадаги электронларнинг генерацияси ва рекомбинацияси ўртасидаги термодинамик мувозанатнинг бузилиши мавжудлиги билан тушунтирилади. Пақиқатдан, эмиттер ўтишдаги кучланиш нолга тенг ($U_{бэ} = 0$) ва коллектордаги кучланиш манфий бўлганда база соПасидаги электронлар сони ўзининг мувозанат Подагидан камдир, чунки коллектор ўтиш яқинида электронлар концентрацияси нолга тенгдир. Ноасосий заряд ташувчиларнинг бундай қийматлари базавий соПада генерация жараёни рекомбинация жараёнига нисбатан кўплигини кўрсатади. Генерацияланувчи электрон-ковак жуфтлари қуйидагича ажраладилар: электронлар коллекторга етиб боргач ташқи занжирга чиқиб кетадилар, коваклар эса тескари йўналишда, базавий ток Посил қилган Пода базавий чиқиш орқали кетадилар. Эмиттер ўтишга бе-рилган тўпри кучланишнинг ортишида база соПасидаги номувозанатли электронлар концентрацияси, электронларнинг эмиттердан пуркалиши Пособига анча ортади. Тоқнинг генерациявий ташкил этувчиси камаяди, рекомбинациявий ташкил этувчиси эса ортади. Бу (4.4 а-расм) расмдаги тоқнинг мусбат йўналишига мос келувчи базавий тоқнинг, яъни рекомбинациявий тоқнинг ошишига олиб келади.

Транзистордан амалиётда доимий ва ўзгарувчан сигналларни ку-чайтиргич сифатида фойдаланилади. Паст ва юқоритакрорийликли ўзгарувчан сигналларни кучайтиришнинг ўзига хос хусусиятлари мавжуддир. Қуйида транзисторнинг пасттакрорийликли тавсифномаларини, яъни пасттакрорийликли сигналларни кучайтиришдаги транзисторнинг кўрсаткичлари ёки тавсифномаларини кўриб чиқайлик.

4.3. Транзисторнинг пасттакрорийликли кўрсаткичлари

Умумий Полда пасттакрорийликли транзисторларнинг ишлашини тўртта катталиклар ёрдамида - транзисторнинг кириши ва чиқишидаги U_1, U_2 - кучланишлар ва I_1, I_2 - тоқлар ёрдамида ифодалаш мумкин. Ушбу катталикларнинг Паммаси ўзаро боПлангандир. Бу катталиклардан Пар қандай иккитасининг берилиши, статик тавсифномалар орқали (Пар қандай уланишларда) қолган иккита катталикни аниқлаш учун етарли бўлади. Берилаётган катталиклар мустақил ўзгарувчилардир. Буларга боПлиқ бошқа катталиклар эса ушбу мустақил ўзгарувчан катталикларнинг функциясидир. Пар қандай ўзгарувчан иккита катталикни (булар транзисторнинг кириш ёки чиқишидаги тоқлар ёки кучланишлар бўлиши мумкин) x_1 ва x_2 орқали, уларга боПлиқ ўзгарувчиларни f_1 ва f_2 орқали ифодалаб, қуйидаги тенгламалар тизимини ёзиш мумкин:

$$\begin{aligned} f_1 &= \xi_{11} x_1 + \xi_{12} x_2 \\ f_2 &= \xi_{21} x_1 + \xi_{22} x_2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Бу ерда, ξ_{ij} -коэффициентлар транзисторнинг пасттакрорийликли дифференциал кўрсаткичларидир. Пақиқатдан, агар транзисторнинг р-п ўтиқларига қўйилган доимий тоқ ва кучланишлар ўрнига мос кичик ўзгарувчан тоқ ёки кучланишлар берилса, уларнинг амплитудаларини доимий ташкилий этувчиларнинг кичик ўзгаришлари сифатида қараш мумкин. Ушбу ўзгаришлар юқорида келтирилган тенгламалар-пасттакрорийликли дифференциал кўрсаткичлар ёрдамида ифодалана-ди.

г-кўрсаткичлар тизими

г-кўрсаткичлар тизимида мустақил ўзгарувчилар сифатида транзисторнинг кириш ва чиқишидаги I_1 ва I_2 ўзгарувчан тоқлар қабул қилинади. Уларга боПлиқ бўлган транзисторнинг кириш ва чиқишидаги U_1 ва U_2 кучланишларнинг ўзгарувчан қийматларини (4.6) тенгламаларга мос равишда қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\begin{aligned} U_1 &= r_{11} I_1 + r_{12} I_2 \\ U_2 &= r_{21} I_1 + r_{22} I_2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

(4.7) тенгламалар тизимидан кўринишича, г-кўрсаткичлар шиликнинг ўлчов бирлигига эга экан:

$$r_{ij} = U_{ij} / I_{ij}$$

Бу эса ушбу "r" белгилаш киритилишининг - инглиз тилидаги "resistor" (резистор) - қаршилиқ - сабабини намоён этади.

Юқоридаги (4.6) тенгламалар тизими - катталикларнинг кичик ўзгаришларини ифодаловчи, яъни дифференциал кўрсаткичлар тизи-мидир. (4.8) тенглама g_{ij} катталикларни қуйидагича аниқлашга имкон беради:

$r_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2=0}$ Кириш токи ўзгармас бўлган Пол умуми транзис-торнинг кириш қаршилиги;

$r_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{I_1=0}$ Тескари алоқа қаршилиги. Киришдаги ток ўзгар-мас бўлганда, чиқишдаги ток ўзгаришининг транзисторнинг киришидаги кучланишга таъсири-ни ифодалайди;

$r_{21} = \frac{U_2}{I_1} \Big|_{I_2=0}$ Чиқиш токи ўзгармас бўлганда кириш токи ўзга-ришининг чиқиш кучланишининг ўзгаришига олиб келувчи жараёнини ифодаловчи ўтиш қаршилиги;

$r_{22} = \frac{U_2}{I_2} \Big|_{I_1=0}$ Кириш токи ўзгармас бўлганда, транзисторнинг чиқиш қаршилиги.

Пар қандай уланишдаги транзисторнинг кириш ва чиқишидаги g -кўрсаткичларни ўлчашда, кичик амплитудали ўзгармас I ток бериш керак ва қарама-қарши занжирдаги ўзгарувчан кучланишни тоқларнинг фарқи юзага келмаган вақтда ўлчаш керак. Транзисторларнинг чиқиш қаршилиги жуда катта бўлади. Бу эса транзисторнинг чиқишидаги тоқларнинг доимий қийматини амалиётда етарлича аниқлик билан таъминлаш имконини бермайди. g -кўрсаткичлар тизими эса ушбу камчиликдан Полидир.

g -кўрсаткичлар тизими

g -кўрсаткичлар тизимида мустақил ўзгарувчилар сифатида транзисторнинг кириши ва чиқишидаги ўзгарувчан кучланишлар қабул қилинади. Бу Полда кириш ва чиқиш тоқларини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$I_1 = g_{11}U_{11} + g_{12}U_2$$

$$I_2 = g_{21}U_1 + g_{22}U_2$$

Ушбу дифференциал кўрсаткичлар тизимида g_{ij} -катталиқлар ўтқа-зувчанлик бирлигига эгадирлар ва қуйидагича аниқланиши мумкин:

$$g_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0}$$

Чиқиш кучланиши доимий Полда, транзисторнинг киришидаги ўтказувчанлик;

$$g_{12} = \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{U_1=0}$$

Кириш кучланиши доимий Полда, транзисторнинг чиқишидаги кучланиш ўзгаришининг кириш токига таъсирини ифодаловчи, тескари узатиш ўтказувчан-лиги;

$$g_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0}$$

Чиқишдаги кучланиш ўзгармас Полда, киришдаги кучланишнинг транзистор чиқишидаги токнинг ўзга-ришига таъсир этувчи, тўпри узатиш ўтказувчан-лиги;

$$g_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{U_1=0}$$

Киришдаги кучланиши доимий транзисторнинг ки-риш ўтказувчанлиги.

Бу ерда $r_{ij} \neq 1/g_{ij}$ эканлигини эса тутиш керак. Пақиқатдан Пам r -кўрсаткичлар транзисторнинг кириши ва чиқишидаги ўзгарувчан тоқларнинг доимийлик Полатида ўлчанади. g -кўрсаткичлар эса транзисторнинг кириши ва чиқишидаги ўзгарувчан кучланишларнинг доимийлик Полатида ўлчанади. Демак, r ва g -кўрсаткичларни ўлчаш шароитлари турлича экан.

Шунинг учун Пам $r_{ij} \neq 1/g_{ij}$ ўринлидир. g -кўрсаткичлар тизими-нинг энг катта камчиликларидан бири, транзисторнинг киришидаги кучланишнинг амалиётда доимий ушлаб туришнинг қийинлигидир. Бунинг сабаби эса, бикутбий транзистор кириш қаршилигининг кичиклигидир.

h -кўрсаткичлар тизими ушбу камчиликдан, ва r -кўрсаткичлар ти-зими эга бўлган камчиликлардан Полидир.

h -кўрсаткичлар тизими

h-кўрсаткичлар тизимида мустақил ўзгарувчилар сифатида I_1 - кириш токи ва U_2 -чиқиш кучланиши қабул қилинади. Ушбу Полда транзистор киришидаги қаршилиқ кичик, ва чиқиш кучланиши етарлича катта бўлганлиги учун транзисторнинг киришидаги токнинг ва унинг чиқишидаги кучланишнинг доимийлиги осон амалга оширилади.

(4.6) тенгламалар тизимига асосан U_1 -кириш кучланиши, I_1 - чиқиш то-ки учун ифодаларни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_1 &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{aligned}$$

Ушбу h_{ij} -дифференциал кўрсаткичлар тизимига кирувчи h_{ij} -катта-ликларни қуйидагича аниқлаш мумкин:

I Жадвал

$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0}$$

Чиқиш кучланиши доимийлигида транзисторнинг кириш қаршилиги;

$$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0}$$

Кириш токи доимийлигида транзистор чиқишидаги кучланиш ўзгаришининг киришдаги кучланишга таъсирини кўрсатувчи, кучланишни тескари узатиш коэффициенти;

$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0}$$

Чиқишдаги кучланишнинг доимийлигида транзисторнинг ток узатиш коэффициенти;

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0}$$

Кириш токининг доимийлигида транзистор киришидаги ўтказувчанлик.

I-жадвалда кремний ва германий асосида тайёрланган баъзи бир камқувватли биқутбий транзисторларнинг дифференциал кўрсаткичларининг қийматлари келтирилган. Кремний асосидаги транзисторлар "КТ" - "кремний транзистор"лар, деган белгиланишга эгадирлар. Гер-маний асосидаги транзисторлар эса "ГТ"- "германий транзистор"лар деб белгиланади. (б) ва (э) символлари транзисторнинг умумий базали (б) ёки умумий эмиттерли (э) уланишини билдиради.

Транзисторнинг юқорида келтирилган дифференциал кўрсаткичлари транзистор фақат пасттакрорийликларда

ишлайди деган тахмин асосидагина тўридир; яъни транзисторнинг кўрсаткичлари такрорийликка боғлиқ эмасдир, ушбу шарт кўплаб транзисторлар учун 10^{-10} - 10^{-3} Гц такрорийликлар оралигида ўринлидир. Демак, юқоритакрорийликларда транзисторларнинг кўрсаткичлари такрорийликка боғлиқ бўлиб, Памма кўриб чиқилган дифференциал кўрсаткичлар тизими комплекс катталикларга айланади.

4.4- Дайдишли транзисторлар

Транзисторларнинг ишлаш асослари билан танишиш жараёнида ва унинг дифференциал кўрсаткичлар тизимини аниқлашда транзисторларнинг базавий соҳасидаги электрик майдон кучланганлиги нолга тенг деб Писоблаймиз. Ушбу шарт бажарилганда, базага пуркалган заряд ташувчилар-базавий соҳа бўйлаб фақат диффузиянинг Писобига кўчирилади. Пақиқатдан, база соҳасида, эмиттер-база ўтиш яқинидаги пуркалган заряд ташувчиларнинг концентрацияси эмиттер-база чегарадан маълум бир масофадагидан анча кўндир. Коллектор ўтиш яқинидаги пуркалган заряд ташувчиларнинг концентрацияси эса умуман нолга тенг. Концентрацияларнинг бундай фарқи базага пуркалган заряд ташувчилар концентрациясининг камайиш томонига, яъни коллектор томонга йўналган диффузиявий оқимини Писил қилади. Заряд ташувчиларнинг диффузиявий оқимининг мавжудлиги сабабли заряднинг база соҳаси орқали танилиши вужудга келади. Транзисторнинг пасттакрорийликларда ишлашида, яъни заряд ташувчиларнинг базавий соҳаси орқали заряд ташувчиларнинг диффузиявий ўтиш вақти, база-эмиттер ўтишга қўйилган ўзгарувчан кучланишнинг мусбат қисми яримдаврининг таъсир вақтидан, яъни заряд ташувчиларнинг коллекторга етиб олиш учун етарли бўлган вақтдан анча камдир. Кириш сигнали такрорийлигининг ошиши ва база-эмиттер ўтишга қўйилган ўзгарувчан кучланиш яримдаврининг давомийлиги камайиши натижасида пуркалган заряд ташувчилар коллекторга ета бормайдилар. Бу Полда транзисторнинг ток узатиш коэффициенти кескин камаяди. Пуркалган заряд ташувчиларнинг база соҳаси орқали кўчиш вақтини камайтириш Писобига транзисторнинг тез ишлашини ошириш учун, заряд ташувчиларнинг коллектор ўтиш

томонига Паракатини тезлатувчи электрик майдон Посиа қилинади. Бундай транзисторлар дайдишли транзисторлар номини олган. "Дайдиш" - қўйилган электрик майдонда кўчиш маъносини англатади.

Дайдишли транзисторнинг энг содда тузилишини кўрайлик. Бош-ланПич материал сифатида п-тур ўтказувчанликли ва N_d -концентра-цияли донор киришмали яримўтказгич ишлатилган бўлсин. Яримўт-казгич материалнинг сиртидан аввал N_a -концентрацияли акцептор, сўнгра N_d -концентрацияли донор киришманинг диффузиясини кўрайлик. Шу билан бирга пластиналар сиртида $N_d \gg N_a$ бўлиш шарти албатта бажарилсин. Бунинг учун донор киришманинг диффузия коэф-фициенти акцептор киришманинг диффузия коэффицентидан анча кичик (4.5 а-расм) бўлиши керак. Ушбу Пода донор киришманинг яримўтказгич пластина Пажмидаги концентрацияси масофа бўйича, акцептор киришманинг концентрациясига нисбатан анча кўпроқ камаяди. Олинган концентрациялар тақсимоти асосида донор ва акцептор киришмалар фарқининг яримўтказгич материалдаги х-масофа бўйича функцияси сифатида боЛланишини (4.5-расм) чизайлик. Бу расмдан кўринишича $0 < x < x_1$ да донор киришманинг умумий концентрацияси

$(N_{d0} + N_d)$ акцептор киришманинг умумий концентрациясидан $N_{d0} + N_d - N_a > 0$, анча кўп экан, яъни бизда п-тур ўтказувчанликли яримўтказгич мавжуд экан, $x_1 < x < x_2$ - Полида акцептор киришманинг концен-трацияси донор киришмаларнинг концентрациясидан кўпроқдир, $N_d + N_{d0} - N_d < 0$, яъни бу соВада биз р-тур ўтказувчанликли яримўт-казгич оламиз. $x_3 < x$ да донор киришмаларнинг йиПинди концен-трацияси яна акцептор киришма концентрациясидан катта, яъни $N_d - N_a > 0$ бўлади ва $x_3 < x$ соВада биз п-тур ўтказувчанликли яримўтказгичга эга бўламиз.

Бошқача айтганда, икки босқичли диффузия ёрдамида п-р-п тузилма, яъни транзистор тузилмасини оламиз. Энди олинган тузилманинг ўрта р-соЛасидаги, яъни транзисторнинг базавий соЛасидаги (4.5 б-расм) киришмалар концентрациясининг тақсимотини кўриб чиқайлик. Расмдан кўринишича, агар $N_d > N_a$ бўлса ва донор киришманинг диффузия коэффиценти акцептор киришманинг диффузия

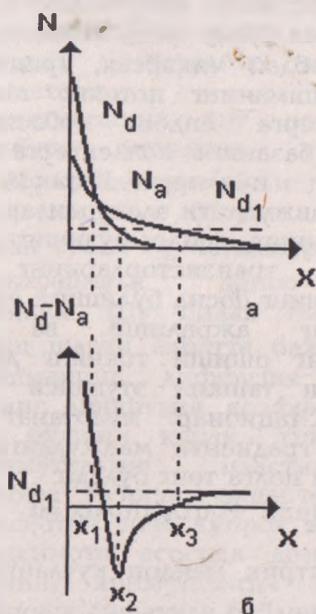
коэффициентидан анча кичик бўлса, $x_2 - x_1$ сола, $x_3 - x_2$ соладан анча кичик бўлар экан. Яъни, $(x_3 - x_2) \gg (x_2 - x_1) \cdot (x_2 - x_1)$ соласини Лисобдан чиқарсак, транзисторнинг базасида легировчи киришманинг нотекис тақсимотини кўрамиз. Базанинг эмиттерга ёндош соласидаги киришманинг концентрацияси базанинг коллекторга ёндош соласидагига нисбатан анча кўпдир. Киришма концентрацияси градиентининг мавжудлиги электронлар ва коваклар қарама-қарши оқимларининг пайдо бўлишига, уларнинг фазовий ажралишига ва транзисторларнинг базавий соласида elektrik майдоннинг Посил бўлишига олиб келади.

Зарядларнинг ажралиши ва elektrik майдон кучланганлигининг ошиши токнинг диффузиявий ташкил тувчиси дайдиш ташкил этувчиси билан тенглашгунча дивом этади. Стационар мувозанат Олатда киришма концентрацияси градиенти мавжудлиги билан белгиланган электронлар токи нолга тенг бўлади:

$$J_n = q\mu_n E + qD_k \frac{du}{dx} = 0 \quad (4.11)$$

Бу Оолда, E- elektrik майдон кучланганлигини қуйидагича топиш мумкин:

$$E = D/\mu \cdot 1/n \cdot dU/dx \quad (4.12)$$



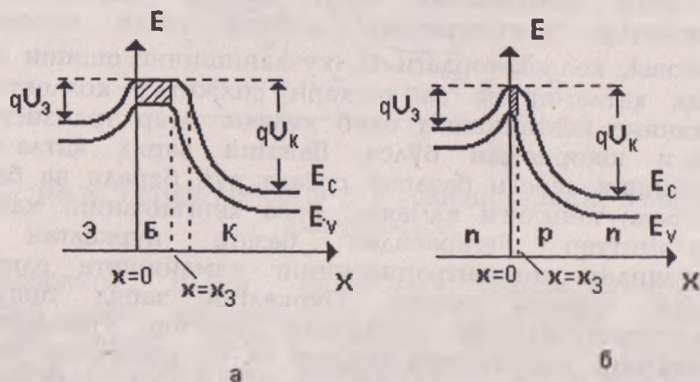
4.5-расм. Транзисторда легирловчи киришмалар концентрациясининг тақсимоги.

(4.12) тенгламадан кўринишича транзистор базасига берилган элек-трик майдон кучланганлиги заряд ташувчилар концентрацияси градиентига ва легирловчи киришманинг концентрациясига муносиб экан.

Берилган элек-трик майдон кучланганлиги базага пуркалган электронларнинг эмиттердан коллекторга Паракатини тезлаштиради. Дайдишли транзистор базасидаги электронларнинг дайдиш t_E вақтини топайлик:

$$t_E = x_3 - x_2 / V = x_3 - x_2 / \mu n E = (x_3 - x_2) \cdot n / D (du/dx)^{-1} \quad (4.13)$$

Ушбу тенгламадан кўринишича, концентрация градиенти қанча кўп бўлса, электронларнинг базадаги дайдиш вақти шунчалик кичик ва натижада транзистор кучайтириши мумкин бўлган ўзгарувчан сигнал-нинг такрорийлиги шунча юқоридир. Аммо бу йўлдаги баъзи бир чегаралар транзисторнинг такрорийликлар оралиғини оширишга имкон бермайди. Бундай чегаралардан бири базавий собанинг бошланғич (4.5 б-расм) қисми бўлиб, унинг $(x_2 - x_1)$ ўлчамларини $(x_3 - x_2)$ қисмга нисбатан Писобга олмаса Пам бўлади. Пақиқатдан, расмдан кўринишича, базанинг ушбу қисмидаги киришма концентрацияси градиенти тескари қийматга эга бўлиб, электрик майдон бу ерда тезлатувчи эмас, балки тўхтатувчидир. Тезлатувчи майдон кучланганлигини ошириш учун базадаги киришма концентрациясини ошириш керак, аммо бу эмиттер ўтишининг самарадорлигини ёмонлаштиради. Умуман, олганда кўрилади дайдилли транзистор тузилмаси камчиликларга нисбатан кўпроқ ютуқларга эгадир ва шунинг учун транзисторлар тайёрлашда ундан кенг фойдаланилади. Базавий собага киритилган электрик майдоннинг



мавжудлиги, базадаги электронларнинг энергияси координатанинг функцияси бўлиб қолишига олиб келади. Шунинг учун дайдилли транзисторнинг энергиявий собалар 4.6-расм. Дайдилли транзисторнинг энергиявий собалар диаграммалари.

диаграммаси оддий биқутбий транзисторнинг энергиявий собалар диаграммасидан анча фарқ қилади.

4.6-расмда эмиттерга - U_3 ва коллекторга U_K -кучланишлар берилган

оддий п-р-п тур транзисторнинг (а) ва шу кўринишдаги дайдишли транзисторнинг (б) энергиявий диаграммалари солиштириш учун келтирилган.

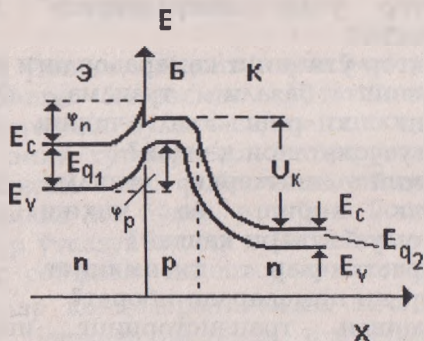
4.5. Гетероўтикли транзисторлар

Биқутбий транзисторларнинг (IV БОБга қ.) ишлашини таълил қилишда, биқутбий транзисторнинг эмиттерига катта тоқларда тоқни узатиш коэффициенти - h_{21} камайиши кўрсатилган эди. Бунинг сабаби базадан эмиттерга йўналган асосий заряд ташувчилар оқими-нинг ошиши ва эмиттер ўтиш самарадорлигининг камайишидир. Базадан заряд ташувчилар оқимини камайитириш мақсадида транзисторнинг базавий сопасидаги киришмалар концентрацияси камайитирилади. Бунинг учун транзисторнинг базаси анча юқориомли қилинади. Аммо базавий сопанинг солиштирма қаршилиги ошиши билан транзисторнинг тузилишидаги манфий тескари алоқа ошади. Бу Пол чиқиш тоқининг, яъни h_{21} нинг камайишига олиб келади. Пақиқатдан Пам, транзистор эмит-терининг доимий тоқли маромида - $I_3 = \text{const}$, коллектордаги U_K -кучланишнинг ошиши Пажмий заряд қатламининг ва тескари силжиган коллектор-база ўтишнинг кенгайишига олиб келади. Агар транзисторнинг базаси юқориомли бўлса, Пажмий заряд қатла-мининг кенгайиши асосан базавий сопада рўй беради ва базанинг самарали кенглиги камаяди. База кенглигининг камайиши база-эмиттер чегарасидан базага пуркалган заряд ташувчилар концентрациясининг камайишига олиб (4,3-расмга қаранг) келади. Пуркалган заряд ташувчилар концентрациясининг камайиши эмиттер ўтишдаги кучланишнинг камайишига мосдир ва бу коллектор тоқининг камайишига олиб келади. Биқутбий транзисторларнинг бундай камчиликлари гетероўтикли транзисторларда йўқотилади. Эслатиб ўтамиз, гетероўтик деб турли кенгликдаги тақиқланган сопаларга эга бўлган икки яримўтказгич материаллардан ясалган р-п ўтика айтилар эди.

4.7-расмда гетероўтикли п-р-п транзисторнинг зонавий диаграм-маси келтирилган. Расмдан кўринишича эмиттернинг тақиқланган зо-насининг E_{g1} кенглиги база ва

коллекторнинг тақиқланган зонаси-нинг E_{q2} кенглигидан каттадир.

Эмиттер ва база орасига тўпри кучланиш берилганда электронлар учун потенциал тўсиқнинг кенглиги (φ_n) коваклар учун потенциал тўсиқ кенглигидан кичик бўлади. Бунинг натижасида токнинг электронлар бўйича j_n ташкил этувчиси (эмиттердан базага оқувчи ток) коваклар бўйича j_p ташкил этувчидан (базадан эмиттерга оқувчи ток) анча катта бўлади. Электронлар ва коваклар токининг бундай нисбати бир кўринишли заряд ташувчиларни - электронларни пуркаш имконини беради. Натижада гетероўтикли транзисторлардаги эмиттер ўтишининг



4.7-расм. Гетероўтикли p-p-n транзисторнинг зонавий диаграммаси.

самарадорлиги оддий биқутбий транзисторлардагига нисбатан анча каттадир. Базадан эмиттерга йўналган коваклар оқими Писобга олмаса бўладиган даражада камлигини Писобга олиб, гетероўтикли транзисторларнинг базавий соПасини эмиттер ва коллектор соПаларига нисбатан кўпроқ легирлаш мумкин. Бу юқорида айтиб ўтилган транзистор тузилмасидаги манфий тескари алоқани камайтириш имконини беради. Пақиқатдан Пам, агар база коллекторга нисбатан кучлироқ легирланган бўлса, коллектордаги тескари кучланишни оширишда Пажмий заряд қатлами фақат коллектор соПаси томон кенгайди. Базавий соПанинг кенглиги ўзгармайди ва транзисторнинг чиқиши билан кириши орасидаги тескари алоқа йўқ бўлади. Шундай

қилиб, гетероўтикли транзисторларнинг оддий бикутбий транзисторларга нисбатан асосий ютуқлари қуйидагилар: 1) эмиттернинг юқори самарадорлиги; 2) база қаршилигининг кичиклиги; 3) ток бўйича кучайтириш коэффициентининг юқорилиги; 4) ишлаш температура соласининг кенглиги. Температура соласининг кенглиги эмиттер соласининг кенглиги билан ифодаланеди: яъни гетероўтиklar юқори температураларда ҳам теска-ри тоklarнинг сезиларли ўзгаришсиз ишлай олади.

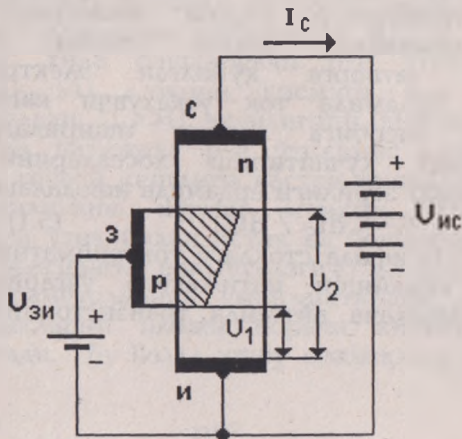
IV Боб бўйича мустақил назорат учун саволлар;

1. Бикутбий транзисторнинг ишлаш тамойили нимадан иборат?
2. "Эмиттер ўтик самарадорлиги" деганда нимади тушунасиз?
3. Коллектор ўтикнинг самарадорлиги нимага бошлиқ?
4. Умумий базали тузилма бўйича уланган транзисторнинг ки-риш ва чиқиш тавсифномалари мажмуининг хусусиятлари қандай?
5. Умумий эмиттерли тузилма бўйича уланган транзисторнинг кириш ва чиқиш тавсифномалари мажмуининг хусусиятлари қандай?
6. g -кўрсаткичлар тизимининг h -кўрсаткичлар тизимидан фарқи нималардан иборат?
7. Дайдишли транзисторнинг ишлаш тамойили нимадан иборат?
8. p - n - p ва n - p - n транзисторларнинг энергиявий зонавий диаграммаларини чизинг ва тушунтиринг.
9. Гетероўтик деб нимага айтилади?
10. Гетероўтикли транзисторларнинг энергиявий зонавий диаграммаларини чизинг ва тушунтиринг.

V БОБ. МАЙДОНИЙ ТРАНЗИСТОРЛАР.

5.1. Бошқарувчи р-п ўтикли майдоний транзисторлар

Бошқарувчи р-п ўтикли майдоний транзистор тузилмаси ва уни улаш усуллари 5.1-расмда кўрсатилган. Транзистор яримўтказгич материал бўлакчасидан ташкил топиб, унинг учқирраларида омик тугашувлар, ён қирраларида эса, р-п ўтик 0осил қилинган. Агар фойдаланилган яримўтказгич п-тур ўтказувчанликка эга бўлса, р-п ўтик 0осил қилиш учун ён қиррада р-тур ўтказувчанлик соёаси 0осил қилинади. Шу билан бирга, р-соёадаги акцепторлар концентрацияси п-соёадаги донорлар концентрациясидан анча катта ($p_p \gg n_n$) бўлиши ке-рак, бошқача айтганда, р-п ўтик носимметрик бўлиши керак. Носимметрик р-п ўтикка тескари кучланиш берилганда, Пажмий заряд соёаси яримўтказгичнинг камроқ



легиранган томонига қараб кенгайди.

5.1-расм. Бошқарувчи р-п ўтикли майдоний транзистор тузилмаси ва уни улаш

Ушбу Полда Пажмий заряд соласи п-тур ўтказувчанликли ярим-ўтказгич тарафга (5.1-расмдаги чизиқлар билан белгиланган сола Пажмий заряд соласига мос келади) кенгайди. Омик туташувлар орасидаги электронлар оқимий берилган $U_{ск}$ кучланиш таъсирида истокдан (пастки туташув) стокга (юқоридаги туташув) оқади. Агар бошқарувчи р-п ўтик билан (затвор деб аталган) исток орасида ташқи $U_{зи}$ кучланиш бўлмаганда истокдан стокка оқувчи ток яримўтказгич таёқчанинг бутун кесими бўйлаб (бу кесимни ток ўтказувчи канал, ёки соддагина "канал" деб аталади) оқади ва ток энг катта қийматга эга бўлади. Бошқарувчи электродга истокга нисбатан манфий кучланиш берилса, Пажмий заряд соласининг п-тур соласига силжиш туфайли ток ўтказувчи каналнинг кесими камаяди. Бунинг натижасида истокдан стокка йўналган ток Пажмий заряд соласи билан яримўтказгич таёқчанинг қарама-қарши қирралари орасидаги канал бўйлаб оқади. Бунинг сабаби Пажмий заряд соласида Паракатчан заряд ташувчиларнинг йўқлиги, яъни бу сола қаршилигининг каналнинг қолган қисмлари қаршилигидан анча катталигидадир. Затвордаги манфий кучланиш ортиши билан Пажмий заряд соласи кенглиги ошади, ток ўтказувчи каналнинг кесими камаяди ва натижада исток-сток занжирдаги ток камаяди. Майдоний транзисторнинг кириш токи тескари кучланишли р-п ўтиқдаги ток қийматига (тескари кучланишли р-п ўтиқдаги токни нолга тенг деб олиш мумкин) тенгдир. Шунинг учун майдоний транзистор кириш занжирида амалда ток истеъмол қилмайди. Чиқиш токини (стокдаги ток) бошқарувчи затворга қўйилган электрик майдонни ўзгартириш ёрдамида ток ўтказувчи канал кенглигини ўзгартириш Писобига амалга оширилади. Майдоний транзисторнинг кучайтириш хоссаларини вольт-ампер тавсифноманинг эгрилиги ёрдамида ифодалаш мумкин:

$$S = dI_C / dU_3 \quad (5.1)$$

Ушбу (5.1) ифода стокдаги ток қийматининг затвордаги кучланиш камайиши натижасида ўзгариш даражасини кўрсатади. Бошқача айтганда транзисторнинг кучайтириш

хоссалари исток ва стоклар орасидаги ток ўтказувчан канал қаршилигининг ўзгариш даражаси билан аниқланади.

Ток ўтказувчан канал қаршилигининг кўпроқ ўзгаришига эри-шиш учун фойдаланилаётган яримўтказгич таёқча кенглиги билан Пажмий заряд соласи кенглиги мутаносиб бўлиши керак. II Бобда кўрсатилганидек, р-п ўтикка тескари кучланиш берилса, Пажмий заряд соласи кенглиги (2.37) ифода ёрдамида аниқланади. Агар тескари кучланиш етарлича катта ($U \gg U_k$) ва р-п ўтик носимметрик ($N_0 \gg N_d$) бўлса, (2.37) ифодани қуйидагича ўзгартириш мумкин:

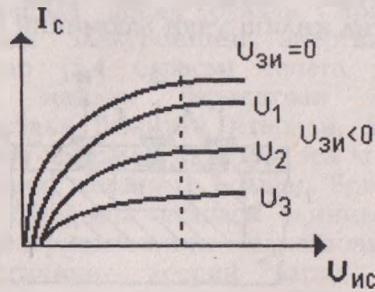
$$\sigma_n = (2\epsilon\epsilon_0\mu_n\rho U)^{1/2} \quad (5.2)$$

бу ерда, μ - электронлар Паракатчанлиги, ρ - яримўтказгичнинг со-лиштира қаршилиги. (5.2) ифодадан кўринишича, σ_n нинг катта қийматларини, ва натижада канал қаршилиги қийматларининг катта оралиқлардаги ўзгаришларини олиш учун, р-солиштира қаршилиги ва асосий заряд ташувчиларнинг μ -Паракатчанлиги катта қийматларга эга бўлган яримўтказгич материалдан фойдаланиш керак.

5.1-расмдан кўринишича Пажмий заряд соласи кенглиги канал узунлиги бўйича нотекисдир. Стокнинг яқинида Пажмий заряд соласи, транзисторнинг истоки яқинидагига нисбатан кенроқ. Бунинг сабаби бошқарувчи р-п ўтикнинг турли қисмларига турли катталикларда кучланиш берилганидир. Пақиқатдан Пам, агар истокдаги потенциални нолга тенг деб қабул қилсак, стокдаги потенциал $U_{ис}$ га тенг бўлади. Бу кучланиш яримўтказгич таёқчанинг бутун узунлиги бўйича тақсимланади ва бутун канал бўйича турли катталиклардаги кучланиш тушишлари $-U_1$, U_2 ва П.к.ларни Посил қилади. Унда бошқарувчи р-п ўтикнинг пастки қисмига $U = U_{зи} + U_1$, юқори қисмига эса, $U = U_{зи} + U_2$ кучланиш берилади. $U_2 \gg U_1$ эканлигини Писобга олиб, $U \gg U'$ экан-лигини ва натижада р-п ўтикнинг юқори қисмида Пажмий заряд соласи кенглиги пастки қисмдагига нисбатан каттароқ эканлигини кўриш мумкин. Транзистордаги бошқарувчи р-п ўтик билан исток ва бошқарувчи р-п ўтик билан сток орасидаги яримўтказгич материал қисмлари транзистор параметрларини ёмонлаштиради, шунинг учун Пам бу оралиқларни иложи борича кичикроқ қилишга Паракат қилинади. Бу Полда ушбу оралиқлардаги кучланиш

тушишларини Писобга олмаслик, $U_1=0$, ва $U_2=U_{ис}$ деб Писоблаш мумкин. Унда $U'=U_{зи}$ ва $U''=U_{зи}+U_{ис}$ бўлади. Бошқарувчи р-п ўтикдаги кучланиш ўзгарганда канал қаршилигининг ўзгаришини ошириш учун яримўтказгич таёқчанинг ик-кала томонларида р-п ўтик Посил қилинади. р-тур яримўтказгич асо-сида тайёрланган бошқарилувчи р-п ўтикли майдоний транзистор юқо-рида кўриб ўтилган транзистордан р-п ўтикнинг бошқарувчи электро-ди п-тур эканлиги, ва исток билан стоқ орасидаги кучланиш қутби қа-рама-қарши ишорага ўзгариши билан фарқ қилади. Бошқарувчи р-п ўтикли майдоний транзисторнинг чиқиш вольт-ампер тавсифномалари гурупи 5.2-расмда келтирилган.

Расмдан кўринишича, затворга берилган кучланишда ($U_{зи} = \text{const}$), стоқдаги кучланишнинг ортиши натижасида, стоқдаги ток тўйинишга чиқади ва стоқдаги маълум кучланиш қийматидан сўнг ток кучланишга бошлиқ бўлмай қолади. Стоқдаги токнинг чекланишининг асосий сабабларидан бири қуйидагича. Исток-стоқ қисмдаги кучланиш ортганда стоқдаги ток ортади. Стоқдаги токнинг ортиши, яъни майдоний транзистордаги канал орқали ўтаётган ток канал қаршилиги орқали кучланиш тушишини ортттиради, яъни бошқарувчи р-п-ўтикдаги ёпувчи кучланиш қийматининг ошишига олиб келади. Ёпувчи кучланишнинг ошиши ток ўтказувчан канал кесимининг ва канал орқали ўтаётган токнинг камайишига олиб келади. Бошқача айтганда, майдоний транзистор тузилмасида чиқиш токни ўз-ўзидан чегаралаш тизими негиз қилиб олинган. Бундан ташқари катта кириш кучланишларида майдоний транзистор чиқишидаги токнинг чегараланишига олиб келувчи яна бир физикавий механизм мавжуд. Қуйида шу механизмни кўриб чиқамиз.



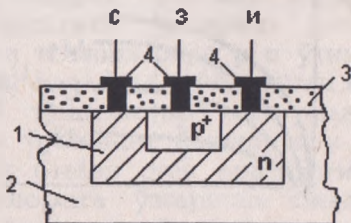
5.2-расм. Бошқарувчи р-п ўтикли майдоний транзисторнинг чиқиш вольт-ампер тавсифномалари гурупи.

5.1-расмдан кўринишича, ток ўтказувчан каналнинг кенлиги бошқарувчи р-п ўтикнинг юқори қисмида энг каттадир. Каналнинг бу қисмида кучланишнинг энг катта тушиши исток билан сток орасида юз беради. Яъни, каналнинг бу сопасида электрик майдон кучланганлиги энг каттадир. Маълумки, электрик майдон кучланганлигининг етарлича катта қийматларида заряд ташувчиларнинг Паракатчанлиги ($\mu_n \sim 1/E$) камаяди. Бу Полда ток зичлиги E га боПлиқ бўлмай қолади ва майдон кучланганлигининг ошишига қарамай берилган кучланишнинг ошиши билан ток ортади. Бошқача айтганда, асосий заряд ташувчи-ларнинг Паракатчанлиги ўзгариши Писобига транзистор канали орқали ўтаётган токнинг чегараланиши кузатилади.

Пақиқий транзисторларда токнинг ўз-ўзидан чегараланишининг иккала механизми Пам мавжуддир. 5.3-расмда Позирги вақтда энг кўп тарқалган, планар технология асосида тайёрланган бошқарувчи р-п ўтикли майдоний транзисторнинг содда тузилмаси келтирилган.

Дастлабки ўтказувчанлиги р-тур бўлган яримўтказгич материалда п-тур ўтказувчан канал Посил қилиш учун унга донор киришма диффузия қилинади. Кейин катта концентрацияли акцептор киришманинг диффузияси ёрдамида бошқарилувчи р-п ўтикнинг р⁺- қатлами Посил қилинади. Керакли жойларга, бошқарувчи р⁺-қатлам ва ток ўт-казувчан каналлар устига Пимояловчи диэлектрик қатлам ётқизилгандан сўнг едириш орқали "дарча"лар очилади,

шунингдек исток, затвор, ва сток соПаларига омик туташувлар Посил қилиш учун алюминий ётқизилади.



5.3-расм. Планар технология асосида тайёрланган бошқарувчи

p-n ўткили майдоний транзисторнинг содда тузилмаси.

5.2. Ажратилган затворли майдоний транзисторлар (МДЯ-транзисторлар)

Бошқарувчи p-n ўткили майдоний транзисторларда ток ўтказув-чан каналнинг ўлчамларини бошқаришни p-n ўтикга бериладиган ёпувчи кучланиш ёрдамида амалга оширилади. Ажратилган затворли майдоний транзисторларда бошқарувчи кучланишни яримўтказгичдан диэлектрик қатлами билан ажратилган металл электродга берилади. Бу транзисторнинг - МДЯ-транзистор (металл-диэлектрик яримўтказгич) деган янги ном олишига сабаб бўлди. МДЯ-транзисторнинг ишлашини таълил қилиш учун металл-диэлектрик-яримўтказгич тузилмасининг зонавий диаграммасини кўриб чиқамиз.

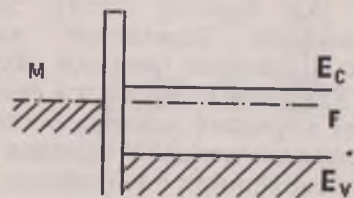
Термодинамик мувозанат вақтида Ферми сатплари металлда, диэлектрик ва яримўтказгичда бир хил баландликда жойлашган (5.4-расм). МДЯ-тузилмасини бир томондан металл, иккинчи томондан яримўтказгич қопламларидан ташкил топган конденсатор сифатида кўриб чиқиш мумкин. Содда Пол учун яримўтказгич p-тур ўтказувчанликка эга бўлсин.

Ушбу тузилмага шундай кучланиш берайликки, металлнинг по-тенциали манфий, яримўтказгич потенциали-мусбат бўлсин. Бу Полда яримўтказгичнинг диэлектрик билан чегарасида мусбат заряд Посил бўлади. Ушбу заряд мавжуд электрик майдон таъсирида яримўтказгичдаги

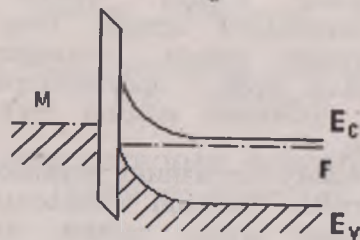
электронларнинг бўлиниш чегарасидан Пажмига томон итарилиши натижасида Посил бўлади. Яримўтказгичнинг чегараолди соПасида электроннинг энергияси ошади ва энергиявий зоналар (5.4 б-расм) тепага эгилади. Посил бўлган электрик майдон Паракатчан элек-тронларни яримўтказгич кристалл Пажмига итаради, яримўтказгич - диэлектрик бўлиниш чегараси яқинида эса компенсирланган мусбат зарядли донор киришма қолади. Бошқача айтганда, яримўтказгичнинг бўлиниш чегараси яқинида асосий заряд ташувчилар концентрациясининг камайиши, яъни ушбу соПада яримўтказгичнинг асосий заряд ташувчилардан камбаПалланиши юзага келади. Бунинг натижасида яримўтказгичнинг қаршилиги ортади. Агар кўрилайтган МДЯ-тузилмага шундай ташқи кучланиш берилсаки, металлнинг потенциали мусбат, яримўтказгич потенциали эса манфий бўлса, электрик майдон тескари ишорали йўналишга эга бўлади.

Бу Полда яримўтказгичнинг чегараолди соПасида, яримўтказгич-диэлектрик бўлиниш чегарасида электронлар концентрацияси ортади. Бунинг сабаби, электронларнинг яримўтказгич Пажмидан бўлиниш чегарасига тортилиши ва натижада чегараолди қатламининг электронларга бойиши натижасида қаршилигининг кичик қийматга эга бўлишидадир. Чегараолди қатламнинг бойиши Полида бу ердаги электронларнинг энергияси камаяди ва энергиявий зоналар диаграммалари пастга (5.4 б-расм) эгилади.

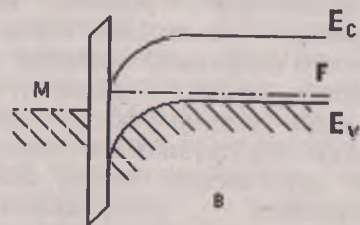
Шундай қилиб МДЯ-тузилма ўтказувчанлиги (аниқропи сиртий ўтказувчанлик) МДЯ-тузилмага берилган кучланиш қутби ва кучланиш катталигига боПлиқ Полда кўпайиши, камайиши, ишорасини ўзгартириши мумкин. Ўтказувчанликнинг бундай ўзгаришидан ажратилган затворли майдоний транзисторларда чиқиш токини бошқариш учун фойдаланилади.



а



б

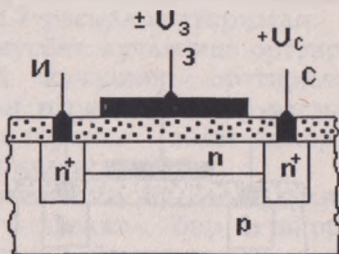


в

5.4-расм. МДЯ-тузилмасига кучланиш берилганда яримўтказгич энергиявий зоналарининг курилиши.

5.3. МДЯ-транзисторлар тузилмаси ва уларнинг тавсифномалари.

Ажратилган затворли майдоний транзисторнинг энг содда тузилмаси 5.5-расмда келтирилган. Ушбу планар деб аталган тузилмани майдоний транзисторда бошланғич материал сифатида р-тур ўтказувчанликка эга кремний ишлатилган. Бошланғич материалга диффузия усули билан п-тур ўтказувчанликка эга канал, исток ва стокларни яратиш, п⁺-соПалар Посил қилиш учун донор киришмалар киритилади. Сўнгра бутун материал диэлектрик қатлами билан беркитилади. Диэлектрик сифатида, асосан яримўтказгич кремний материалыни



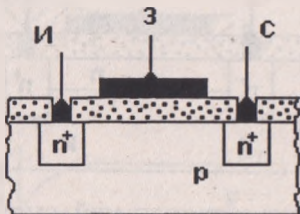
5.5-расм. Ажратилган затворли майдоний транзисторнинг содда тузилмаси.

термик оксидлаш йўли билан олинадиган SiO₂ қатламидан фойдаланилади. п⁺-қатламлар устидаги SiO₂ парда кимёвий йўл билан олиб ташланади ва ушбу п⁺-соПаларда омик туганшулар ташкил этиш учун Посил бўлган "дарча"ларга металл ўтказилади. Металл сифатида одатда алюминий қўлланилади. МДЯ-тузилмани Посил қилиш учун каналнинг п-соПаси устига алюминийни бевосита оксид қатлам устига ўтказилади. Шундай қилиб п⁺-соПалар майдоний транзисторнинг истоки, ўтказувчан канал устида жойлашган металл электрод эса бошқарувчи электрод, яъни затвор бўлиб Пизмат қилади. МДЯ-тузилма ток ўтказувчан канали мавжуд майдоний транзистор затворидаги (истокка нисбатан) Пар қандай қутбли кучланишда ишлайди. Шундан, затвордаги кучланиш мусбат бўлганда канал соПаси электронларга бойийди ва каналнинг ўтказувчанлиги

ортади. Бу стокдаги кучланиш доимий Полатда исток-сток соласидаги токнинг ошишига олиб келади. Затворга манфий кучланиш берилган Полатда канал соласи электронларга камбағаллашади ва каналнинг ўтказувчанлиги камаяди. Бу стокдаги токнинг камайишига олиб келади.

Айниган канали майдоний транзисторлардан ташқари майдоний транзисторларнинг яна бир тури - инверсия канали мавжуд МДЯ-транзисторлардир, ёки содда қилиб айтганда, инверсия канали мавжуд майдоний транзисторлардир.

Инверсия каналига эга майдоний транзисторларнинг энг содда тузилмаси 5.6-расмда кўрсатилган. Ушбу кўринишдаги майдоний транзистор тузилмасида ўтказувчан каналнинг диффузиявий соласи мавжуд эмас. Бу кўринишдаги майдоний транзисторнинг ишлашини муфассал



5.6-расм. Инверсия каналига эга майдоний транзисторларнинг энг содда тузилмаси.

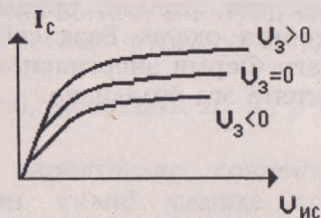
кўриб чиқайлик. Исток ва стоклар вазифасини бажарувчи U^+ соғаларга кучланиш берайлик.

Затворда кучланиш бўлмаганда исток ва стоклар орасидан ток оқмайди, чунки исток стокдаги Пар қандай қутбли кучланиш қийматларида n^+ - p ўтиклардан бирига тескари йўналишда кучланиш берилган бўлади. Бизга маълумки, тескари кучланишда ўтикнинг қаршилиги катта бўлади. Затворга тескари кучланиш берилганда p -яримўтказгич-диэлектрик бўлиниш чегарасида электронлар концентрацияси ортади, лекин n^+ - p ўтиклардан бирига тескари кучланиш берилган бўлиб, ис-ток билан сток орасида ток оқмайди.

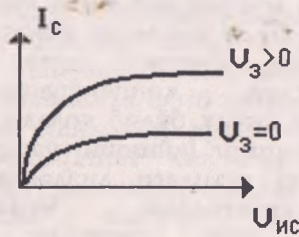
Энди затворга мусбат кучланиш бериш Полини кўриб чиқайлик. Бу Полда мусбат кучланиш қиймати ошиши билан затвор ости соПа-сидаги коваклар концентрацияси камаяди. Ушбу кучланишнинг етарлича катта қийматларида сирт олдидаги коваклар концентрацияси электронлар концентрациясидан кичик бўлиб қолади, яъни яримўтказгич ўтказувчанлиги турининг (айниши) ўзгариши амалга ошади. Бу ўзгариш затвор остидаги диэлектрикка ёпишган тор қатламдагина кузатилади. Бунинг натижасида яримўтказгичнинг тор сиртолди соПасида n-тур ўтказувчанликли канал Посил бўлади ва исток билан сток орасидан ток оқади. Затвордаги мусбат кучланиш ортиши билан, n-каналнинг ўтказувчанлиги Пам ортади ва натижада сток токи ортади. Затвордаги U_3 кучланишларнинг турли қийматлари учун МДЯ-тран-зисторнинг вольт-ампер тавсифномалари 5.7-расмда келтирилган.

Затвордаги мусбат кучланиш орттирилса стокдаги ток ортиши, манфий кучланиш орттирилса, стокдаги ток камайиши расмдан кўринмоқда. 5.8-расмда айтиш каналига эга МДЯ-транзисторнинг вольт-ампер тавсифномалари солиштириш учун келтирилган.

Расмдан кўринишича, бу Полда транзистор, затвордаги кучланишнинг фақат бир ишорасидагина, яъни ўтказувчанлик турини ўзгартиришга олиб келувчи қутбли кучланишдагина ишлар экан.



5.7-расм. МДЯ-транзисторнинг вольт-ампер тавсифномалари.

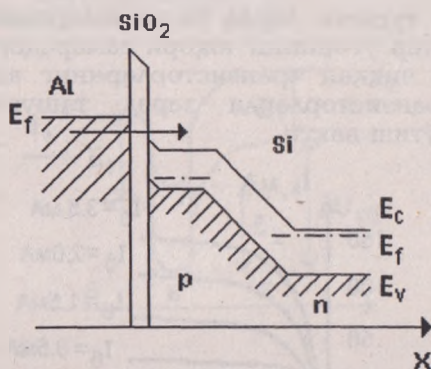


5.8-расм. Айниш каналли МДЯ-транзисторнинг вольт-ампер тавсифномалари.

5.4. Туннел транзисторлар

Туннел транзисторлар - бу ишлаш асоси туннел самарасидан иборат бўлган транзисторлардир. Позирги вақтда туннел транзисторларнинг бир неча кўринишлари ишлаб чиқилган бўлиб, улар биқутбий ёки майдоний транзисторларга нисбатан анча яхши ишчи тавсифномаларига эгадирлар. Мисол сифатида металл-диэлектрик р-п ўтик-МД-р-п (5.9 а-расм) кўринишидаги туннел транзисторнинг зонавий диаграммасини кўриб чиқамиз.

Эмиттер-базага кучланиш берилганда ток эмиттердан базага юққа диэлектрик қатлами орқали, электронларнинг туннелланиши йисобига оқади. База соласига туннелланган электронлар базадаги Ферми энергиясига нисбатан бир неча kT юқориқоқ энергияга эга бўладилар.



5.9 а-расм. p-n ўтик - МД - p-n кўринишидаги туннел транзисторнинг зонавий диаграммаси.

Ушбу электронлар панжара билан иссиқлик мувозанатида бўлмайдилар ва улар иссиқ электронлар деб аталадилар. Бундай транзисторларни баъзида иссиқ электронлар асосидаги транзисторлар деб аташади. Иссиқ электронлар коллекторга тезда етиб келадилар ва коллектор токини $I_{осил}$ қиладилар, чунки электронларнинг базадаги рекомбинацияси оптимальлиги жуда кичикдир. 5.9 б-расмда МД-p-n туннел транзисторнинг чиқиш вольт-ампер тавсифномалари келтирилган. Эмиттер-металл электрод сифатида Al қатлами ишлатилади. Электронлар пуркалувчи диэлектрик қатлами

SiO_2 дан тайёрланиб, қалинлиги 20 \AA , p-тур база қалинлиги

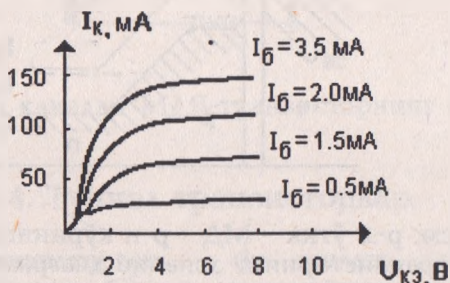
1500 \AA , ундаги акцепторлар концентрацияси $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Умумий эмиттерли қилиб улашда ток бўйича статик кучайтириш коэффициенти эмиттернинг кичик (1,0-2,0 mA) тоқларида 100-150 га етади.

Ўтаюқоритакрорийликлар соҳасида ишлаш учун туннел тран-зисторнинг икки гетероўтиклардан иборат тузилмаси (5.10-расм) таклиф этилган. Эмиттер гетероўтик

сифатида p-тур GaAs-Sb ва базасининг қалинлиги 50 \AA бўлган n-тур GaInAs лардан фойдаланилади. Бундай транзистордаги асосий ток юпқа база орқали туннелланувчи тоқдир. Бу токни қуйидагича ифодалаш мумкин:

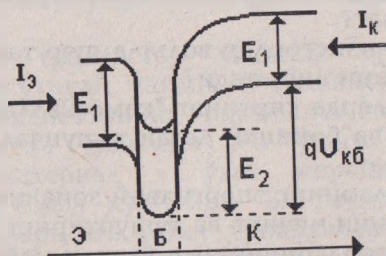
$$I_T \sim \exp(q \cdot U_{эб} / kT)$$

Бир хил турдаги заряд ташувчиларнинг туннелланиши сабабли эмиттер ўтишнинг юқори самарадорликка эришиши биз танишиб чиққан транзисторларнинг асосий ютувидир. Кўрилган транзисторларда заряд ташувчиларнинг боза орқали учиб ўтиш вақти

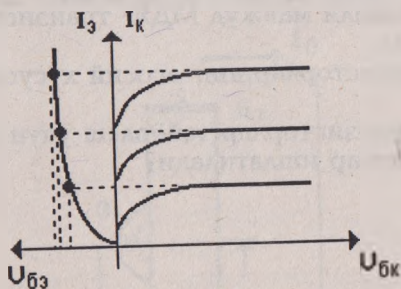


5.9 б-расм. МД-р-п туннел транзисторнинг чиқиш вольт-ампер тавсифномалари.

жуда кичиклиги сабабли, базавий сопадаги рекомбинациявий йўқотишлар Писобга олмаса бўладиган даражада кичикдир. Мисол учун, 5.10-расмда икки гетероўткили туннел транзисторлар кириши ва чиқишидаги статик вольт-ампер тавсифномалар келтирилган. Расмдан кўринишича, эмиттер ва коллектор токлари катталиклари бўйича бир-бирига яқиндир, бу э са эмиттер ўтишнинг юқори самарадорлиги ва базавий токни узатиш коэффицентининг катталигини кўрсатади.



а)



б)

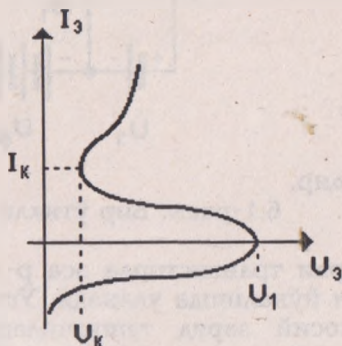
9.10-расм. Икки гетероўтикли туннел транзисторларнинг зонавий диаграммаси (а); кириш ва чиқишдаги статик вольт-ампер тавсифномалари (б).

транзисторнинг ишлаш асослари ва асосий тавсифномаларини кўриб чиқайлик. Транзисторнинг эмиттери ва пастки асоси (6.1-расмга қаранг) орасида р-п ўтикни тескари (ёпувчи) йўналишда U_3 кучланиш мавжуд бўлсин. Шунингдек, юқори асосдаги потенциал паст асосдагига қараганда юқорироқ бўладиган қилиб, транзисторнинг асослари орасига кучланиш берилган деб Писоблайлик. Бу кучланиш таъсирида транзистор асослари орасида оқувчи электронлар токи эмиттер яқинида кучланишнинг U_1 га тенг тушувига олиб келади. Бунда р-п ўтикга берилган тўла кучланиш қуйидагига тенг:

$$U_{p-n} = U_3 - U_1 \quad (6.1)$$

U_3 кучланишнинг $0 < U_3 < U_1$ ораликда ўзгаришида р-п ўтик ёпиқ бўлади ва у орқали жуда кичик тескари ток оқади. $U_3 > U_1$ Полида эмиттер соПаси тўпри йўналишда силжийди ва ковакларни асосий со-Пага йўналтиради.

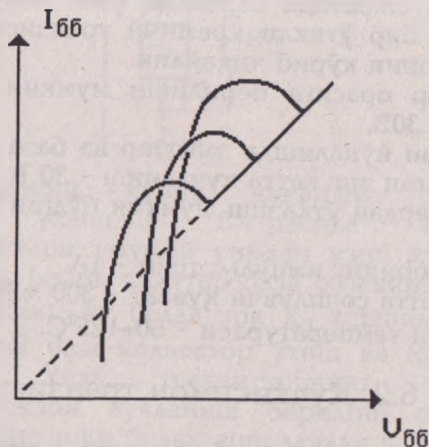
U_{66} кучланиш Посил қиладиган электрик майдон таъсирида асосга йўналган коваклар асоснинг пастки қисмига ўтадилар (6.1-расмга қаранг), бу эса асоснинг ушбу қисмининг қаршилигини камайтиради. Асоснинг пастки қисми қаршилигининг камайиши U_1 кучланишнинг янада кўпроқ камайишига ва натижада тўпри йўналишда уланган р-п ўтикнинг U_{p-n} кучланишининг ошишига олиб келади. р-п ўтикдаги тўпри кучланишнинг ортиши р-п ўтик орқали токнинг кескин-кўчки-симон ортишига олиб келади. Бирдаврли транзисторнинг кириш вольт-ампер тавсифномаси 6.2-расмда келтирилган. Транзисторнинг улаиши ва эмиттер токининг ошиши эмиттернинг нол



токида амалга ошиши расмдан кўриниб турибди.

6.2-расм. Бирдаврли транзисторнинг кириш вольт-ампер тавсифномаси.

Бир ўткили транзисторнинг базалариаро вольт-ампер тавсифномаси 6.3-расмда келтирилган. Келтирилган бошланишдан кўринишича, $U_3 = \text{const}$ бўлганда тавсифнома манфий ўтказувчанликли қисмга эга экан. Бир ўткили транзисторнинг базалариаро вольт-ампер тавсифно-масида манфий ўтказувчанликли қисмнинг пайдо бўлиш сабабини



кўриб чиқайлик.

6.3-расм. Бир ўткили транзисторнинг базалариаро вольт-ампер тавсифномаси.

Бир ўткили транзисторнинг р-п ўтигига берилган кучланиш учун ёзилган тенгламага асосан, $U_1 < U_3$ Полида р-п ўтикга тўпри йўналишда кучланиш берилган ва р⁺-қатлам ковакларни п-базага пуркайди. Транзисторнинг базалариаро берилган U_{66} кучланиш ортиши билан U_1 катталиқ ортади ва натижада $U_{р-п}$ камаяди. р-п ўтикга берилган тўпри кучланишнинг камайишида тўпри ток камаяди ва демак, р⁺-эмиттердан п-базага йўналган коваклар оқими камаяди.

Ушбу Полда базанинг қаршилиги ортади ва бу Пол U_{66} кучланиш ортганида базалараро токнинг ошишини кўрсатади. U_{66} ни яна орттириш ва U_1 нинг ошиши

эмиттер ўтишдаги кучланишнинг нолга тенг бўлишига ($U_{p-n}=0$) олиб келади, ўтик ёпилади ва ковакларни p^+ -сопадан n -базага пуркалиши тўхтайди. Бунда транзистор базавий сопасининг қаршилиги кескин ортади, бу эса I_6 токнинг кескин камайишига олиб келади. $U_{p-n}=0$ қиймат транзисторнинг базалариаро вольт-ампер тавсифномасидаги энг катта ток қийматига мос келади. U_{66} кучланишнинг кейинги ошишлари базавий сопа қаршилигининг Ом қонунига асосан чизиллий ортишига олиб келади.

Мисол сифатида саноатда кенг ишлаб чиқариладиган КТ 117 тур бир ўтиккли кремний транзисторнинг чегаравий параметрларини кўриб чиқайлик:

Базалар орасига берилиши мумкин бўлган энг катта кучланиш - 30В.

Тескари йўналишда эмиттер ва база орасига берилиши мумкин бўлган энг катта кучланиш - 30 В.

Эмиттердан ўтказиш мумкин бўлган энг катта ток кучи - 50 мА.

Эмиттернинг импульс токи - 1А.

Энг катта сочилувчи қувват - 300 мВт.

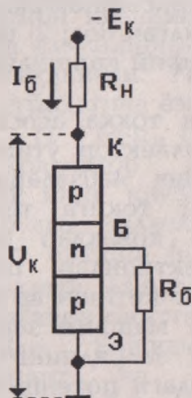
Ишлаш температураси - $60\div 125^\circ\text{C}$.

6.2. Кўчкисимон транзисторлар

Сўнги вақтда кўчкисимон транзисторлар кенг тарқалди. Кўчкисимон транзисторлар ўзларининг тузилиши ва ясалишига кўра оддий биқутбий транзисторларга ўхшашидир. Ушбу транзисторларда Пам эмиттер, база, коллектор сопалари мавжуддир ва шунингдек биқутбий транзисторлардаги каби база-эмиттер ўтишга тўпри ва база-коллектор ўтишга тескари кучланиш берилади. Кўчкисимон транзисторнинг биқутбийдан асосий фарқи, кўчкисимон транзисторнинг катта коллектор кучланишларида ишлашидадир. Маълумки, $p-n$ ўтикга берилган катта коллектор кучланишларда ўтик орқали ўтадиган токнинг кескин ошиши, яъни кўчкисимон тешилиш ва коллектор токининг кескин ошиши кузатилади.

Коллектор токининг ортиши эмиттер токининг ошиши билан эмас, балки коллекторнинг Пажмий заряд сопасидаги зарбавий ионланиш билан бошлиқдир. Бу содаса кўчкисимон транзистор ишлашининг асосидир. Кўчкисимон

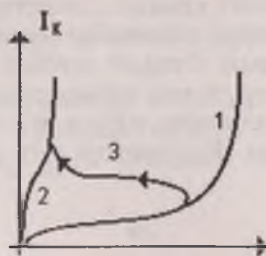
транзисторнинг ишлаш асосларини ва транзистор вольт-ампер тавсифномасида манфий қаршилик соласи Посил



булиши сабабларини кўриб чиқайлик. Кўчкисимон транзисторнинг уланиши 6.4-расмда келтирилган. Транзистор эмиттери умумий симдан узиб қўйилган деб тасаввур қилайлик (яъни, эмиттер-база соланинг қаршилиги чексиз катта бўлсин). Бу Полда ток $R_б$ қаршилик, тескари кучланиш берилган база-коллектор ўтиш ва $R_к$ қаршилик орқали оқади. Унда транзисторнинг вольт-ампер тавсифномаси тескари кучланиш берилган p-n ўтик - коллектор-база ўтиш токи билан аниқланади ва 6.5-расмдаги 1-кўринишга эга бўлади. Коллектор-базадаги $U_{ко}$

6.4-расм. Кўчкисимон транзисторнинг p-n-p кўринишда уланиши.

кучланишда токнинг кескин ошиши p-n ўтикнинг кўчкисимон тешилиши билан бошлиқдир. Энди транзисторнинг базаси узиб қўйилган Полдаги транзисторнинг ишлашини кўриб чиқайлик (узилган базали транзисторни улаш). 6.5-расмдан кўринишича транзисторнинг коллектор ўтиши тескари йўналишда,



Эмиттер уланиш эса тўпри йўналишда уланган.

6.5-расм. Кўчкисимон транзисторнинг вольт-ампер тавсифномалари:

- 1) эмиттер узилган Пол; 2) база узилган Пол;
- 3) манфий қаршиликли Пол.

Шунинг учун ўтаётган токка асосий қаршиликли тескари кучланиш берилган коллектор ўтиш кўрсатади. Транзистор уланишнинг бош-ланПич лаПзаларида ток коллектор р-п ўтикнинг $I_{КО}$ тескари токига тенг. Ушбу ток базадан коллекторга йўналган коваклар оқими ва коллектордан базага йўналган электронлар оқимидан иборат. База соПасидан ковакларнинг кетиши ва бу ерга электронларнинг келиши база соПасида манфий заряднинг Посил бўлишига олиб келади. Манфий за-ряднинг п-базада Посил бўлиши эмиттер ва база орасидаги потенциал тўсиқ баландлигининг пасайишига олиб келади. Бу токнинг ортишига ва тешилиш кучланишининг камайишига (6.5-расм, 2-боПланиш) олиб келади. Потенциал тўсиқ баландлигининг пасайиши натижасида эмиттердан базага электронларнинг манфий зарядини компенсирловчи ва коллектор ўтиш токини оширувчи коваклар йўналади. 4-бобда кўрса-тилганидек, транзисторнинг чиқиш ва киришидаги тоklar нисбати (бизнинг Полда коллектор токининг эмиттер токига нисбати) h_{21} - ток узатиш коэффицентида тенг: $h_{21} = I_K / I_Э$.

Бу ердан кўринишича эмиттердан базага пуркалган ковакларнинг h_{21} қисми коллекторга етиб борар экан. Ковакларнинг $(1-h_{21})$ қисми эса базавий соПанинг манфий зарядларини мувозанатлар экан. Электр-бетарафлик шартига асосан, заряд Посил қилувчи қандайдир ток, шу зарядни компенсирловчи токка тенг бўлиши керак. Шунинг учун $I_Э \cdot (1-h_{21}) = I_{КО}$. Кетма-кет уланган занжирнинг Памма қисмларида ток бир хил бўлганлиги сабабли,

$$I_Э = I_K = I_C / (1 - h_{21}) \quad (6.1)$$

Шундай қилиб, I_K нинг Пар қандай ошиши, ушбу Полда заряд та-шувчиларнинг кўчкисимон ошиши ва эмиттер токининг ошишига олиб келади. Эмиттер токининг ошиши, ўз навбатида коллектор токининг ошишига олиб келади. Транзистор тузилмасида бундай мусбат тескари алоқанинг мавжудлиги транзистор вольт-ампер тавсифномасидаги ман-фий қаршиликли қисмнинг пайдо бўлишига олиб келади (6.5-расм, 3-боПланиш). Коллектор р-п ўтик соПасида заряд

ташувчиларнинг кўчки-симон кўпайишида $I_{к0}$ коллектор токининг бошланғич қиймати ва h_{21} катталик заряд ташувчиларнинг кўчкисимон кўпайиш коэффициентини M га кўпайтирилади. Берилган кучланишга боғлиқ катталик - M (3.33) ифода орқали аниқланади. Ушбу Полда транзистор орқали ўтувчи ток (6.1) қуйидагича ёзилади:

$$I = M \cdot I_{к0} \cdot (1 - M \cdot h_{21}) \quad (6.2)$$

Транзисторнинг коллектор ўтишидаги кучланиш ошганда M ор-тади. M нинг қиймати шундай даражага етсаки, унда $M \cdot h_{21} = 1$ бўлса, коллектор токи кескин орта бошлайди. Токнинг ушбу ортиши h_{21} нинг ортишига олиб келади ва $h_{21} \cdot M$ бирдан катта ($M \cdot h_{21} > 1$) бўлиб қолади. Яъни, коллектор токининг кўпайиши эмиттер токининг ортишидан каттароқ бўлиб қолади. Бошқача айтганда базадан коллекторга ковакларнинг ва коллектордан базага электронлар тоқларининг йиқиндиси эмиттердан базага йўналган коваклар тоқидан катта бўлади. Демак, база манфий, коллектор эса мусбат зарядланади, бу эса коллектордаги кучланишнинг тушишига олиб келади. Транзистор орқали оқаятган токнинг ошиши сабабли коллектордаги кучланишнинг камайиши транзистор вольт-ампер тавсифномасида манфий қаршиликли қисмининг пайдо бўлишига олиб келади.

Коллектор ўтишидаги кучланиш тушишининг камайиши M нинг камайишига, ва натижада $M \cdot h_{21}$ нинг камайишига олиб келади. $M \cdot h_{21}$ бирга тенг бўлиб қолиши билан коллектордаги кучланишнинг камайиши тўхтайд.

Қуйида саноатда кенг ишлаб чиқариладиган ГТ338 кўчкисимон транзисторнинг энг катта чегаравий параметрлари келтирилади:

$I_{кmax}$ - кўчкисимон маромдаги коллекторнинг энг катта токи - 50 мА;

$U_{кЭ}$ - коллектор-эмиттердаги энг катта чегаравий кучланиш - 20 В;

$P_{кmax}$ - коллектор сочувчи чегаравий доимий қувват - 100 мВт;

T_{max} - ўтикнинг чегаравий температураси - 85°C.

6.3. Коллектор-сирқишли транзисторлар

Кўчкисимон транзисторнинг ишлашини тафлил қилишда коллектор р-п ўтиқдаги заряд ташувчиларнинг

6.7-расм. Коллектор сирқишли транзисторнинг кириш тавсифномалари.

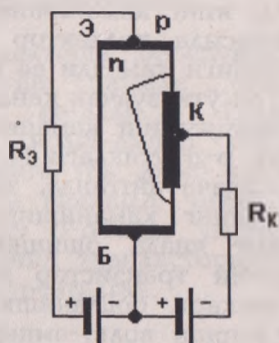
Транзисторнинг эмиттери ва коллектори орасига $U_{кэ}$ кучланиш берилганда, тескари кучланиш берилган p-n коллектор ўтиш орқали унча катта бўлмаган тескари ток оқади. $U_{кэ}$ кучланишни ошириш сирқиш канали орқали токнинг ошишига, базавий сола қаршилигининг камайишига ва эмиттер токининг ошишига, бу эса ўз навбатида коллектор токининг ошишига олиб келади. Яъни, коллектор сирқишли транзисторнинг тузилишида мусбат тескари алоқа мавжуддир. Ушбу алоқа коллектор сирқишли транзисторнинг вольт-ампер тавсифномасида манфий қаршиликли қисмнинг пайдо бўлишига (6.7-расм) сабабдир.

6.4. Пурковчи майдоний транзисторлар

Пурковчи майдоний транзистор ўзининг тузилмаси бўйича 5.1-§ да кўрилган бошқарилувчи p-n ўтикли майдоний транзисторга жуда ҳам ўхшашдир. Ушбу икки яримўтказгич асбобларнинг фарқи шунда-ки, пурковчи майдоний транзистор Полида омик туташувлардан бири (5.1-расмга қаранг) p-n ўтик билан алмаштирилган. 6.8-расмда келтирилган пурковчи майдоний транзистор тузилмаси ва улаш усулларини кўриб чиқайлик. n-каналли транзистор Полида (6.8-расмга қаранг) пастки электрод n-тур ўтказувчанликка эга.

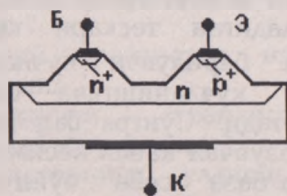
Юқоридаги электрод p-турга эга ва n-тур ўтказувчанликка эга бўлган канал билан p-n ўтик Посил қилади. Ушбу электрод тран-зисторнинг эмиттери деб аталади. Майдоний транзистор тузилмасида p-n ўтикни бошқарувчи-затвор хизматини бажарувчи ён томондаги электрод пурковчи майдоний n-каналли транзистор тузилишида p-тур ўтказувчанликка эгадир ва у коллектор вазифасини, яъни заряд ташув-чиларни йиқувчи электрод вазифасини бажаради. Ушбу p-n ўтик шунинг учун ҳам коллектор ўтиш деб ҳам аталади. Пурковчи майдоний транзисторда (худди биқутбий транзистор тузилмасидагидек) коллектор ўтиш тескари йўналишда, эмиттер эса тўғри йўналишда улангандир. Тузилмаси 6.8-расмда кўрсатилган

пурковчи майдоний транзисторнинг ишлаш асосларини қисқача кўриб чиқайлик.



6.8 а-расм. Пурковчи майдоний транзисторни улаш.

Коллектор р-п ўтиқга берилган U_k манфий кучланиш ток ўтка-зувчи каналнинг Пажмий заряд соПаси билан ўтиқнинг тўла ёпилган Полатиға мос келсин. Бу Полда коллектор занжирида берилган кучланиш катталиғиға кучсиз боПлиқ бўлган унча катта бўлмаган I_{k0} ток оқади.



6.8 б-расм. Пурковчи майдоний транзистор тузилмаси.

Коллектор токининг коллектордаги кучланишға боПлиқлиғи жуда кучсиз бўлгани учун (бу Пол тескари кучланиш берилмаган р-п ўтиқдаги тоқлар учун ўринли) $I_k = \text{const}$ деб Писоблаш мумкин ва бу Полда коллектор ўтиқ ток генератори сифатида ишлайди. Эмиттер ўтишға қўйилган кучланиш нолга тенг бўлсин ($U_э = 0$), бу Полда эмиттер занжиридан унча катта бўлмаган тўпри ток оқади. Коллектор р-п ўтиқнинг тескари токи билан боПлиқ

6.7-расм. Коллектор сирқишли транзисторнинг кириш тавсифномалари.

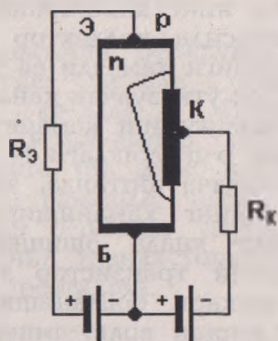
Транзисторнинг эмиттери ва коллектори орасига $U_{кэ}$ кучланиш берилганда, тескари кучланиш берилган р-п коллектор ўтиш орқали унча катта бўлмаган тескари ток оқади. $U_{кэ}$ кучланишни ошириш сирқиш канали орқали токнинг ошишига, базавий сола қаршилигининг камайишига ва эмиттер токининг ошишига, бу эса ўз навбатида коллектор токининг ошишига олиб келади. Яъни, коллектор сирқишли транзисторнинг тузилишида мусбат тескари алоқа мавжуддир. Ушбу алоқа коллектор сирқишли транзисторнинг вольт-ампер тавсифномасида манфий қаршиликли қисмнинг пайдо бўлишига (6.7-расм) сабабдир.

6.4. Пурковчи майдоний транзисторлар

Пурковчи майдоний транзистор ўзининг тузилмаси бўйича 5.1-§ да кўрилган бошқарилувчи р-п ўтикли майдоний транзисторга жуда ҳам ўхшашдир. Ушбу икки яримўтказгич асбобларнинг фарқи шунда-ки, пурковчи майдоний транзистор Полида омик туташувлардан бири (5.1-расмга қаранг) р-п ўтик билан алмаштирилган. 6.8-расмда келтирилган пурковчи майдоний транзистор тузилмаси ва улаш усуллари кўриб чиқайлик. п-каналли транзистор Полида (6.8-расмга қаранг) пастки электрод п-тур ўтказувчанликка эга.

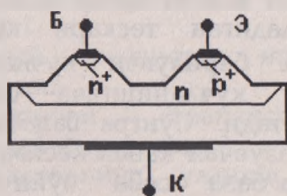
Юқоридаги электрод р-турга эга ва п-тур ўтказувчанликка эга бўлган канал билан р-п ўтик Посил қилади. Ушбу электрод тран-зисторнинг эмиттери деб аталади. Майдоний транзистор тузилмасида р-п ўтикни бошқарувчи-затвор хизмати бажарувчи ён томондаги электрод пурковчи майдоний п-каналли транзистор тузилишида р-тур ўтказувчанликка эгадир ва у коллектор вазифасини, яъни заряд ташув-чиларни йиғувчи электрод вазифасини бажаради. Ушбу р-п ўтик шунинг учун ҳам коллектор ўтиш деб ҳам аталади. Пурковчи майдоний транзисторда (худди биқутбий транзистор тузилмасидагидек) коллектор ўтиш тескари йўналишда, эмиттер эса тўғри йўналишда улангандир. Тузилмаси 6.8-расмда кўрсатилган

пурковчи майдоний транзисторнинг ишлаш асосларини қисқача кўриб чиқайлик.



6.8 а-расм. Пурковчи майдоний транзисторни улаш.

Коллектор р-п ўтикга берилган U_k манфий кучланиш ток ўтка-зувчи каналнинг Пажмий заряд соПаси билан ўтикнинг тўла ёпилган Полатига мос келсин. Бу Полда коллектор занжирида берилган кучланиш катталигига кучсиз боПлиқ бўлган унча катта бўлмаган I_{k0} ток оқади.



6.8 б-расм. Пурковчи майдоний транзистор тузилмаси.

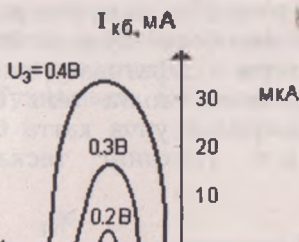
Коллектор токининг коллектордаги кучланишга боПлиқлиги жуда кучсиз бўлгани учун (бу Пол тескари кучланиш берилмаган р-п ўтикдаги тоқлар учун ўринли) $I_k = \text{const}$ деб Писоблаш мумкин ва бу Полда коллектор ўтик ток генератори сифатида ишлайди. Эмиттер ўтишга қўйилган кучланиш нолга тенг бўлсин ($U_3 = 0$), бу Полда эмиттер занжиридан унча катта бўлмаган тўпри ток оқади. Коллектор р-п ўтикнинг тескари токи билан боПлиқ

эмиттердаги кучланиш ($U_3 > 0$) оширилганда эмиттер ўтишдаги туПри ток ортади, бу эса I_k коллектор токининг ошишига олиб келади. Коллектор ўтиш ток генератори усулида ишлаши сабабли, $I_k = \text{const}$ шартининг сақланиши коллектордаги U_k нинг камайишига олиб келади. U_k нинг камайиши натижасида коллектор р-п ўтигининг Пажмий заряд соПаси кенглиги камаяди ва натижада ток ўтказувчан канал очилади. Ток ўтказувчан каналнинг очилиши эмиттер-база қисми қаршилигининг камайишига ва туПри кучланиш берилган эмиттер р-п ўтикдаги I_3 токнинг янада ошишига олиб келади. Бошқача айтганда, эмиттер токининг ошиши канал қаршилигининг камайишига олиб келади, бу эса эмиттер токининг янада ошишига олиб келади. Яъни, пурковчи майдоний транзистор тузилмасида ток бўйича мусбат кучли тескари боПланишининг мавжудлиги ушбу транзисторнинг кириш вольт-ампер тавсифномасида S-кўринишли қисмнинг пайдо бўлишига сабаб бўлади.

Эмиттер ва база орасида ток ўтказувчи канални очиш, I_k кол-лектор токини ва эмиттер р-п ўтикга берилувчи кучланишни ошириш учун зарурдир.

6.9 а-расмда умумий база бўйича уланган пурковчи-майдоний транзисторнинг кириш вольт-ампер тавсифномалари келтирилган. Келтирилган тавсифномалардан кўринишича, коллектор токини 20 дан 100 мкА гача оширишда ток ўтказувчи канални очувчи кучланиш 0,2 дан 1,7 В гача ортар экан. Бир вақтнинг ўзида коллекторга бериладиган тескари кучланишни ошириш вақтида эмиттерга берилувчи кучланишни $U_3 = 0$ дан қандайдир мусбат кучланишгача ошириш натижасида коллектор токи ортади. Сўнгра Пажмий заряд соПасининг кенгайиши ток ўтказувчан канал кесимининг камайишига ва натижада эмиттер-база соПа бўйича оқувчи токнинг камайишига олиб келади.

$I_{3B}, \text{мА}$



б)

6.9-расм. Умумий база бўйича уланган пурковчи-майдоний транзисторнинг кириш (а) ва чиқиш (б) вольт-ампер тавсифномалари:

Бошқача айтганда, коллекторга берилувчи кучланишнинг ошиши, коллектор ўтиш орқали оқадиган токнинг камайишига олиб ке-лади. Пурковчи-майдоний транзисторнинг чиқиш вольт-ампер тавсифномаси Пам манфий қаршилиқ соласига эга. Аммо кириш вольт-ампер тавсифномасидан фарқли равишда, чиқиш тавсифно-маси N-кўринишга эгадир. 6.9 б-расмда умумий база бўйича уланган пурковчи майдоний транзисторнинг чиқиш вольт-ампер тавсифномалари кўрсатилган.

VI Боб бўйича мустақил назорат учун саволлар:

1. Бирўтикли транзистор тузилмаси қандай кўринишга эга?
2. Бир ўтикли транзисторнинг ишлаш тамойили нимадан иборат?
3. Кўчкисимон транзистор ишлашининг қандай хусусиятлари мавжуд?
4. Кўчкисимон транзистор ишлашининг қандай хусусиятлари мавжуд?
5. Пурковчи майдоний транзисторнинг асосий хусусиятлари ни-малардан иборат?
6. Пурковчи майдоний транзистор ишлашининг асосий тамойили тушунтиринг
7. Коллектор сирқишли транзистор кўчкисимон транзистордан қандай фарқланади?
8. Бирўтикли транзисторнинг уланиш чизмаси қандай кўринишга эга?
9. Бирўтикли транзисторнинг вольтампер тавсифномаси пурковчи майдоний транзистор вольтампер тавсифномасидан нима билан фарқ қилади?

VII БОБ. ИНТЕГРАЛ ТРАНЗИСТОРЛАР.

7.1. Интеграл биқутбий транзисторлар

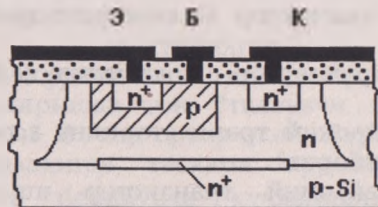
Биқутбий п-р-п транзисторлар Памма яримўтказгич интеграл ту-зилмаларнинг асосий элементи бўлиб хизмат қилади. Янги интеграл тузилмалар ясашда ушбу

транзисторларга, уларни тайёрлаш технологиясига асосланилади. Интеграл тузилмалар таркибига кирувчи қолган ташкил этувчи қисмлар технологияси транзисторларни тайёрлаш технологиясига мослаштирилади.

Интеграл тузилмаларни ташкил этувчи транзисторлар ва бошқа элементлар бир умумий базада бир-бирига яқин қилиб жойлаштирилади. Интеграл тузилмалар элементлари бир-бирига таъсир кўрсатмас-лиги учун яқин жойлашган элементларни Пимоялаш зарур. Интеграл тузилмалар элементларини Пимоялаш зарурияти интеграл транзисторлар тузилмаларига ўзига хос хусусиятлар киритади.

Мисол сифатида энг кўп тарқалган n^+ -ёпиқ каналли интеграл

p - r - n транзистор тузилишини кўриб чиқайлик. 7.1-расмда ушбу интеграл транзисторнинг соддалаштирилган тузилмаси курсатилган. Ушбу транзисторнинг 4.7-расмда келтирилган транзистор тузилмасидан асо-сий фарқи қуйидагича. Интеграл транзистор p - r - n тузилишга, яъни транзисторнинг коллектори n -тур ўтказувчанликка эга.



7.1-расм. Яширин n^+ -қатламли p - r - n интеграл транзисторнинг содда тузилмаси

Транзистор r -тур таглик устида тайёрланган бўлиб, интеграл ту-зилма таркибига кирувчи бошқа транзисторлар Пам ушбу таглик ус-тида тайёрланади. Коллекторнинг бутун айланаси бўйлаб, яъни n -тур коллекторнинг r -тур тагликка тегиб турган юзаси бўйлаб p - n ўтик Пөсил бўлади. Транзисторнинг коллекторига мусбат кучланиш берил-ганда, бир-бирига тегиб турган коллектор билан таглик юзаларида камбаПаллашган соПа Пөсил бўлади. Ушбу камбаПаллашган соПада Паракатчан заряд ташувчилар амалда бўлмайдилар,

яъни камбаПаллашган соПанинг қаршилиги жуда каттадир. Натижада бутун коллектор соПаси умумий тагликдан юқори қаршиликли қатлам билан Пимояланади. Бу Пол транзисторни интеграл тузилманинг бошқа элементларидан яхши Пимоялашни таъминлайди.

Коллекторнинг пастки қисмида, коллекторнинг р-соПасидан умумий тагликнинг р-соПасининг бўлиниш чегарасида юпқа n^+ -қатлам жойлашган. Ушбу n^+ -қатлам яримўтказгичнинг ичкарасида беркитилган бўлган учун, уни n^+ -ёпиқ қатлам деб аталади. Бу ёпиқ n^+ -қатламнинг хизмати қуйидагилардан иборат: а) коллектор қатламнинг горизонтал қаршилигини камайтиради; б) транзисторнинг кучайтириш коэффицентини оширади; в) икки карра пуркаш усулида коллекторда йиПилувчи ортиқча зарядларни камайтиради. Ёпиқ қатламлар одатда n -қатламни эпитаксиал ўстиришдан олдин ўтказиладиган диффузия ёрдамида олинади. Бу Полда: n -қатламни эпитаксиал ўстириш жараёнида (бу кейинчалик интеграл транзисторлар коллекторларини тайёрлашда ишлатилади) n^+ -қатламдаги донор киришма иккала томонга: ўсаётган n -қатламга ва бошланПич р-асосга диффузияланади. Натижада ёпиқ n^+ -қатлам қисман эпитаксиал n -қатламда, ва қисман р-асосда жойлашади.

Коллектор ва таглик орасида тескари кучланишли р-п ўтикнинг мавжудлиги интеграл транзисторнинг ишчи тавсифномаларига Пам таъ-сир кўрсатади. Пақиқатдан, коллекторга ишчи кучланиш берилганда коллектор-асос Пажмий заряд соПаси кенгаяди. Ушбу Полда тескари кучланишли р-п ўтикни ўзгарувчан сиПим сифатида қараш мумкин. Ушбу р-п ўтикнинг тўсиПий сиПими (C_k) коллектор қатламнинг горизонтал қаршилиги (R_k) билан RC-занжирни Посил қилади. Коллекторга уланган бу RC-занжирнинг Посил бўлиши транзисторнинг кучайтиришини сезиларли камайтиради ва такрорийликлар оралиПини торайтиради.

Қуйида n^+ -ёпиқ қатламли п-р-п интеграл транзисторларнинг чега-равий кўрсаткичлари келтирилган:

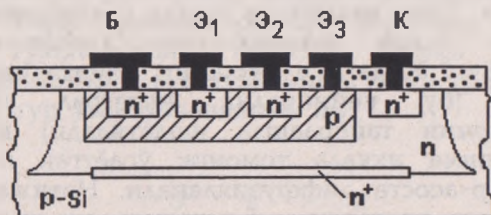
Кучайтириш коэффицентини	-	150-250
Коллектор-базадаги энг катта кучланиш	-	50 В
База-эмиттердаги энг катта кучланиш	-	8 В
Чегаравий кучайтириш такрорийлиги	-	500

МГц

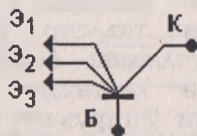
Микроэлектрониканинг ривожланиш жараёнида интеграл п-р-п транзисторларнинг баъзи бир кўринишлари

пайдо бўлди. Шундайлардан бири кўп эмиттерли транзистордир. Бундай транзисторнинг содда-лаштирилган тузилмаси 7.2-расмда келтирилган.

Кўп эмиттерли транзисторлар асосан транзистор-транзистор мантикий тузилмаларнинг мантикий қисмларида ишлатилади. Шу сабабдан кўп эмиттерли транзисторлар ўзига хос хусусиятларга эгадирлар. Улардан баъзиларини кўриб чиқайлик. Биринчидан, кўп эмиттерли транзисторларни база ва коллекторлари уланган ўзаро таъсирлашувчи транзисторлар тўплами деб қараш мумкин. Иккинчидан, қўшни эмит-терларнинг p^+ -қатламларининг Пар бир жуфти уларни ажратувчи p -қатлам билан биргаликда $n^+ - p - n^+$ -транзисторни Посил қилади.



а)



б)

7.2-расм. Яширин n^+ -қатламли кўп эмиттерли интеграл транзисторнинг тузилмаси (а) ва белгиланиши (б).

Бундай транзисторларни горизонтал транзисторлар деб аталади. Горизонтал транзисторнинг бирор-бир эмиттерига тўпри (p -тагликка нис-батан) кучланиш берилсин. Бу Полда n^+ -эмиттер электронларни базавий солага пуркайди. Агар унинг ёнида жойлашган n^+ -эмиттерга тескари (p -тагликка нисбатан) кучланиш таъсир қилса, унда ушбу n^+ -эмиттер коллектор сифатида ишлайди ва базага пуркалган

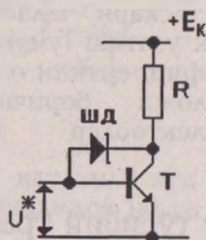
электронларни йиқди. Бундай горизонтал транзистор кўп эмиттерли транзисторлар учун зарарлидир. Тескари кучланиш берилган $p-n^+$ ўтик ёпиқ бўлиши, яъни ток ўтказмаслиги керак, горизонтал транзистор Полида эса, тескари кучланиш берилган $p-n^+$ ўтик орқали тўпри кучланиш берилган эмиттер ўтишдан p -базага пуркалган электронлар билан бошлиқ бўлган ток оқади. Горизонтал транзисторни кўп эмиттерли транзистор эмиттерларининг орасидаги масофа пуркалган заряд ташувчиларнинг диффузиявий югуриш узунлигидан катта бўлиши керак. Бу Полида пуркалган заряд ташувчилар коллекторга етмасдан туриб (яъни, тескари кучланиш берилган n^+ - p ўтикадан етмасдан туриб) рекомбинациялашади ва унинг токини оширмайди.

Интеграл $p-p-n$ транзисторларнинг яна бир хилига кўп коллекторли транзисторлар киради. Кўп коллекторли транзистор тузилмаси 7.2-расмда кўрсатилган кўп эмиттерли транзистордан амалда кўп фарқ қилмайди. Ушбу интеграл транзисторларнинг асосий фарқи уланиш услубидадир. Кўп коллекторли транзистор, бу - кўп эмиттерли транзисторнинг инверс уланишидир. Бу ерда n -қатлам умумий эмиттер (кўп эмиттерли транзистор Полида n -коллектор қатлам), коллектор эса -кучли легирланган n^+ -қатламлардир (кўп эмиттерли транзистор Полида n^+ -эмиттер эди). Кўп коллекторли транзисторлар пурковчи мантиқий элементлар асосини ташкил этади. Кўп коллекторли транзисторларни ясашда уларга кўп эмиттерли транзисторларга қўйиладиган талабларга нисбатан тескари талаблар қўйилади. Бундай талаблардан бири - ток узатиш (умумий эмиттердан Пар бир n^+ -коллекторга) коэф-фициентини оширишдир. Бунинг учун ёпиқ n^+ -қатлам иложи борича базавий қатламга, шунингдек, n^+ -коллекторлар бир-бирига яқинроқ жойланади.

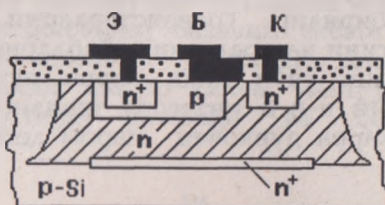
7.2. Шоттки тўсиль транзисторлари

Қайта улаш усулида ишлайдиган транзисторларнинг тез ишлашини ошириш микроэлектрониканинг асосий вазибаларидан биридир. Транзисторларни очиқ Поладан қайтаулаш тезлигини чегараловчи сабабларни қисқача кўриб чиқайлик. Аниқлик учун икки карра пурковчи маромда ишловчи биқутбий $p-p-n$ интеграл транзисторларни кўриб чиқамиз. Икки карра пурковчи маром деганда иккала $p-p$

ўтиги (Пам эмиттер, Пам коллектор ўтик) туПри йўналишда кучланиш берилган транзисторнинг иш усули назарда тутилишини эслатиб ўтамиз. Бу Полда Пам эмиттердан, Пам коллектордан заряд ташувчиларнинг пуркалиши Лисобига транзисторнинг базавий соЛасига кўп ортиқча заряд йиПилиб қолади. Пурковчи импульс тугагач, йиПилган заряд бир онда йўқолмай, маълум вақт сақланиб туради. Бу ушбу зарядларнинг тўла сўрилиб кетишига кетадиган вақтдир. Пуркаш токи қанчалик катта бўлса, йиПилган зарядларнинг сўрилишига кетадиган вақт Пам шунча катта бўлади. Аммо, агар транзистор фаол маромда, яъни икки карра пурковчи маромга кирмаган Полда ишласа, базада йиПиладиган заряд миқдори анча кичик бўлади. Бунинг сабаби транзистор фаол маромда ишлаганда заряд ташувчиларнинг базавий соЛага пуркалиши фақат эмиттер орқали амалга ошишидадир. Ушбу Полда коллектор ўтик тескари кучланиш остида қолади ва фақат базага пуркалган заряд ташувчиларни йиПади. Транзисторнинг бу маромда ишлашида базада йиПиладиган заряд миқдори анча кичик бўлади. Натижада унинг сўрилиши учун зарур вақт кичик ва транзисторнинг бир Полатдан иккинчи Полатга уланиш тезлиги катта бўлади. Демак, бундан кўринишича, қайта уланиш тезлигини ошириш учун транзисторнинг икки карра пуркаш маромига ўтишининг олдини олиш керак экан. Бундай усуллардан бири транзисторнинг базаси ва коллектори орасига Шоттки диодини (7.3-расм) улашдир.



а)



б)

7.3-расм. Шоттки диодли интеграл транзистор:

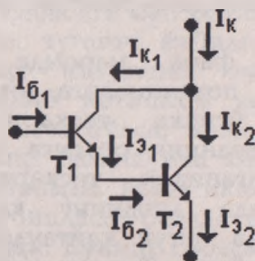
а) чизмада кўриниши; б) тузилмаси.

Транзисторнинг фаол маромда ишлашида коллектор потенциали база потенциалига нисбатан мусбатдир, яъни база-коллектор ўтика тескари кучланиш берилган. Коллектор ва базанинг орасига уланган Шоттки диоди, расмда кўрсатилганидек, тескари кучланиш таъсирида бўлади. Бу полда диоднинг қаршилиги катта ва у транзисторнинг ва бутун қайтаувовчи тузилманинг ишига таъсир кўрсатмайди. Транзисторни қайтаулашда, яъни коллекторнинг потенциали базага нисбатан нол орқали ўтиб манфий бўлиб қолганда диод очилади. Очиқ диод орқали тўпри ток оқади ва ундаги кучланиш U_A бўлади. Агар ушбу тўпри кучланиш очиқ коллектор-база р-п ўтикадаги кучланишдан кичик бўлса, коллектор ўтик ёпиқ полда қолади. Ёпиқ кол-лектор ўтик икки карра пуркаш маромида ишлашнинг ва базавий со-лада заряд йиқилишининг олдини олади.

Ушбу баёндан кўринишича, Шоттки тўсипий транзисторининг икки карра пуркаш маромига ўтишини олдини олиш Шоттки диодидаги тўпри кучланишнинг кремнийли р-п ўтикадаги кучланишга нисбатан кичик бўлишига бошлиқ экан. Бу пол Шоттки диодини ишлатиш аламиятини оширади. Кремний асосида ясалган Шоттки диодларидаги тўпри кучланишнинг тушиши 0,4-0,5 В. Тўпри кучланиш берилган кремний р-п ўтикларидаги тўпри кучланиш 0,55-0,6 В. 7.3 б-расмда Шоттки тўсипий диодли интеграл транзисторнинг содалаштирилган тузилмаси кўрсатилган. Ушбу расмдан кўринишича, металл қатлам-алюминий тасмаси транзистор базасининг р-қатлампдан коллекторнинг п-қатлампгача бўлган ва коллекторнинг п-қатлампгача давом этган омик туташувни таъминлайди. Аллюминий р-тур кремнийга омик туташув, ва п-тур кремнийга тўприловчи туташув беришини Лисобга олган полда, Шоттки тўсипини оламиз. Шоттки диодини улаш 7.3а-расмда кўрсатилганидек амалга оширилади.

7.3.Таркибий транзисторлар

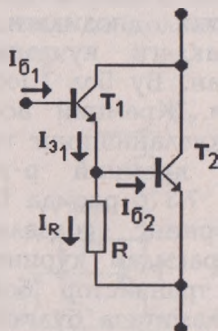
Кўплаб хилма-хил интеграл транзисторлар орасида бир неча тран-зисторлардан ташкил топган бирикмани бир



бутун тузилма

7.4 а-расм. Таркибий транзисторларнинг тузилмаси.

сифатида қараш мумкин. Бундай транзисторлар-таркибий транзисторлар номини олган. Таркибий транзисторларнинг кенг тарқалиши сабаблари улар-нинг оддий интеграл транзисторларга нисбатан маълум бир хусуси-ятларга эга бўлганлигидадир. 7.4 а-расмда таркибий транзисторларнинг уланиши кўрсатилган. Бундай уланиш-Дарлингтон тузилмаси



деб ном олган.

7.4 б-расм. Таркибий транзисторлар асосида токларни текисловчи тузилма.

Расмдан кўринишича, тузилма таркибига кирувчи T_1 ва T_2 транзисторларни база (Б), эмиттер(Э) ва коллектор (К) чиқишлари мавжуд битга транзистор сифатида қараш

мумкин. Дарлингтон тузил-масининг асосий фарқли хусусияти унинг ток бўйича жуда катта ку-чайтириш коэффициентидир. Бу қуйидагига боПлиқ. Расмдагидек ула-нишда T_1 транзисторнинг эмиттер токи T_2 транзисторнинг базавий то-кига тенгдир ($I_{Э1} = I_{Б2}$). Транзисторнинг эмиттер токи базавий ток би-лан қуйидаги муносабат бўйича боПланган:

$$I_{Э} = I_{Б}(\beta + 1) \quad (7.1)$$

Бу ерда, β - умумий эмиттерли тузилма бўйича уланган транзистор-нинг кучайтириш коэффициенти.

Бу ифодадан фойдаланган Полда иккинчи транзисторнинг база-вий токини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$I_{Б2} = I_{Э1} = I_{Б}(\beta_1 + 1) \quad (7.2)$$

Бу ерда, β_1 - T_1 -транзисторнинг базавий токини кучайтириш коэффициенти.

Таркибий транзистор коллекторидаги йиПинди I_K токни қуйи-дагича ёзиш мумкин:

$$I_K = \beta_1 I_{Б} + \beta_2 I_{Б2} \quad (7.3)$$

Бу ерда, β_2 - T_2 -транзисторнинг базавий токини кучайтириш коэффициенти. Ушбу муносабатлардан фойдаланиб қуйидагини кўрсатиш мумкин:

$$\beta = I_K / I_{Б} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_2 \quad (7.4)$$

яъни, Дарлингтон тузилмасининг базавий токни йиПинди кучайтириш коэффициенти камида $\beta_1 \cdot \beta_2$ кўпайтмага тенг. Одатда β_1 ва β_2 лар қиймати 100-200 бўлишини Писобга олиб, йиПиндида $(1+4) \cdot 10^4$ қийматни оламин. Бундай катта кучайтириш коэффициенти таркибий транзисторлардан интеграл технологияда кенг фойдаланишга олиб келади.

Шуни айтиш керакки, T_1 ва T_2 -транзисторлар Пар хил маромларда ишлайдилар: T_2 -транзисторнинг базавий токи T_1 нинг базавий токидан анча каттадир. Бу T_1 -транзисторнинг эмиттер токига қўшимча чекланишлар Посил қилади. T_1 ва T_2 ларнинг базавий тоқларини тенг-лаштириш ва T_2 нинг иш маромини енгиллаштириш учун қуйидагича йўл тугилади: T_2 -транзисторнинг база-эмиттер ўтишига параллел ра-вишда R резистор уланади (7.4 б-расм). Ушбу резисторнинг асосий вазифаси $I_{Б2}$ -базавий токни камайтириш ва натижада T_2 -транзисторнинг иссиқликда ишлаш маромини осонлаштиришдир. Албатта T_2 - транзисторнинг базавий токини камайтириш ток бўйича йиПинди кучайтириш

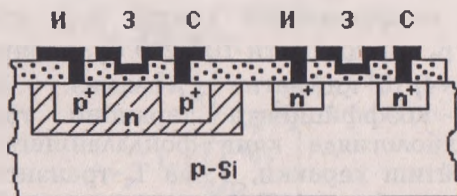
коэффициентини камайтиради. Аммо, умуман олганда бу коэффициент Дарлингтон тузилмасига кирувчи Пар бир транзисторларнинг кучайтириш коэффициентидан анча катта бўлиб қолаверади.

7.4. Комплементар майдоний транзисторлар

Комплементар майдоний транзисторлар (одатда металл-диэлек-трик-яримўтказгич кўринишидаги транзисторлар) бир кристаллда тайёрланган икки ўзаро таъсирлашувчи транзисторлар тўпламидан иборатдир.

Бундай транзисторларнинг ток ўтказувчи каналлари Пар хил ўтказувчанликка (n- ва p-каналлар) эгаллиги комплементар транзисторларнинг бошқалардан фарқли хусусиятидир. Умумий затвор ва стокларга эга комплементар транзисторлар жуфти 7.5-расмда кўрсатилган.

Комплементар жуфтнинг киришидаги бошқарувчи кучланиш нолга тенг ($U_{\text{КИР}}=0$) деб Писоблайлик. Бу Полда n-тур ўтказувчанликка эга канали T_1 -транзистор ёпиқ Полда бўлади, T_2 -транзистор (p-каналли) эса, бу Полда очиқдир. Ушбу транзисторлар жуфтнинг киришидаги кучланиш таъминот кучланиши E_C га ($U_{\text{КИР}}=+E_C$) тенг бўлсин. Бунда n-каналли T_1 -транзистор ёпиқ, p-каналли T_2 -транзистор очиқ бўлади.



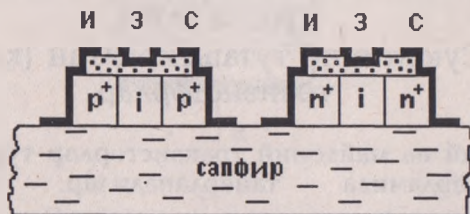
7.5-расм. Умумий затвор ва стокларга эга комплементар транзисторлар жуфти.

Кўрилатаётган комплементар жуфтликнинг динамик иш мароми-нинг хусусияти юклама сиПимнинг зарядланиш ва разрядланиш жараёнларининг тўла симметриклиги билан белгиланади. СиПимни T_1 ва T_2 -транзисторларнинг стокларига уланганда зарядланиш очиқ транзистор орқали (масалан, T_2 орқали), разрядланиш эса, T_1 -транзистор орқали

амалга ошади. Бу Полда қайта уловчи импульслар оралиПи амалда бир хил бўлади.

Комплементар транзисторларни тайёрлашда комплементар жуфтликнинг бир транзистори иккинчи транзистордан Пимояланган бўлишини Писобга олиш керак. Масалан, умумий таглик сифатида, р-тур ўтказувчанликли кремний ишлатилса, п-каналли транзистор тагликнинг ўзида тайёрланади. р-каналли транзистор учун Пимояловчи п-тур ўтказувчанликли қатлам ишлатилади. Комплементар транзисторлар тайёрлашнинг яна бир усули сапфирдаги кремний - СК дейилади. Сапфир - корунд (Al_2O_3) минерал кўринишларидан бири бўлиб ўзи-нинг электрофизик хусусиятлари бўйича диэлектриқдир. Сапфир кристалл панжарасининг тузилмасига жуда ўхшашлиги унинг яхши ва жуда қулай хусусияти-дир. Кристалл панжараларнинг ўхшашлиги сапфир тагликда эпитак-сиал кремний қатламини ўстириш имконини беради. Монокристалл қатламини тагликка ўстириш эпитаксиал жараён дейилади. Бу жараён давомида ўстириладиган қатламнинг кристаллографик йўналиши тагликнинг кристаллографик йўналишини такрорлайди.

Сапфир тагликда керакли қалинликдаги кремний қатлами ўстирилади ва сўнгра кимёвий едириш усули билан бу қатламини то сапфир сиртигача едирилади. Бу едириш жараёни шундай олиб борилиши керакки, сапфир сиртида кремний оролчалари қолсин. Бу оролчалар кейинчалик транзисторлар тайёрлашда ишлатилади.



7.6-расм. СК - сапфирда кремний технологияси ёрдамида тайёрланган комплементар транзисторлар тузилмаси.

Шундай қилиб тайёрланган транзисторлар паст томондан бир-биридан диэлектрик - сапфир билан, ён томондан Паво билан Пимояланган бўлади. 7.6-расмда СК-сапфирда

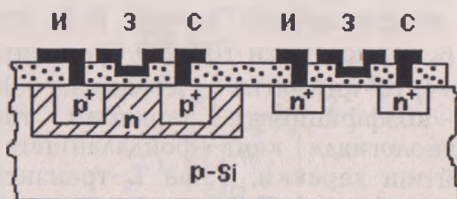
коэффициентини камайтиради. Аммо, умуман олганда бу коэффициент Дарлингтон тузилмасига кирувчи Пар бир транзисторларнинг кучайтириш коэффициентидан анча катта бўлиб қолаверади.

7.4. Комплементар майдоний транзисторлар

Комплементар майдоний транзисторлар (одатда металл-диэлек-трик-яримўтказгич кўринишидаги транзисторлар) бир кристаллда тайёрланган икки ўзаро таъсирлашувчи транзисторлар тўпламидан иборатдир.

Бундай транзисторларнинг ток ўтказувчи каналлари Пар хил ўтказувчанликка (n- ва p-каналлар) эгаллиги комплементар транзисторларнинг бошқалардан фарқли хусусиятидир. Умумий затвор ва стокларга эга комплементар транзисторлар жуфти 7.5-расмда кўрсатилган.

Комплементар жуфтнинг киришидаги бошқарувчи кучланиш нолга тенг ($U_{\text{КИР}}=0$) деб Писоблайлик. Бу Палда n-тур ўтказувчанликка эга каналли T_1 -транзистор ёпиқ Палда бўлади, T_2 -транзистор (p-каналли) эса, бу Палда очиқдир. Ушбу транзисторлар жуфтнинг киришидаги кучланиш таъминот кучланиши E_C га ($U_{\text{КИР}} = +E_C$) тенг бўлсин. Бунда n-каналли T_1 -транзистор ёпиқ, p-каналли T_2 -транзистор очиқ бўлади.



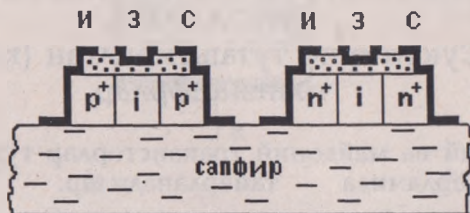
7.5-расм. Умумий затвор ва стокларга эга комплементар транзисторлар жуфти.

Кўрилаётган комплементар жуфтликнинг динамик иш мароми-нинг хусусияти юклама сиПимнинг зарядланиш ва разрядланиш жараёнларининг тўла симметриклиги билан белгиланади. СиПимни T_1 ва T_2 -транзисторларнинг стокларига уланганда зарядланиш очиқ транзистор орқали (масалан, T_2 орқали), разрядланиш эса, T_1 -транзистор орқали

амалга ошади. Бу Полда қайта уловчи импульслар оралиши амалда бир хил бўлади.

Комплементар транзисторларни тайёрлашда комплементар жуфтликнинг бир транзистори иккинчи транзистордан Пимояланган бўлишини Писобга олиш керак. Масалан, умумий таглик сифатида, р-тур ўтказувчанликли кремний ишлатилса, п-каналли транзистор тагликнинг ўзида тайёрланади. р-каналли транзистор учун Пимояловчи п-тур ўтказувчанликли қатлам ишлатилади. Комплементар транзисторлар тайёрлашнинг яна бир усули сапфирдаги кремний - СК дейилади. Сапфир - корунд (Al_2O_3) минерал кўринишларидан бири бўлиб ўзи-нинг электрофизик хусусиятлари бўйича диэлектрикдир. Сапфир крист-тал панжарасининг тузилмаси кремний кристалл панжарасининг тузилмасига жуда ўхшашлиги унинг яхши ва жуда қулай хусусияти-дир. Кристалл панжараларнинг ўхшашлиги сапфир тагликда эпитак-сиал кремний қатламини ўстириш имконини беради. Монокристалл қатламини тагликка ўстириш эпитаксиал жараён дейилади. Бу жараён давомида ўстириладиган қатламнинг кристаллографик йўналиши тагликнинг кристаллографик йўналишини такрорлайди.

Сапфир тагликда керакли қалинликдаги кремний қатлами ўстирилади ва сўнгра кимёвий едириш усули билан бу қатламини то сапфир сиртигача едирилади. Бу едириш жараёни шундай олиб борилиши керакки, сапфир сиртида кремний оролчалари қолсин. Бу оролчалар кейинчалик транзисторлар тайёрлашда ишлатилади.



7.6-расм. СК - сапфирда кремний технологияси ёрдамида тайёрланган комплементар транзисторлар тузилмаси.

Шундай қилиб тайёрланган транзисторлар паст томондан бир-биридан диэлектрик - сапфир билан, ён томондан Паво билан Пимояланган бўлади. 7.6-расмда СК-сапфирда

кремний технологияси ёрдамида тайёрланган комплементар транзисторлар тузилмаси кўрсатилган.

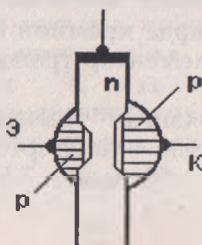
VII Боб бўйича мустақил назорат учун саволлар:

1. Яримўтказгич интеграл тузилмалар асосий элементи нимадан иборат?
2. "Яширин p^+ - қатлам" деганда нимани тушунасан?
3. "Яширин p^+ - қатлам" нима учун хизмат қилади?
4. Кўпэммитерли транзисторнинг асосий хусусиятлари нималардан иборат?
5. Транзисторларнинг очиқ Полатдан ёпиқ Полатга қайтаулиниш тезлигининг чекланишига олиб келувчи асосий физикавий сабаблар нималардан иборат?
6. Таркибий транзистор деб нимага айтилади?
7. Таркибий транзисторлар оддий транзистордан қайси кўрсаткичлар бўйича фарқ қилади?
8. Комплементар транзисторларнинг асосий хусусиятлари нималардан иборат?
9. Интеграл микротузилмаларни бир-биридан ажратишнинг қандай усуллари мавжуд?

VIII БОБ. ТРАНЗИСТОРЛАР ТУЗИЛИШИ ВА ТЕХНОЛОГИЯСИНИНГ ТАРКИБИЙ ҚИСМЛАРИ.

8.1. Суялтириб туташтирилган (қотишмавий) транзисторлар

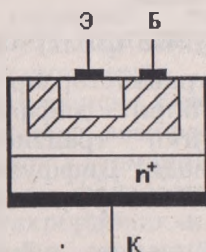
Бикутбий ва майдоний транзисторлар турли технологик усуллар ёрдамида тайёрланадилар. Транзисторлар



тайёрлашнинг технологик жараёнларидан энг кўп тарқалгани суюлиб туташтиш жараёнидир. Бу жараёни германий асосида р-п-р транзистор яшаш мисолида кўриб чиқамиз. Электрон ўтказувчанликли монокристалл

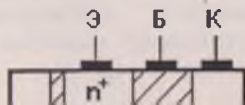
8.1 а-расм. п-тур германий асосидаги қотишмавий р-п-р транзистор кўриниши.

германий асосий материал сифатида (8.1а-расм) ишлатилади. 100-200 мкм қалинликдаги германий пластинкасининг иккала томонига индий суюлтириб туташтирилади. Суюлтириб туташтириш температураси 500-600°С ни ташкил этади. Бу температураларда индий эрийди, германийни Пўлмайди ва уни суюлтиради. Натижада бошланғич германий пластинаси сиртида германийнинг индийдаги қотишмаси билан тўлган чуқурча Ҳосил бўлади. Температуранинг пасайишида германийнинг индийдаги суюлиши камаяди. Бунда германий кристали тузилишининг ўзгариш жараёни бошланади. Германий кристалининг ўзгариш соҲаси индий атомлари билан тўйинади ва р-тур ўтказувчанлик соҲасига айланади. Кристалланиш жараёни давомида германий-индий суюқланмасида германийнинг концентрацияси камаяди. Кристалл тузилмасининг ўзгарган соҲаси индий билан тўйина бориб тоза Полига ўтади. Бу тоза индий қатлами яримўтказгичнинг р-қатламига тўприламайдиган туташув



8.1 б-расм. Эпитаксиал-диффузиявий транзистор.

роли ўйнайди. Шундай қилиб электрон ўтказувчанликли германий моно-кристали асосида юқори концентрацияли акцептор киришмали р-ўтка-зувчанликли германий қатлами



Яримўтказгич асбоблар тайёрлаш технологиясининг кейинги ривожланиши микроэлектроникада яна бир йўналишнинг ташкил топишига олиб келди. Бу транзисторлар тайёрлашнинг планар технологиясидир.

Ушбу йўл билан олинган транзисторларни планар транзисторлар деб аталади. Планар транзисторларнинг бошқалардан фарқи шундаки, уларда коллектор ва эмиттер ўтишлар бир ясси текисликка чиқадилар. Шунингдек транзисторнинг эмиттер, база ва коллектор софаларига чиқиш симлари ҳам бир ясси текисликда жойлашадилар. Планар транзисторнинг содда тузилмаси 8.1 в-расмда кўрсатилган.

Планар технология ёрдамда транзистор тайёрлаш жараёнини кўриб чиқайлик. Асбоблар тайёрлашнинг ушбу усули асосида қуйидаги жараёнлар ётади: оксидли пардада дарчалар Посил қилиш; дарчаларда р-п ўтиклар Посил қилиш учун донор ёки акцептор киришмаларни диффузия қилиш; металл туташувлар тайёрлаш. Сиртига эпитаксиал n- қатлам ўстирилган p-тур ўтказувчанликли бошланғич пластина-кремний олайлик. Тайёрланган транзистор сифатли ишлаши учун бошланғич кремний қатлами кичикомли (p⁺-қатлам), p-тур эпитаксиал қатлам эса, юқориомли бўлиши керак. Бу Полда p-қатлам коллекторга нисбатан кетма-кет уланган кичик қаршилиқни таъминлайди (интеграл транзисторлар бўлимига қаранг-берк p⁺-қатламли транзистор). Юқориомли n-қатлам коллектор софаси сифатида хизмат қилади ва база-коллекторнинг катта тешилиш кучланишини таъминлайди. Бошланғич пластинада оксидлаш ёрдамида кейинги диффузиялар учун Пимояловчи SiO₂ қатлам ўстирилади. Оксидланган пластина сирти махсус фотосезгир қатлам - фоторезист билан қопланади. Кейин фотолитография ёрдамида керакли жойлардан SiO₂ қатламини кимёвий йўқотиш учун дарчалар очилади. Посил бўлган дарчалар кремний қатламига диффузантининг кириши учун SiO₂ қатламида Посил қилинган тешик-лардир. Очиқ дарчага акцептор киришма диффузияланади. Ушбу акцептор киришма база ва база-коллектор ўтиш софаларини Посил қилади. Эмиттер софасини Посил қилиш учун ҳамма пластина яна бир марта оксидантирилади ва керакли жойда эмиттер диффузияси учун дарчалар очилади. Ушбу дарчада донор киришманинг диффузияси амалга оширилади. Бу донор киришма эмиттер ва эмиттер-база ўтиш софаларини Посил қилади. Жараён давомида иккала р-п ўтик, ҳам эмиттер, ҳам

коллектор яримўтказгич кристаллининг бир текислигига чиқади. Бу эса, планар технологияга хосдир. Чиқиш симларини тай-ёрлаш учун пластинанинг Памма сирти яна бир марта оксидлан-тирилади ва дарчалар очилади. База, эмиттер ва коллектор соПалари билан туташувлар Посил қилиш учун очилган дарчаларга вакуумда учириш усули билан алюминий ётқизилади. Алюминийли юзачаларга симли чиқишлар уланади. Тайёр бўлган транзистор тузилмалар махсус қопламаларга жойланади. Қопламалар р-п ўтикли кристалларни ташқи муПит таъсирларидан Пимоя қилиш ва транзистор ишлаётганда аж-раладиган иссиқликни ташқарига чиқариш учун хизмат қилади. Тран-зисторлар учун қопламаларнинг хилма-хил кўринишлари мавжуд бўлиб, 8.2-расмда улардан бири келтирилган.

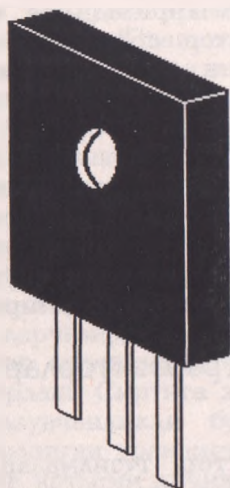
8.4. Транзисторлар қопламларининг тузилиши

Тайёр транзистор тузилмалар маПсус қопламаларга жойланади. Қопламалар р-п ўтикли яримўтказгич кристалларни ташқи муПит таъсиридан Пимоялаш ва транзистор ишлаши вақтида ажраладиган иссиқликни кетказиш учун зарур. Асбобнинг қопламаси етарлича пишиқ ва ички Пажми герметик сақлайдиган бўлиши керак. Юқори-такрорийликларда ишлайдиган асбобларнинг қопламлари тузилишига маПсус талаблар қўйилади.

Яримўтказгич асбобларнинг ривожланиши ва сифатий ўзгаришлари жараёнида қопламалар тузилишлари Пам ўзгариб борди. Транзисторлар қопламаларининг кенг тарқалган кўринишларидан баъзиларини кўриб чиқайлик. Камқувватли пасттакрорийликли транзистор қопламаси 8.2-расмда кўрсатилган. Ушбу қоплама мис қалпоқча ва мис таглиқдан тайёрланади. Кристаллга чиқувчи симларни тайёрлаш учун таглиқда шиша билан Пимояланган ўтиш жойлари мавжуд. Кристаллни герметиклаш қалпоқчани тагликка совуқ электрик туташтириш орқали амалга оширилади. Ушбу қопламаларнинг камчиликларига унинг ўлчамлари (катта қалинлик ва таглик юзасининг катталиги) киради.

8.3-расмда қалинлиги ва таглик юзаси кичрайтирилган қопламанинг тузилиши тасвирланган. Ушбу қопламани герметиклаш конденсатор ёрдамида туташтириш орқали

амалга оширилади. 400 МГц дан юқоритакрорийликларда ишловчи транзисторлар қопламаларига қўшимча талаблар қўйилади.



8.2-расм. Транзисторлар учун қопламалардан бирининг кўриниши.

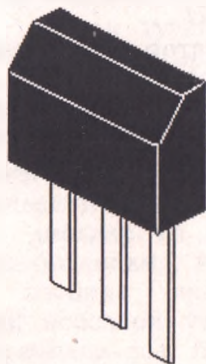
8.3-расмда юқоритакрорийликли транзисторнинг қопламаси тузилиши келтирилган. Расмдан кўринишича, эмиттер, база ва коллектор симлари металл тагликдан етарлича катта масофада жойлашган (фақат юқори қисмдагина улар қопламага яқин жойлашган). Симларнинг металлдан бундай узоқликда жойлашиши симлар билан қоплама орасидаги сипимни камайтиради. Памма металл қопламаларнинг тузилиши қопламани йишида махсус уқувлар (туташтириш, герметиклаш ва бошқалар) талаб қиладиган катта миқдордаги турли жараёнлардан иборат. Булар қўшимча вақтни талаб қилади ва асбоблар нархини оширади.

Ушбу қийинчиликлардан қопламасиз герметиклаш ёрдамида, ёки пластмасса қопламаларни қўллаш орқали қутулиш мумкин. Қопламасиз герметиклашда қўлланиладиган усуллардан бири яримўтказгич кристаллни лок қатлами ва эпоксид қатрон билан қоплашдан иборатдир. Лок яримўтказгич сиртини ва айниқса электрон-ковак ўтти

чегарасини қўшни қатламлардан Пимоялаш учун хизмат қилади.

Эпоксид қатрон қатлами кристаллни ташқи муҳитдан етарлича пишиқ Пимоя қилиш ва механик пишиқликни ошириш учун хизмат қилади.

Пластмасса қопламалар икки усул ёрдамида тайёрланади: қуйиш ва пресс ёрдамида формага келтириш. Биринчи Плда силикон резинадан алоПда уячалари мавжуд таёқча кўринишида кассета тайёрланади. Уячаларнинг сони бир вақтнинг ўзида қуйилмоқчи бўлган асбобларнинг сони билан белгиланади. Чиқиш симлари туташтирилган яримўтказгич кристаллар ковакларга ўрнатилади, кассетани қиздириш ва совутиш асосида пластмасса қуйилади. Силикон резина пластмасса билан Пўлланмаслиги сабабли пластмасса қотганидан сўнг тайёр асбоблар осонгина уячалардан олинади.



8.3-расм. Юқоритакрорийликли транзисторнинг қопламаси.

Пресс ёрдамида қолиплашда пресс-қолипдан фойдаланилади. Пресс қолипта чиқишлари мавжуд кристалларни жойлаш учун уячалар мавжуд. Уячаларга кристаллар билан бирга пресскукун сепилади ва пресс-қолипни 120-160°C (кукунни полимерлаш учун) гача қиздирилади.

VIII Боб бўйича мустақил назорат учун саволлар:

1. Қотишмавий транзисторлар диффузиявий транзисторлардан қандай фарқланади?
2. Қотишмавий транзисторлар тузилмасининг хусусиятлари нима-лардан иборат?
3. Кремний асосида диффузиявий транзисторлар тайёрлаш учун асосан қандай материаллардан фойдаланилади?
4. Қандай транзистор тузилмалар "меза-транзистор" деган ном билан аталади?
5. Транзисторларни тайёрлаш планар технологиясининг асосий хусусиятлари нималардан иборат?
6. Қопламасиз герметиклаш деб нимага айтилади?

Х О Т И М А

Биз кўриб чиққан замонавий яримўтказгич асбоблар - диодлар, бикутбий ва майдоний транзисторлар ишлашининг физик асослари кўпгина дискрет ва интеграл яримўтказгич асбоблар учун асос бўлиб хизмат қилади.

Дискрет асбоблар нуқтаи назаридан қараганда тўртқатламли икки р-п ўтикли тузилмалар - тиристорлар, шунингдек, аралаштиргич, кўпайтиргич ва қайта улагич диодлар - яъни юқори ва ўтаюқоритакрорийликлар оралигида ишловчи диодлар ҳам кўрилмади.

Интеграл техника соҳасида интеграл тузилмалар кенг ривожланмоқда. Интеграл тузилмаларнинг ишлаш тамойиллари асосан бошланғич яримўтказгич намунада жуда кўп сонли асбоблар - диодлар ва транзисторнинг ўзаро жойлашиш вазиятларига боғлиқдир. Аммо интеграл тузилма таркибида ишловчи алоҳида яримўтказгич асбоблар ишлашининг физикавий асослари ўзгармай қолади. Ушбу физикавий асослар-жараёнлар эса, биз томондан етарлича тўла ва содда кўринишларда кўриб чиқилди.

ТАВСИЯ ЭТИЛАДИГАН АДАБИЁТЛАР:

1. Г.Е.Пикус. "Основы теории полупроводниковых приборов". М., "Наука", 1965.
2. Я.А.Федотов. "Основы физики полупроводниковых приборов". М., "Сов.радио", 1970.
3. И.М.Викулин, В.И.Стафеев. "Физика полупроводниковых приборов". М., "Сов.радио", 1980.
4. С.Зи. "Физика полупроводниковых приборов". М., "Мир", 1984.
5. И.М.Викулин, В.И.Стафеев. "Физика полупроводниковых приборов". М., "Радио и связь", 1990.
6. Н.М.Тугов, Б.А.Глебов, Н.А.Чарыков. "Полупроводниковые приборы". М., "Энергоатомиздат", 1990.
7. В.Г.Гусев, Ю.М.Гусев. "Электроника", М., "Высшая школа", 1991.
8. П.Нишматов. "Радиоэлектроника асослари". Т., "Ўзбекистон", 1994.
9. Н.Ш.Турдиев. "Радиоэлектроника асослари". Т., "Ўқитувчи", 1992.
10. С.И.Власов, С.З.Зайнобиддинов, А.А.Носиров, Т.Назаров. "Диод структуралар физикаси". Т., "Университет", 1994.
11. А.Блихер. "Физика силовых биполярных и полевых транзисторов". М., "Мир", 1986.
12. Азизов М. Яримўтказгичлар физикаси. Тошкент, "Ўқитувчи", 1974.
13. Акрамов П., Зайнобиддинов С., Тешабоев А. Яримўтказгичларда фотозлектрик Подисалар. "Ўзбекистон", Т., 1974.
14. Зайнобиддинов С., Тешабоев А. Ярим ўтказгичлар физикаси. "Ўқитувчи", Т., 1999.

19. Власов С.И., Зайнобиддинов С., Назиров Д.Э. Рақамли интеграл тузилмалар. "Университет", Т., 1994.
20. Власов С.И., Назиров Д.Э., Бегматова Д.А. Яримўтказгич асбоблар физикасидан практикум. I-қисм. "Университет", Т., 2000.
21. Власов С.И., Назиров Д.Э., Бегматова Д.А. Яримўтказгич асбоблар физикасидан практикум. II-қисм. "Университет", Т., 2000.
22. Назиров Э.Н., Курбанов М., Назиров Д.Э., Тожибоева Х. Яримўт-казгичлар физикасидан дастурланган ўқув қўлланма. "Универси-тет", Т., 2000.

М У Н Д А Р И Ж А

МУҚАДДИМА

I БОБ. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ПАҚИДА ҚИСҚАЧА МАЪЛУМОТЛАР

- 1.1. Яримўтказгичлар.
- 1.2. Яримўтказгичларнинг кристалл тузилиши Пақида.
- 1.3. Реал кристаллардаги нуқсонлар.
- 1.4. Якка атомлардаги валентли электронларнинг дискрет энергиявий сатпларининг қаттиқ жисмда квазиузлуксиз сатпларга(зоналарга) айланиши.
- 1.5. Ўтказгичлар, яримўтказгичлар ва диэлектрикларнинг хоссаларини зоналар диаграммаси нуқтаи назаридан тушунтириш.
- 1.6. Хусусий (киришмасиз) яримўтказгич.
- 1.7. Киришмали яримўтказгич.
 - 1.7.1. Киришмали n-тур яримўтказгич.
 - 1.7.2. Киришмали p-тур яримўтказгич.
- 1.8. Яримўтказгичларда эркин заряд ташувчилар.
 - 1.8.1. Ўташувчанлик электронлари ва коваклари.
 - 1.8.2. Эркин заряд ташувчиларнинг асосий хоссалари.
 - 1.8.3. Ўташувчанлик электронлари ва ковакларнинг самаравий массалари.
 - 1.8.4. Эркин заряд ташувчиларнинг яшаш вақти.
 - 1.8.5. Эркин заряд ташувчиларнинг эркин югуриш йўли.
 - 1.8.6. Эркин заряд ташувчиларнинг Паракатчанлиги.
- 1.9. Яримўтказгичларда эркин заряд ташувчилар статистикасига оид баъзи бир масалалар.
 - 1.9.1. Ферми-Дирак тақсимоти.

- 1.9.2. Эркин заряд ташувчиларнинг концентрациясини аниқлаш.
- 1.9.3. Яримўтказгичларда электрбетарафлик шарт.
- 1.9.4. Яримўтказгичларда Ферми сат Π и Полатини аниқлаш.
- 1.9.4.1. Хусусий яримўтказгич.
- 1.9.4.2. n-тур яримўтказгич.
- 1.9.4.3. p-тур яримўтказгич.
- 1.10. Яримўтказгичларнинг электр ўтказувчанлиги.

II. БОБ. ЭЛЕКТРОН-КОВАК УТИК

- 2.1. Электрон-ковак ўтикнинг Посил бўлиши.
- 2.2. p-n ўтик турлари.
- 2.3. Мувозанатдаги электрон-ковак ўтиқда потенциал ва эркин заряд ташувчилар концентрациясининг тақсимотлари орасидаги боҠланиш. Туташув потенциаллари фарқи.
- 2.4. Кескин p-n ўтиқда киришмалар концентрацияси Ҷажмий заряд зичлиги, электрик майдон кучланганлиги ва потенциал, эркин заряд ташувчиларнинг концентрацияси.
- 2.5. Термодинамик мувозанат Полатидаги p-n ўтикнинг энергиявий диаграммаси.
- 2.6. Номувозанат Полатидаги p-n ўтикнинг энергиявий диаграммаси.
- 2.6.1. p-n ўтикга тўПри кучланиш берилган Пол.
- 2.6.2. p-n ўтикга тескари кучланиш берилган Пол.

III БОБ. ЯРИМУТКАЗГИЧ ДИОДЛАР.

- 3.1. Яримўтказгич диоднинг тузилиши.
- 3.2. Диодда содир бўладиган физикавий Подисалар.
- 3.3. Диодларнинг асосий параметрлари.
- 3.4. Электрон-ковак ўтикнинг тешилиши.
- 3.5. ТўПрилагич диодлар.
- 3.6. Стабилитрон.
- 3.7. Юқоритакрорийликли диодлар.
- 3.8. Шоттки диодлари.
- 3.9. Туннел диодлар.
- 3.10. Тескари диодлар.
- 3.11. Импульс диодлар.
- 3.12. Варикаплар.
- 3.13. Фотодиод.

- 3.14. Ёритувчи диод.
- 3.15. p-i-n диодлар.
- 3.16. Кучкисимон-учиб утиш диодлари.
- 3.17. Ганн диодлари.

IV БОБ. ТРАНЗИСТОРЛАР.

- 3.1. Транзисторлар ишлашининг физикавий асослари.
- 3.2. Транзисторнинг статик вольт-ампер тавсифномалари.
- 3.2.1. Умумий базали уланишда транзисторнинг статик тавсифномалари.
- 3.2.2. Умумий эмиттерли уланишдаги транзисторнинг статик тавсифномалари.
- 3.3. Транзисторларнинг пасттакрорийликли кўрсаткичлари.
- 3.4. Дайдишли транзисторлар.
- 3.5. Гетероўтикли транзисторлар.

V БОБ. МАЙДОНИЙ ТРАНЗИСТОРЛАР.

- 5.1. Бошқарувчи p-n ўтикли транзисторлар.
- 5.2. Ажратилган затворли майдоний транзисторлар (МДЯ-транзисторлар).
- 5.3. МДЯ-транзисторларнинг тузилиши ва уларнинг тавсифномалари.
- 5.4. Туннел транзисторлар.

VI БОБ. МАНФИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛ ҚАРШИЛИКЛИ ТРАНЗИСТОРЛАР

- 6.1. Бир ўтикли транзисторлар.
- 6.2. Кучкисимон транзисторлар.
- 6.3. Коллектор сирқишли транзисторлар.
- 6.4. Пурковчи майдоний транзисторлар.

VII БОБ. ИНТЕГРАЛ ТРАНЗИСТОРЛАР

- 7.1. Интеграл бикутбий транзисторлар.
- 7.2. Шоттки тўсибий транзисторлар.
- 7.3. Таркибий транзисторлар.
- 7.4. Комплементар майдоний транзисторлар.

VIII БОБ. ТРАНЗИСТОРЛАР ТУЗИЛИШИ ВА ТЕХНОЛОГИЯСИНИНГ ТАРКИБИЙ

ҚИСМЛАРИ

- 8.1. Суволириб туташтирилган транзисторлар.
- 8.2. Диффузиявий транзисторлар.
- 8.3. Планар транзисторлар.
- 8.4. Транзисторлар қопламаларининг тузилиши.

ХОТИМА

ТАВСИЯ ЭТИЛАДИГАН АДАБИЁТ

ЮНУСОВ М.С, ВЛАСОВ С.И, НАЗИРОВ Д.Э.,
ТОЛИПОВ Д.О.

ЭЛЕКТРОН АСБОБЛАР

МуПаррир С. Чинпулатова
Бадий муПаррир С. Муинова
Техник муПаррир Д. Бекиева

Теришга берилди:

Босишга рухсат этилди:

Шартли босма табаџи: Нашриџт писоби табаџи
Бичими 60x84 1/16. Адади 500 нуска.
Буюртма № Баџоси келишилган нархда.
"Университет" нашриџти, Тошкент-700174. Талабалар
шаџарчаси,
УзМУ

ҚИСМЛАРИ

- 8.1. Суюлтириб туташтирилган транзисторлар.
- 8.2. Диффузиявий транзисторлар.
- 8.3. Планар транзисторлар.
- 8.4. Транзисторлар қопламаларининг тузилиши.

ХОТИМА

ТАВСИЯ ЭТИЛАДИГАН АДАБИЁТ

ЮНУСОВ М.С, ВЛАСОВ С.И, НАЗИРОВ Д.Э.,
ТОЛИПОВ Д.О.

ЭЛЕКТРОН АСБОБЛАР

Муҳаррир С. Чинпұлатова
Бадий муҳаррир С. Муинова
Техник муҳаррир Д. Бекиева

Теришга берилди:

Босишга рухсат этилди:

Шартли босма таболи:
Бичими 60x84 1/16.
Буюртма №

"Университет" нашриёти, Тошкент-700174. Талабалар
шарчаси,
ЎзМУ

Нашриёт Дисоби таболи
Адади 500 нусха.

Баёси келишилган нархда.

