

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ. И. Сәтбаев атындағы
Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

С. П. Луганская
Н. Қ. Қыдырбаева

ЭЛЕКТРОНИКА НЕГІЗДЕРІ

Университеттің Ғылыми-әдістемелік кеңесі
оқу құралы ретінде ұсынған

Алматы 2016

ӘОЖ 621.38 (075.8)

ББК 32.85я73

Л83

Пікір жазғандар:

*Кубеков Б.С., техн. ғыл. канд., проф., «Туран»
университеті;*

Шайхин Б. М., физ.-матем. ғыл. канд., доц., АЭЖБУ;

Сарсенбаев Н. С., техн. ғыл. канд., доц.

Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің
2016 жылғы басылым жоспары бойынша басылды

С. П. Луганская

Л83 Электроника негіздері: Оқу құралы / С. П. Луганская.,
Н. Қ. Қыдырбаева. – Алматы: Қ. И. Сәтбаев атындағы
ҚазҰТЗУ, 2016. – 205 б.: Сурет 109. Кесте 1. Библиогр. – 17 атау.
ISBN 978-601-228-923-7

Оқу құралында жартылай өткізгіштердің физикалық негіздері мен электрондық аспаптар мен сұлбалардың жұмыс істеу принциптері, сонымен қатар биполярлы және өрістік транзисторлар туралы мәліметтер, тиристорлар және олардың жұмысына математикалық талдау көрсетілген, қуатты транзисторлардың негізгі түрлері және жұмыс істеу принциптері мен қолданылу салалары, күшейткіштер және олардың күшею кластары, күшейткіштердегі кері байланыстар түрлері, операциондық күшейткіштер және олардың классификациясы, гармоникалық сигналдар генераторлары, биполярлық және өрістік транзисторлардың кілт режимдері қарастырылған.

Оқу құралының басты мақсаты – электрониканың негізгі тақырыптарын толық түсінікті түрде көрсету.

Оқу құралы «Аспап жасау» және «Автоматтандыру және басқару» мамандықтарының студенттеріне арналған, сонымен қатар электроника пәнін оқып игеру барысында білімдерін жетілдіруге ықпал етеді.

ISBN 978-601-228-923-7

© Луганская С. П.,
Қыдырбаева Н. Қ. 2016
© ҚазҰТЗУ, 2016

КІРІСПЕ

Электроника ғылым мен техника облысындағы қарқынды дамып келе жатқан сала. Ол әртүрлі электронды аспаптардың қолданылу аясы мен құрылғылардың жұмыс істеу принципін зерттейді. Ғылым мен техниканың көптеген облыстарда маңызды жетістіктерге жетуіне электрониканың дамуы себепші болды. Қазіргі уақытта кезкелген өнеркәсіп саласында қолданылмайтын электронды аспаптар мен өлшеу құралдарын, автоматика және есептеуіш техникасын табу мүмкін емес. Жыл сайын электронды ақпаратты құрылғылар мен автоматика құралдарының үлесі артып келеді.

Электроника жер бетінде XVIII және XIX ғасырларда физиктердің үздіксіз жұмыстары арқасында дамыды.

Бастапқы онжылдық кезеңінде электроника тек электрондық және иондық электровакуумдық аспаптарға сүйенсе, соңғы уақытта заманауи электрониканың барлық облыстарында негізгі аспап болып жартылай өткізгіштер саналды. Жартылай өткізгіш аспаптар техникасы электрониканың өте ауқымды және маңызды облысы болып есептелінеді.

Қазіргі уақытта күнделікті өмірді және ғылыми-зерттеу жұмыстарын электрондық аппаратсыз елестету мүмкін емес. Электроника біздің өміріміздің бір бөлшегіне айналды. Тұрмыста, өнеркәсіпте, ғылыми-зерттеу институттарында және конструкторлық бюроларда – барлық жерде электроникамен кездесеміз. Шын мәнісінде, электроника аса нәзік операцияларды орындайтын заманауи ЭЕМ, калькуляторды, қуатты электромагнитті толқындар мен аппараттарды, теледидар, аудиотехника мен радиотелескоптарды ойлап табуға мүмкіндік берді.

Заманауи ғылыми-техникалық прогресс электрониканың дамуымен тығыз байланысты. Электроника жетістігінің нәтижесі қасиеті жағынан әртүрлі ерекше жартылай өткізгіштерді құрастыру. Электрониканы зерттеу үшін алдымен, құрылғы мен аспаптың физикалық жұмыс істеу негізін, сипаттамаларын, параметрлері мен маңызды қасиеттерін, сондай-ақ аппаратта қолданылатын мүмкіндіктерін анықтау қажет.

Ғылыми-техникалық прогресс техникалық жүйедегі өте күрделі қажеттіліктерді таңқалдырып келеді. Бұл қажеттіліктер жобалау кезеңінде, әдістерді дамыту барысында және жүйені физикалық іске асыруды қанағаттандырады.

Электрониканың жетістіктері айтарлықтай дәрежеде радиотехника мен есептеуіш техниканың дамуымен түсіндіріледі. Бұл облыстар тығыз өзара байланыста дамыды. Жартылай өткізгішті аспаптар құрылғы мен жүйе көрсеткішінің маңызды элементтерін анықтайды.

Электроника радиотехника мен есептеуіш техникадан басқа өлшеуіш техникаға елеулі әсерін тигізіп, өлшеу дәлдігі амалдарын біршама өзгертті. Техниканың бұл саласы өз кезегінде, технологиялық процестерді басқарудың жаңа жүйелерін құрастыру үшін түрткі болды.

Электрониканы қолдану аймағындағы күрделі мәселелер электрониканың жаңа элементтерін жетілдіруге мүмкіндік берді.

Электрондық құрылғыларды қолдану әртүрлі зерттеулер мен өлшеулер жүргізуге мүмкіндік береді, бірақ электроникаға ешқандай қатысы жоқ. Электроника әдістері көп санды, табиғатта бар заттардың зерттеу қасиеттерін жетілдіру, материяның құрылымын тереңірек ұғынуға мүмкіндік берді.

Электронды аппаратты құрылғылар мен автоматика құрылғылары тоқтаусыз ұлғаюда. Бұл интегралды технологияның дамуын, яғни жаппай арзан және жоғары сапалы өнімді шығару, әртүрлі мақсаттағы тағайындалған микроэлектронды функционалды түйіндерді жөндеуді енгізді. Өнеркәсіпте автоматика жүйелеріне, өлшеу және есептеуіш техникасында құрылғыларды құрастыруға қажетті барлық функционалды түйіндерді шығарады. Үлкен (УИС) және аса үлкен (АУИС) интегралды сұлбалар негізінде микропроцессорлар мен ЭЕМ құрылып шығарылуда. Интегралды сұлбалармен орындалатын функциялар бағдарлама бойынша, сыртқы кодтарды ұсыну арқылы тағайындалып іске асады. Сонымен бірге, микросұлбалар сандық сигналдарды өңдеу кезінде әртүрлі толып жатқан операцияларды жүзеге асырады.

Интегралды сұлбаның кең таңдауына байланысты электронды аппаратураны өңдеушілердің алдында, техникалық шарт параметрлері мен тапсырмалары өзгерді. Егер бұрын

уақыттың маңызды бөлігі жеке каскадтардың режимдерін есептеуге кетсе, қазіргі кезде басты назар сұлба мен микросұлба арасындағы байланысқа көп көңіл аударады.

Типтік микротүйіндер көп жағдайда қажетті электронды блоктарды жеке каскадтарды бөлшектеп есептеусіз жинауға мүмкіндік береді. Ол үшін барлық жұмысты микросұлбаны құрушылар орындайды. Электрондық аппаратты құрушылар электр сигналы қандай түрлендіруге төзеді, қажет болған жағдайда интегралды сұлбаны таңдап, қажетті сұлба байланысы мен кері байланысты енгізеді және анықтайды. Тек бір жағдайда ғана, шығарылатын интегралды сұлбалар қандайда бір сұрақты шешпейді, ол талап етілген дәл есептеу жүргізу үшін дискретті компоненттерге жеке түйіндер қосады.

Интегралды сұлбаларды тиімді пайдалану үшін электрондық тізбек теориясын, жұмыс істеу принципі мен негізгі параметрлерін, әсіресе аналогты типті білмей қолдану мүмкін емес.

Электрондық құрылғының әртүрлі типті сандары көптігінен, оларды егжей-тегжей қарау мүмкін емес. Сондықтан қарауға жатпайтын, шектеулі пайдалану және арнайы жарататын кейбір аспаптар бар.

1. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕРДІҢ ЭЛЕКТР ӨТКІЗГІШТІГІ

1.1. Өзіндік жартылай өткізгіш

Табиғаты бойынша заттардың электроөткізгіштігі үш түрге бөлінеді: өткізгіштер, жартылай өткізгіштер және диэлектриктер.

Жартылай өткізгіштерге өзінің меншікті кедергісі ($\rho = 1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) болатын, өткізгіштер (өткізгіштің меншікті кедергісі ($\rho = 1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) мен диэлектрик ($\rho = 1 \cdot 10^{10} \dots 1 \cdot 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) арасында орналасатын қатты заттарды жатқызады. *Өзіндік жартылай өткізгіш деп* қоспасы жоқ өткізгіштерді айтады.

Температура немесе қоспалардың концентрациясы жартылай өткізгіштердің электр өткізгіштігіне әсеретуі оның негізгі ерекшелігі болып табылады.

Жартылай өткізгіштер заттардың кең таралған түрі болып табылады. Алайда электроникада жартылай өткізгішті құрылғыларды дайындау үшін жартылай өткізгіш заттардың белгілі мөлшері ғана қолданылады. Негізгі материал болып кремний (Si) және германий (Ge) қолданылады, олардың кристалдық құрылымы бар және олар Д. И. Менделеев кестесіндегі IV топта орналасқан. Индий, фосфор, бор, мышьяк және басқада заттар қоспа ретінде қолданылады.

1. 2. Жартылай өткізгіштердің кристалдық торы мен атомының құрылысы

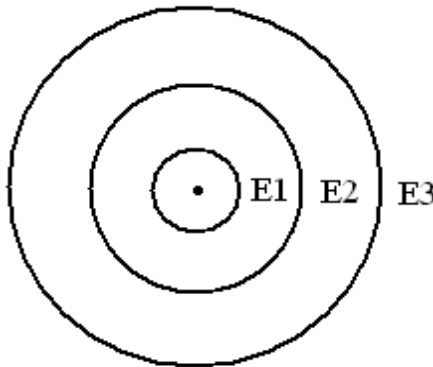
Атомның құрылысы бәрімізге белгілі. Кезкелген заттың атомы ядродан, және оның айналасында болатын, белгілі бір энергетикалық күйдегі электрондардан тұрады. Электрондар саны Менделеевтің элементтер кестесінің периодтық жүйесінде орналасқан элементтің реттік нөміріне сәйкес болады. 1.1-суретте атомның қарапайым құрылысы көрсетілген. Электрондар орбитасы $E_1, E_2, \dots$, энергетикалық күйге сәйкес келеді, өйткені электрондар энергияның дискреттік мәніне ие бола алады.

Электрон орбитасы атомдық ядродан неғұрлым алыстаған сайын, оның энергиясы көбейеді, өйткені электронды ядроға жақын орналасқан орбитадан алшақ орбитаға ауыстыру үшін электронның ядроға деген тартылыс күшін жеңуге қажетті энергия керек. Кванттық теорияға сәйкес электронның толқындық қасиеттері бар. Сондықтан электрон толқынының ұзындығы(1.1) формула бойынша анықталады:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (1.1).$$

мұндағы $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – Планк тұрақтысы, m – электрон массасы, v – электронның жылдамдығы.

Электрон толқын ұзындығының саны бүтін болатын орбиталарда ғана айнала алады. Электрондар орбитасы ядродан белгілі бір қашықтықта болады, сондықтан электрондар белгілі бір энергетикалық деңгейде бола алады.

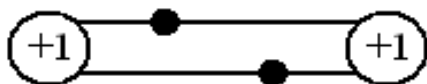


1.1-сурет. Атомның қарапайым құрылысы
E1, E2 және E3—дискретті энергетикалық деңгейі

Атомның барлық электрондары қозғалыс кезінде бір-бірінен айырмашылығы болады. Паули принципіне сәйкес, атомда бірдей күйдегі екі электрон бола алмайды. Негізгі кванттық санмен анықталатын және ядро мен орбита арасындағы қашықтықты сипаттайтын энергетикалық деңгей, электронды сипаттайтын негізгі ерекшелігі болып табылады.

Әр электрондық қабықшада тек қана белгілі бір электрондар саны бола алады: $N = 2n^2$, мұндағы n – сол электрондық қабықшаға сәйкес негізгі кванттық сан. Демек, $n=1$ болғанда ядроға жақын электрондық қабықшада, орбитада айналып жүретін және арқашалары қарама-қарсы екі электрон ғана орналаса алады. Екінші электрондық қабықшада 8 электрон, үшіншіде 18 орналасқан және т.с.с.

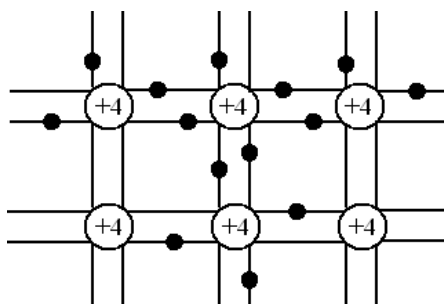
Сыртқы қабықшада орналасқан электрондарды *валентті* деп атайды. Олар жартылай өткізгіште ковалентті байланыс орнатады (1.2-сурет).



1.2-сурет. Сутегі молекуласындағы ковалентті байланыстың түрі

Сутегінің екі атомы жақындаған кезде зарядтар арасындағы алмасу күшейеді және ядро айналасындағы электрондардың қозғалысы өзгереді.

Берілген кремний (германий) атомындағы төрт валентті электрондардың әрқайсысы төрт көршілес атом электрондарының біреуімен ковалентті байланыс құрады. Жазықтықта кремний (германий) кристаллдық торын 1.3- суретте көрсетілгендей етіп бейнелейді.



1.3-сурет. Жартылай өткізгіштегі кремний (германий) кристаллдық торының жазық көрінісі

1. 3. Жартылай өткізгіштің өзіндік электрөткізгіштігі

Валентті электрондар ядромен байланысқан электрондарға карағанда әлсіз болады, сондықтан оларға қосымша энергия берген кезде, мысалы жылу энергиясын, олар атомнан бөлініп, жартылай өткізгіштің атом аралығында ретсіз жылулық қозғалыс жасайтын бос электрондарға айнала алады. Кремнийдің валентті электроны атомнан босап шығуы үшін оған $\Delta W > 1,12$ эВ сәйкес энергия қажет. Бір электрон-вольт (эВ) – бұл электр өрісіндегі потенциал айырмасы бір вольтке тең екі нүктенің арасында электронды ауыстыру үшін қажетті энергия.

Абсолютті температура нөлге тең болғанда (0 K) жартылай өткізгіштің барлық электрондары орбитада орналасады және олар атоммен тығыз байланыста болады. Сондықтан бұндай жартылай өткізгіште бос электрондар болмайды және ол диэлектрик сияқты идеалды окшаулағыш болады.

Егер бөлме температурасында (300 K) жартылай өткізгіш электрондарға берілетін жылулық энергия теңдей болып таралса, онда әрбір электронға 0,025 эВ сәйкес энергия бөлінер еді, демек электронды атомнан босатып алуға қажетті энергиядан аз энергия және жартылай өткізгіште заряд тасымалдаушы болмас еді. Бірақ шын мәнінде жартылай өткізгішке берілетін жылулық энергия электрондар арасында тең таралмайды, сондықтан бөлме температурасында жартылай өткізгіште валентті электрондардың біраз бөлігі атомнан босап шығуға қажетті энергияға ие болады.

Кез келген валентті электрон, мысалы, кремний қосымша $\Delta W > 1,12$ эВ энергияға ие болғанда орбитадан шығып бос электронға айналады, осы кезде бір ковалентті байланыс толық болмайды (орбитада бір электроны бар). Ковалентті байланыста бір электронның жетіспеуін *кемтік* деп атайды.

Кемтік – бұл байланыстағы атомдардан ортақ валентті электрон босап шыққан кезде кристаллға айналатын қозғалыстағы оң заряд. Кемтікті электр өрісін немесе басқа факторлар әсерінен электр тогын туғызуға қатыса алатын, оң заряд тасушы болып табылатын бөлшек деп санауға болады.

Кемтік қозғалысының бағыты валентті электрондар бағытына қарама-қарсы болады.

Бір немесе бірнеше электрондарды атом немесе молекуладан бөліп алу процесіндегі электрондық-кемтікті жұптың (заряд тасымалдаушылардың генерациялануы) пайда болуын *иондану* деп атайды. Бір немесе бірнеше электронды жоғалтқан атом немесе молекула *оң ионға* айналады.

Генерациямен қатар жартылай өткізгіште үздіксіз кері процесс жүреді, электронды-кемтікті жұптардың жойылуы *рекомбинация* деп аталады.

Кемтік көршілес ковалентті байланыстан көшкен басқа валентті электронмен немесе бос электронмен толтырыла алады. Бірінші жағдайда бір кемтік жоғалады, бірақ жанында басқасы пайда болады. Сонымен, кемтіктер бос электрондар тәрізді жартылай өткізгіште ретсіз жылулық қозғалыс жасайды. Екінші жағдайда екі заряд тасымалдаушы жоғалады: $-q$ заряды бар бос электрон және $+q$ заряды бар кемтік.

Осыған сәйкес, қозғалыстағы тасымалдаушының әрқайсысы белгілі бір уақыт аралығында өмір сүреді. Бұл уақыт аралығының орташа мәнін тасымалдаушының *өмір сүру уақыты* деп аталады және оны τ деп белгілейді:

τ_p – кемтіктің өмір сүру уақыты;

τ_n – өткізгіш электрондардың өмір сүру уақыты.

Тасымалдаушылардың өмір сүру уақыты қозғалыстағы тасымалдаушылардың қарама-қарсы белгісінің концентрациясынан және кейбір басқа факторларға байланысты болады. Өзіндік жартылай өткізгіш үшін $\tau_n = \tau_p = \tau_i$.

Егер атом немесе молекула артық электронды қармап алса, олар *теріс ионға* айналады.

Бос электрон мен кемтік бір уақытта пайда болып бір уақытта жоғалатын болғандықтан, өзіндік жартылай өткізгіште бос электрондардың саны кемтіктер санына сәйкес болады. Сонымен өзіндік жартылай өткізгішке (*i*-жартылай өткізгіші) төмендегі теңдеу сәйкес келеді:

$$n_i = p_i. \quad (1.2)$$

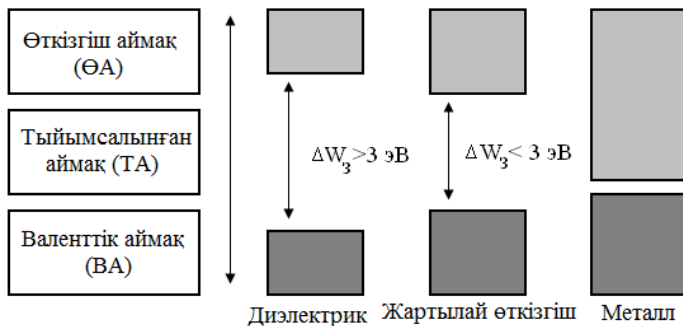
Жартылай өткізгіште ионизация және рекомбинация процестері үздіксіз жүреді. Сонымен жартылай өткізгіште *тепе-теңдік* концентрация деп аталатын заряд тасымалдаушылардың белгілі бір концентрациясы сақталады.

Заряд тасымалдаушылардың тепе-теңдік концентрациясы жартылай өткізгіштердің иондау энергиясына және температураға тәуелді болады – температура көтерілген сайын ол да өседі. Бір температурада кремнийдің тепе-теңдік концентрациясы германийге қарағанда аз, өйткені кремнийдің иондау энергиясы германийден аз болады.

Сонымен, жартылай өткізгіште белгілі бір сыртқы факторларға сәйкес заряд тасымалдаушылардың біраз мөлшері болады, және осыған орай ол электр тогын өткізу қасиетіне ие болады.

1.4. Жартылай өткізгіштердің энергетикалық (аймақ) диаграммалары

Металл мен жартылай өткізгіштерде валентті электрондарға қарағанда жоғары деңгейдегі электрондардың саны көп болады. Бұл деңгейлер *өткізгіштік аймақты* (ӨА) құрайды, ал осы аймақтағы электрондар *өткізгіштік электрондар* деп аталады. Өткізгіштік электрондар металдардың жоғарғы электр өткізгіштік қасиетіне ие болады. Валентті электрондар валентті аймақта (ВА) (1.4-сурет) орналасқан. Кристалдық тордың түйіндерінде орналасқан атомдардан валентті электронды босатып алу үшін белгілі бір энергия қажет.



1.4-сурет. Жеке алынған атом электронны қабығының энергетикалық (аймақ) диаграммалары

Бұл жағдайда босатып алынған электрон көптеген жақын орналасқан деңгейлерден тұратын, валентті аймақтан өткізгіштік аймаққа өтуіне сәйкес үлкен энергияға ие болады, себебі әрбір деңгейде екі электроннан артық болмайды.

Өткізгіштік аймақтың «түбі» мен валентті аймақтың «төбесі» арасындағы орналасқан тыйым салынған энергетикалық деңгейлердің аймағынемесе ені ΔW_t болатын *тыйым салынған аймақ* (ТА) орналасқан. Нормаға сәйкес температура кезінде диэлектриктерде өткізгіштік аймақта аз мөлшерде электрондар болады, сол үшін олар төменгі өткізгіштікке ие.

Жартылай өткізгіштер төменгі температурада диэлектриктерге тән қасиетке ие болады, ал нормаға сәйкес температурада ($T=300^\circ\text{K}$) электрондардың басым бөлігі валентті аумақтан өткізгіштік аумаққа өтеді.

Металдарда өткізгіштік аймақ валентті аймаққа тиіп тұрады, сол үшін металдардың электр өткізгіштігі температура өзгергенде сақталады.

1.5. Қоспалы жартылай өткізгіш

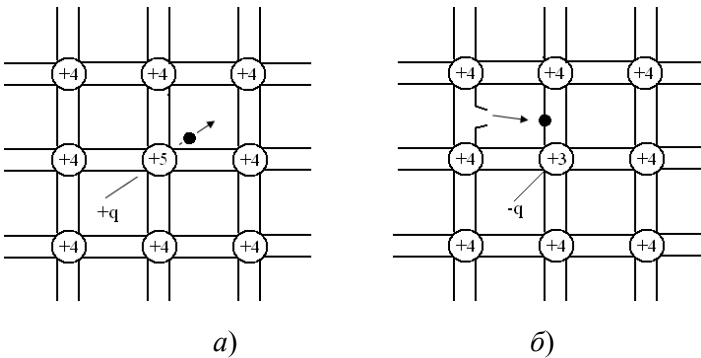
Кристалға сәйкес қоспаны енгізген кезде (легирлеу) жартылай өткізгіштің электр өткізгіштігін күрт жоғарылатуға болады. Сонымен, кристалға сәйкес қоспаны енгізу легирлеу деп аталады. Жартылай өткізгіштердің легирлеу дәрежесі осы материалда дайындалатын құрылғының өлшемдері мен қасиеттеріне сай анықталады. Осыған сәйкес легирлеу дәрежесін келесі түрге бөлуге болады:

- әлсіз легирлеу;
- қалыпты легирлеу;
- күшті легирлеу.

Қоспаның орнына бес валентті элемент алатын болсақ, мысалы, сүрме (Sb), онда қоспа атомының кристалдық торының кейбір түйіндерінде орналасып, көршілес атомдардың ковалентті байланысын өзінің төрт электронымен толықтырады, ал кристалдағы валентті байланыстардың біріңғай құрылымында артық болып, атомдық қоспамен әлсіз байланыста болады (1.5, а- сурет).

Сондықтан, жылу әсерінен валентті электрон қоспа атомынан оңай ажырайды және өткізгіштік электронға айналады. Осы кезде түйінде қалып қалған, кристалда қозғала алмайтын және электр зарядын тасымалдай алмайтын бес валентті атом оң ионға айналады. Алайда кристалл тұтас нейтралды болып қала береді, өйткені оң иондардың қатары өткізгіш электрондарының теріс зарядымен теңеледі.

Донорлық деп аталатын осындай қоспада кристалдағы электрондар концентрациясы күрт өседі және оның электрөткізгіштігі анық көрініп, айқындалады.



1.5-сурет. Жартылай өткізгіштегі кристаллдық тордың сұлбасы:
а) донорлық қоспалы атомы бар; б) акцепторлық қоспалы атомы бар

Абсолюттік нөлдік (0°K) температурадан біраз ғана айырмашылығы бар температурада барлық қоспалы атомдар артық валентті электроннан босап шығады, сондықтан қалыпты температура кезінде төменгі қатынасты дұрыс деп санайды:

$$n_n = n_d, \quad (1.3)$$

мұндағы, n_n — n -типті жартылай өткізгіштегі электрондар концентрациясы; n_d — донорлық қоспа концентрациясы.

Донорларды иондаумен қатар кристалда электр зарядын тасымалдаушы: электрондар мен кемтіктерден тұратын жұптардың термогенерациясы жүреді. Алайда кемтіктер саны рөзіндік жартылай өткізгіште бастапқыдай қала бермейді. Электрондар концентрациясы өсуі салдарынан электрондары бар

кемтіктерінің рекомбинациялану ықтималдылығы көбейеді, кемтіктердің өмір сүру уақыты азаяды да, олардың концентрациясы $p_n < p_i = n_i$, мәніне жеткенше азаяды, мұндағы p_n – n -типті жартылай өткізгіштің кемтіктер концентрациясы. Сонымен, n -типті жартылай өткізгіштерде $n_n \gg p_n$ болады. N -типті жартылай өткізгішті электрондарды негізгі заряд тасымалдаушылар деп, ал кемтіктерді – негізгі емес заряд тасымалдаушылар деп атау алынған. Төпе-теңдік күйдегі кристалдың кезкелген түрі үшін, қоспаның концентрациясынан тәуелсіз келесі теңдік орынды деп қабылданған ($T = \text{const}$ кезінде және басқа теңдік жағдайларда):

$$p_n n_n = n_i^2 = \text{const}. \quad (1.4)$$

Егер қоспа ретінде үш валентті элементті алатын болсақ, мысалы, индий (In), галлий (Ga), алюминий (Al) немесе бор (B), онда үш валентті атом кристалдық тор түйінінде оналасып, көршілес атомдармен тек қана үш ковалентті байланысты электрондармен толықтыра алады. Артық электронды қармап алған үш валентті қоспалы атом қозғалмайтын *теріс ионға* айналады, ал ортақ валентті электронды жоғалтып алған көршілес екі атомдарда кемтік пайда болады (1.5, б-сурет).

Осыдан кейін кемтік бүкіл кристалда ретсіз қозғалыс жасай бастайды. Ал жартылай өткізгіштің өзі электрлі нейтралды болып қалады. Мұндай *акцепторлық* деп аталатын қоспа кезінде кристалдағы кемтіктер концентрациясы күрт өседі және оның электрөткізгіштігі кемтікті болады (p -типті электр өткізгіштік). Қалыпты температурада барлық қоспалы атомдар иондалады, сондықтан

$$p_p \approx n_a, \quad (1.5)$$

мұндағы, p_p – p -типті жартылай өткізгіштегі кемтіктер концентрациясы; n_a – акцепторлық қоспаның концентрациясы.

Мұндай жағдайда кемтіктер – негізгі тасымалдаушылар, ал өткізгіштік электрондар – негізгі емес тасымалдаушылар.

Осыған сәйкес, $n_p < n_i$ болады, өйткені қоспаны енгізу кезінде электрондар концентрациясы кемтіктер санының көбеюімен қатар электрондар рекомбинация ықтималдығының өсуі салдарынан азаяды. Электронды жартылай өткізгіш үшін төмендегі қатынас сақталады:

$$p_p n_p = n_i^2 = p_i^2 = \text{const.} \quad (1.6)$$

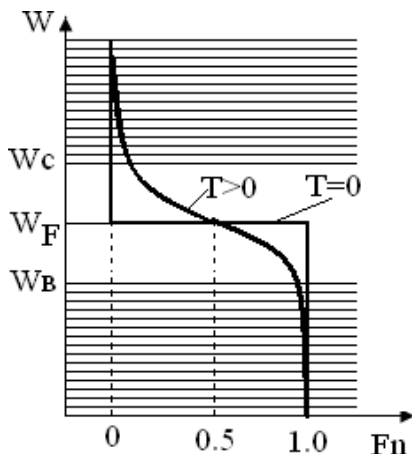
Қоспалы жағдайдағы кристалдың электрөткізгіштігі *қоспалы электрөткізгіштік* деген атау алды. Егер жартылай өткізгіш легирленген компоненттің екеуінен де тұрса, онда оның өткізгіштігі $n = |n_a - n_d|$ эквивалентті қоспамен анықталады. Негізгі тасымалдаушылар басымдылық қоспамен анықталады, негізгі тасымалдаушылардың концентрациясы n -ге тең деп алынады. Бұған сәйкес негізгі емес тасымалдаушылардың концентрациясы төмен болады. $n_a = n_d$ кезінде қоспада толық кезекті компенсациясы жүреді. Мұндай жартылай өткізгіштер *компенсивті* деп аталады.

1.6. Жартылай өткізгіштердегі Ферми деңгейі

Жартылай өткізгіштердегі Ферми деңгейі – бұл энергетикалық деңгейді электронмен толықтыру ықтималдылығы, ол T абсолютті температура мен сол деңгейге сәйкес F энергиясымен анықталады:

$$F_n(W) = \frac{1}{\{\exp\left[\frac{W - W_F}{kT}\right] + 1\}}, \quad (1.7)$$

мұндағы $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – Больцман тұрақтысы, T – абсолюттік температура °К, W_F – Ферми деңгейі деп аталатын энергетикалық деңгей.



1.6-сурет. Ферми–Дирактың таралу функциясы

$T=0$ кезінде $W > W_F$ деңгейлерін электронмен толықтыру ықтималдылығы нөлге тең:

$$F_n(W) = \frac{1}{e^{\infty} + 1} = \frac{1}{\infty} = 0, (1.8)$$

ал $W < W_F$ деңгейлерін электрондармен толдықтыру ықтималдылығы бірге тең:

$$F_n(W) = \frac{1}{e^0 + 1} = \frac{1}{1} = 1. (1.9)$$

Бірақ $T=0^\circ\text{K}$ -ге тең болған кезде жартылай өткізгіште бос электрондар болмайды, барлық электрондар валентті аймақта, орбитада болады. Демек, өткізгіштік аймақтың энергетикалық деңгейлері $W > W_F$ шартына сәйкес келеді, ал валентті аймақтың энергетикалық деңгейлері $W < W_F$ шартына сәйкес келеді. Осыдан шығатын қорытынды – W_F Ферми деңгейі өткізгіштік аймақтың «түбінен» төмен және W_B валентті аймақтың «төбесінен» жоғары, тыйым салынған аймақта орналасады. Суретте Ферми–Дирак функциясының қисығы салынған. $T=0$ кезінде $F_n(W)$ функциясы сатылы қасиетке ие болады. өткізгіштік аймақта деңгейлерді электрондармен толықтыру

ықтималдылығы нөлге тең, ал валентті аймақта бірге тең болады. $T > 0$ кезінде өткізгіштік аймақта айтарлықтай деңгейлерді электрондармен толықтыру ықтималдылығы пайда болады, ал валентті аймақта деңгейлерді толтыру ықтималдылығы азаяды.

Осылайша, өзіндік жартылай өткізгіште Ферми деңгейі тыйым салынған аймақтың ортасында орналасқан, n -типті жартылай өткізгіште өткізгіштік аймақтың жанында және p -типті жартылай өткізгіште валентті аймақтың жанында орналасқан.

1.7. Жартылай өткізгіштегі электрөткізгіш процестері

1.7.1. Ығу тогы

Жартылай өткізгіштің кристалындағы E өрістің әсерінен реттік қозғалыс нәтижесінде электрондар мен кемтіктердің *ығуы* туындайды, осы кезде *ығу тогы* деп аталатын электр тогы пайда болады. Айтылғанға сәйкес токта $I_{\text{нығу}}$ электронды және $I_{\text{рығу}}$ кемтікті құрамдас бөліктер болады:

$$I_{\text{ығу}} = I_{n \text{ ығу}} = I_{p \text{ ығу}} = S(j_{n \text{ ығу}} + j_{p \text{ ығу}}), \quad (1.10)$$

мұндағы S – кристалдың көлденең қимасы, см^2 ; $j_{n \text{ ығу}}$ және $j_{p \text{ ығу}}$ – электронды және кемтікті ығу тогының тығыздықтары, А/см^2 .

Токтың тығыздығы бірлік уақытта, бірлік көлденең қимадан өтетін q электр зарядымен анықталады. Жартылай өткізгіште 1 см^3 –де оның концентрациясына сәйкес, қарастырылып отырған қимаға норма болып табылатын әр электронның бағытталған v_n орташа ығу жылдамдығы кезіндегі электр тогының тығыздығы:

$$j_{n \text{ ығу}} = qn v_n = e_n v_n, \quad (1.11)$$

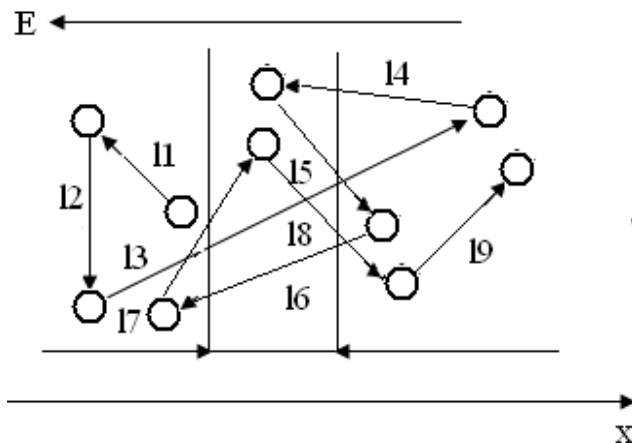
мұндағы $v_n = \mu_n E$; μ_n – электрондардың қозғалысы.

$$j_{p \text{ ығу}} = qp v_p = e_p v_p, \quad (1.12)$$

мұндағы $v_p = \mu_p E$; μ_p – кемтіктердің қозғалысы.

Жартылай өткізгіште электрондардың ығу механизмінің вакуумдағы электрлік өрістің әсерінен қозғалатын электрондардан айырмашылығы бар. Жартылай өткізгіште өткізгіштік электрондар ретсіз жылулық қозғалыс жасап, кристалдық тордың тербелістегі атомдарымен, қоспа атомдарымен бақа да тордың біртекті емес заттарымен қақтығысады. Қақтығыстар әр кезде серпімді болмайды: мысалы, қоспадағы иондалған атомдар электронды кармап алып оны шамалы уақыттан кейін босата алады. Электрон жол ұзындығындағы қозғалыстың бағытынан тәуелсіз екі қақтығысудың арасында, E электр өрісінің әсері нәтижесінде осы өріс күшінің бағытында біртіндеп Δx -ке ығысады.

Осыған сәйкес Δt уақыты кезінде өткізгіштік электронның ретсіз қозғалысына E -ге қарсы бағытта реттелген Δx_{cp} -ге ығысу қосарланады (1.7-сурет)



1.7-сурет. Жылулық қозғалыс кезіндегі өткізгіштік электронның ығысып жылжуы

Өткізгіштік электрондардың немесе ығудың орташа жылдамдығы:

$$v_n = \frac{\Delta x_{cp}}{\Delta t}. \quad (1.13)$$

Егер ығудың жылдамдығы электрондардың жылулық қозғалысы жылдамдығынан төмен болса, онда ол электрлік өрістің кернеулігіне тура пропорционал болады, демек:

$$v_n = \mu_n E, \quad (1.14)$$

мұндағы $\mu_n \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – электрондар қозғалысы деп аталатын пропорционалдық коэффициент.

Бұл коэффициент сандық шама бойынша кристалдағы өткізгіштік электрондардың электрлік өрістері 1 В/см-ға тең кернеулікте пайда болатын орташа жылдамдыққа тең.

Өзіндік жартылай өткізгіште, бөлме температурасында заряд тасымалдаушылардың қозғалысы келесі мәндерді қабылдайды:

- германий үшін $\mu_n = 3800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;
- кремний үшін $\mu_n = 1350 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Осыған ұқсас процесстер жартылай өткізгіште электр өрісінің әсерінен кемтіктерді ығыстыру кезінде пайда болады. Бірақ кемтіктерді ығыстыру механизмі өткізгіштік электрондарды ығыстырумен емес, валентті электрондарды ығыстырумен байланысты болғандықтан кемтіктер қозғалысы электрондар қозғалысынан төмен болады және олардың мәні төмендегідей болады:

- германий үшін $\mu_p = 1900 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;
- кремний үшін $\mu_p = 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Зарядтары әртүрлі болатын кемтіктер мен өткізгіштік электрондар, бір бағыттағы ығу тогын пайда болдырып, қарама-қарсы бағытта ығысады.

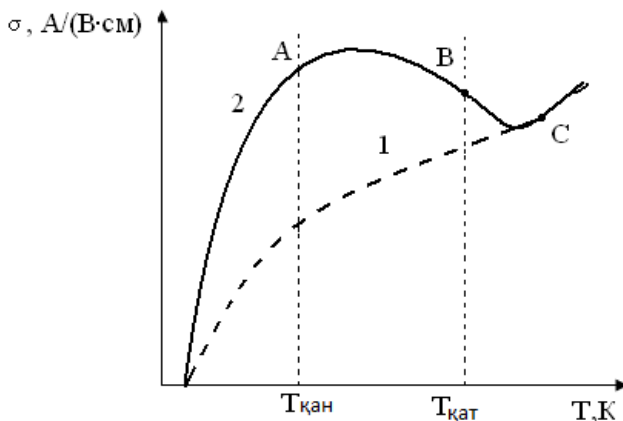
$j_{n \text{ ығу}} = q_n v_n = e_n v_n j_{p \text{ ығу}} = q p_p v_p = e_p v_p$ болғанын ескере отырып, өзіндік жартылай өткізгіш үшін келесіні аламыз:

$$I_{\text{ығу}} = SE \left(e n_i \mu_n + e p_i \mu_p \right) = S e \sigma_i, \quad (1.15)$$

мұндағы σ_i – жартылай өткізгіштің жеке меншікті өткізгіштігі, $\text{А}/(\text{В} \cdot \text{см})$.

Температура (Т) жоғарылаған сайын электрондар мен кемтіктердің қозғалысы азаяды.

Алайда, температура жоғарылаған сайын қозғалыстағы $n_i = p_i$ тасымалдаушылардың концентрациясы экспотенциалдық заң бойынша жоғарылайды, ол жартылай өткізгіштің осы заңға сәйкес өзіндік өткізгіштіктің өсуін анықтайды (1.8-сурет, 1, 2-қисықтар).



1.8-сурет. Жартылай өткізгіштегі өткізгіштіктің температураға тәуелділігі:

1 – өзіндік жартылай өткізгіш;

2 – қоспалы жартылай өткізгіш

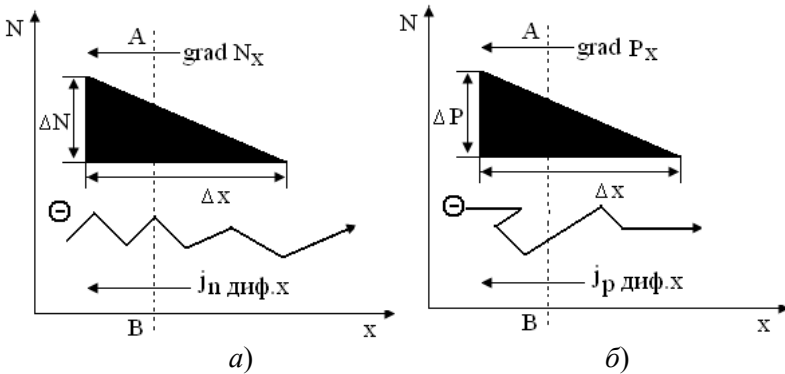
1. 7. 2. Диффузиялық ток

Жартылай өткізгіштегі ток электрлік өріспен ғана емес, кристалл көлеміндегі қозғалыстағы заряд тасымалдаушылардың (өткізгіштік электрондар мен кемтіктер) біртекті емес таралуынан да пайда болады.

Диффузиялық токты пайда болдыратын зарядтар диффузиясы кезкелген зарядтар концентрациясының градиенті бар жүйеде қалыпты процесс ретінде өтеді. Заряд тасымалдаушылардың диффузиялық қозғалысы жартылай өткізгіштің көршілес қабаттарында электрондардың (кемтіктердің) концентрациясының айырмашылығы кезінде пайда болады.

Диффузия кезінде (бірлік уақытта бірлік көлденең қимадан өтетін, концентрация градиентіне перпендикуляр бағытта өтетін бөлшектер саны) бөлшектердің ағыны осы бөлшектр концентрациясына пропорционал екені молекулалық физикадан белгілі.

Бөлшектер барлық бағытта ретсіз жылулық қозғалыс жасайды, бірақ концентрациясы көп аймақтан концентрациясы аз аймаққа қозғалатын бөлшектер саны қарама-қарсы бағытта қозғалатын бөлшектр санынан көп болады. Нәтижесінде концентрациясын азайту бағытындағы электрондардың реттелген диффузиялық ауысуы байқалады (1.9-сурет, сол жақтан оңға), демек электрондар диффузиясының бағытына қарама-қарсы бағытталған *диффузиялық электрлік ток* пайда болады.



1.9-сурет. Электрондар (а) мен кемтіктер (б) диффузиясы

$j_{\text{диф}}$ диффузиялық токтың тығыздығы $\text{grad } N_x \approx \Delta N / \Delta x$ *градиент* (1.9, а-сурет) деп аталатын өткізгіштік электрондар концентрациясының біртекті еместілігіне тура пропорционал. Осыған ұқсас процесс кемтіктер диффузиясының бағытына сәйкес келетін диффузиялық токты пайда болдыратын кемтіктердің бірдей емес концентрациясы кезінде де болады (1.9, б-сурет). Сонымен, электрондардың диффузиялық тогы олардың концентрациясы градиенті бағытына сәйкес келеді, ал кемтіктердің диффузиялық тогы олардың концентрациясы

градиентіне қарама-қарсы бағытталады. Х осі бағытындағы диффузиялық токтардың тығыздығы келесі қатынастармен анықталады:

$$J_{n, \text{диф.х}} = eD_n(\Delta n/\Delta x), \quad (1.16)$$

$$J_{p, \text{диф.х}} = eD_p(\Delta p/\Delta x), \quad (1.17)$$

мұндағы D_n және D_p – электрондар мен кемтіктердің диффузиялық коэффициенттері.

Диффузия коэффициенттері тасымалдаушылардың қоғалысымен Эйнштейн қатынастарымен байланысты болады:

$$D_n = \frac{\mu_n kT}{e}, \quad (1.18)$$

$$D_p = \frac{\mu_p kT}{e}, \quad (1.19)$$

мұндағы $\frac{kT}{e}$ бөлме температурасындағы температуралық потенциал $\frac{kT}{e} \approx 0.025V$.

μ_n , μ_p сандық мәндерді ескере отырып келесіні шығарып аламыз:

– германий үшін $D_n = 100$, $D_p = 49$;

– кремний үшін $D_n = 30$, $D_p = 13$.

1.8. Электронды-кемтікті өткел

Жартылай өткізгішті құрылғыларда электрлік өткелді кең түрде қолданады. *Электрлік өткел* – бұл жартылай өткізгіштік материалдағы электр өткізгіштігі әр типті аймақтар немесе электр өткізгіштің әртүрлі меншікті мәндерінің арасындағы өтпелі қабат.

Электронды-кемтікті (pn-өткелі) кең таралған, ол жартылай өткізгіште p -типті және n -типті электрөткізгіштік аймақтар арасындағы өтпелі қабат. Егер екі аймақта да қоспалар концентрациясы бірдей болса, онда мұндай өткелді

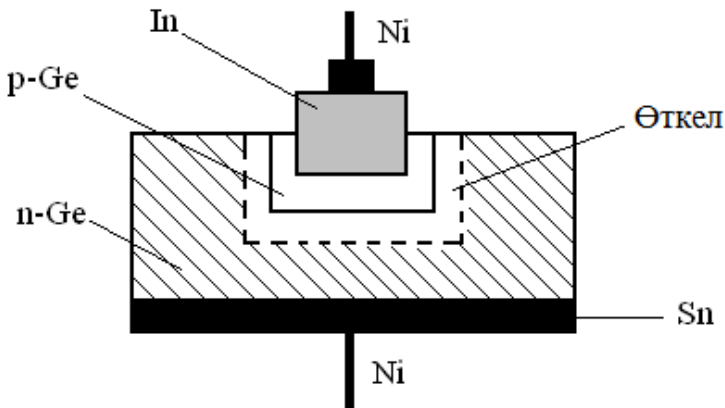
симметриялы деп атайды. Ал бір аймақтың концентрациясы аз немесе көп болса, онда оны *симметриялы емес* деп атайды.

Аудан бойынша *pn-өткелі жазықтық* деп бөлінеді, онда өткелдің ауданын анықтайтын сызықтық өлшемдер оның қалыңдығынан асады және *нүктелік* деп бөлінеді, ондағы өлшемдер өткелдің қалыңдығынан аз. Жазықтық өткелдер кең қолданылады.

pn-өткелде кристалл бір бағытта токты өткізіп, екіншісінде өткізбейтін *симметриялы емес* электр өткізгіштік негізгі қасиет болып табылады.

pn-өткелдер транзисторлар мен көптеген диодтардың жұмыс элементтері болып табылады. *pn-өткелді* жартылай өткізгіштердің *p-* және *n-*типтерін жалғастыру жолымен алу қиын. Оған жартылай өткізгіштерді қаптап тұратын қабықтардың қышқылдары мен ауа қабаты кедергі болады.

Электронды-кемтікті өткел жартылай өткізгіштің біртекті пластинкасында белгілі бір технологияның көмегімен жүзеге асырылады. *pn-өткелдерді* дайындаудың екі тәсілі көп қолданылады: *құймалы* және *диффузиялы*.



1.10-сурет. Құймалы өткелді дайындау тәсілі

Құймалы әдістің негізі – пластинкаға, мысалы, *n*-германийге индий таблеткасын жабыстырып және оны вакуумда 500С дейін қыздырады, осы кезде индий таблеткасы еріп, өзіне жабысып тұрған германий пластинкасын ерітеді. Германий пластинкасы мен индий таблеткасы арасындағы шекарада *p*-германий, индий қоспасы бар германий қабаты пайда болады. *p*-германий қабаты мен *n*-германий пластинкасы арасында *pn*-өткелі пайда болады.

Кремний құймалы pn-өткелді алюминий мен кремний пленкасын +700С температурада еріту арқылы алады.

Германий диффузиялық pn-өткелі. Германий *pn*-өткелді дайындаудың диффузиялық әдісі кезінде, индий буына толтырылған *p*-германий пластинкасын + 900С-та пеште қыздырады. Осы кезде индий *n*-германийдің пластинкасына индий атомдарының интенсивті диффузиясы жүреді.

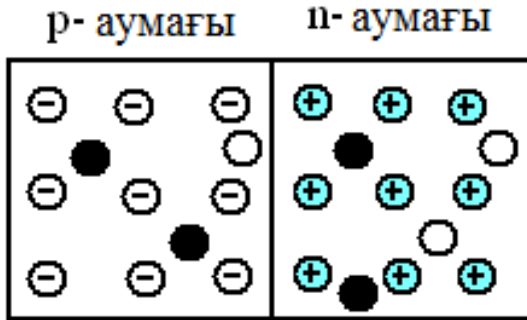
Пластинканың бетінде *p*-германий қабаты түзіледі. Бұл қабаттың қалыңдығы диффузия процесімен реттеледі. Сосын улау жолымен пластинканың барлық жерінен, бір ғана *p*-германий қабатын қалдырып басқаларын алып тастайды және шығыстарды жалғайтын омикалық түйіспелерді жасайды.

Германий нүктелік pn-өткелді келесі түрде алады. *p*-германий пластинканың жақсылап өңделген бетіне бериллийді қолдана жасалған үшкір инені жабыстырады. Сосын алынған түйіспені формовкалайды, оның мақсаты түйіспе арқылы күшті, бірақ қысқа импульсті токты өткізу болып табылады. Осы кезде түйіспенің қызуы байқалады, нәтижесінде германийге қатысты акцептор болып табылатын бериллий атомдары *n*-германий пластинкасына диффузияланады және ол ине маңайында жіңішке жарты сфералық *p*-өткелді құрайды. Иненің ұшы өткізгішке ерітіледі, осының нәтижесінде *pn*-өткелінің тұрақтылығы мен механикалық мықтылығы жүзеге асырылады.

Аудан бойынша жазықтықты және нүктелік өткелдер арасындағы аралық микроеріткіш өткелдер болып табылады, оларды қоспаның өте кішкентай таблеткасын еріту арқылы алады.

1.8.1. Pn-өткелінің қасиеттері

1.11-суретте «-» белгісімен акцепторлық қоспаның қозғалмайтын атомдары белгіленген, «+» белгісімен донорлық қоспаның қозғалмайтын атомдары белгіленген, боялған дөңгелектерде – бос электрондар, ал боялмаған дөңгелектерде – кемтіктер (оң зарядтар) белгіленген.



1.11-сурет. Қалыптасу кезіндегі pn -өткелінің құрылымдық сұлбасы

Кері бағытта (n -аумағынан) бос электрондар орын ауыстырады. Сонымен, аумақтардың шекарасынан негізгі заряд тасымалдаушылардан негізделген және кемтіктер мен электрондардан құралатын диффузиялық $I_{\text{диф}}$ тогы жүреді:

$$I_{\text{диф}} = I_{p.\text{диф}} + I_{n.\text{диф}}. \quad (1.20)$$

Токтың бағыты оң зарядтардың қозғалыс бағытымен сәйкес болғандықтан, $I_{\text{диф}}$ p -аумақ n -аумаққа қарай өтеді. Диффузия нәтижесінде p және n аймақтардың электр нейтралдығы бұзылады.

p -аумақтар бөлігіндегі шекарасында акцепторлық қоспаны толықтырмайтын теріс зарядтары шығады, өйткені бұрынғы компенсирт оң зарядталған кемтіктердің бір бөлігі n -аумаққа өтеді, ал басқа бөлігі n -аумақтан келген бос электрондармен рекомбинацияланады.

n -аумақтың байланыста болатын бөлігінде донорлық қоспаның оң зарядты атомдары шығады, өйткені оларды толықтыратын теріс зарядты бос электрондардың бір бөлігі p -аумаққа өтеді, және топтасып n -аумаққа диффузияланған кемтіктермен рекомбинацияланады.

Нәтижесінде аумақтар бөлігінің шекарасының екі жағынан да электр өрісін тудыратын қарама-қарсы зарядты белгілер шығады.

Потенциалдық тосқауыл – бұл негізгі заряд тасымалдаушылардың диффузиялық ығысуға кедергі жасайтын электр өрісі.

Аумақтар бөлігінің шекарасында электр өрісі пайда болысымен заряд тасымалдаушылардың қайта ауысу мүмкіндігі туады:

- кемтіктердің n -аумақтан p -аумаққа өтуі;
- бос электрондардың n -аумақтан p -аумаққа өтуі.

n -аумақтағы өткелдің жанында ретсіз жылулық қозғалысы дәл осы кезде кемтікке потенциалдық тосқауыл бола алмай, керісінше оны жылдамдататындықтан, өткелдің электр өрісіне өте алады. Сол үшін кемтікті өріс p -аумаққа ауыстырады. Осы кезде p -аумақ аумақтар шекарасының жанындағы акцепторлық қоспадағы бір атомның теріс зарядымен толықтырылады.

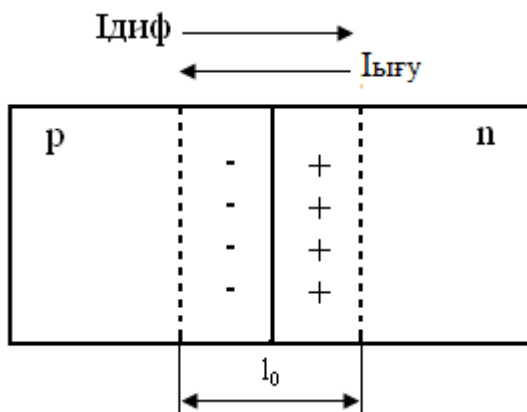
Дәл осы кезде p -аумақта ретсіз жылулық қозғалыс жасайтын бос электрон n -аумаққа қарай өтеді, ол жерде ол донорлық қоспадағы атомның оң зарядымен толықтырылады. Зарядтың негізгі емес тасымалдаушылары аумақтар бөлігінің шекарасын өте келе диффузиялық ток тәрізді кемтікті және электронды құрамдардан тұратын *ығу тогын* пайда болдырады:

$$I_{\text{ығу}} = I_{p.\text{ығу}} + I_{n.\text{ығу}}, \quad (1.21)$$

мұндағы $I_{p.\text{ығу}}$ – ығу тогының кемтікті құрамы, $I_{n.\text{ығу}}$ – ығу тогының электронды құрамы.

Ығу тогы потенциалдық тосқауылдың жоғарылауына және диффузиялық токтың нөлге төмендеуіне кедергі болады. pn -өткеліндегі қалыптасқан режимінде динамикалық тепе-теңдік

орнайды: $I_{\text{диф}}$ азайып, қарсы бағыттағы $I_{\text{ығу}}$ тогына теңеледі, және ауысудан шығатын нәтижелік нөлге тең болады (1.12-сурет).



1.12-сурет. Қалыптасқан режимдегі сыртқы кернеусіз pn - өткелдегі ток

$I_{\text{ығу}}$ шамасы p - және n -аумақтардағы зарядтың негізгі емес тасымалдаушыларының концентрациясымен анықталады. Берілген аумақта негізгі емес тасымалдаушылар көп болған сайын олардың өткел өрісіне түсу ықтималдылығы жоғарылайды. Ығу тогы ауысудағы электр өрісінің кернеулігіне тәуелсіз болады. Өйткені p - және n -аумақтардағы ($I_{\text{ығу}}$ —де) негізгі емес заряд тасымалдаушылардың концентрациясы температураға тәуелді болады, pn -өткелінен өтетін $I_{\text{ығу}}$ токты *жылулық ток* деп атайды.

Негізгі заряд тасымалдаушылар өткелді аумақта қалыптасып және олар сол жерде рекомбинацияланған кезде pn -өткелдің ішінде заряд тасымалдаушылар аз қалады, демек pn -өткелі *жұқарған қабатқа* айналады.

Алайда pn -өткелдің кедергісі жұқарған қабаттың кедергісімен анықталмайды, өйткені олардан өтетін ток pn -өткелден өтіп, негізінде жұқарған қабаттың емес, p - және n -өткелдердің заряд тасымалдаушылары болып қалыптасады.

Тепе-теңдік күйдегі pn -өткелді сипаттайтын негізгі шамалар:

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{\rho^2(b+1)^2}{\rho_p \rho_n b}, \quad (1.22)$$

мұндағы $\Delta\varphi_0$ - потенциалдық тосқауылдың биіктігі (басқа сөзбен айтқанда, потенциалдар айырымы), $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$; ρ_i – өзіндік жартылай өткізгіштің меншікті кедергісі; ρ_p және ρ_n – p және n -аумақтардың меншікті кедергілері; $\varphi_T = \frac{kT}{e}$, мұндағы $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ – Больцман тұрақтысы, T – абсолютті температура, °K; l_0 – өткелдің ені:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \Delta\varphi_0}{q}} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right), \quad (1.23)$$

мұндағы $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – вакуумның диэлектрлік өтімділігі; ε – кристалдың диэлектрлік өтімділігі (германий – 16, кремний – 12); q – электрон заряды, оның абсолюттік мәні мынаған тең: $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$; N_d және N_a — донорлық және акцепторлық қоспаның концентрациясы.

Кремнийлі өткелде $\Delta\varphi_0$ меншікті кедергінің шамалы көп болғандықтан германийден 2 есе артық.

Физика жағынан оны былай түсіндіруге болады: бөлме температурасында кремнийдің заряд тасымалдаушылары – кемтіктер мен бос электрондар германийге қарағанда аз болады. Сондықтан кремнийлі өткелде аумақтағы бір белгілі зарядтар концентрациясының айырымы германийден көп болады. Өткел аумақтарындағы заряд тасымалдаушыларының концентрациясының айырымы үлкен болған сайын pn -өткелде тепе-теңдік күйге дейінгі диффузияның нәтижесінде өткелдегі аумаққа негізгі тасымалдаушылар неғұрлым көп өтеді.

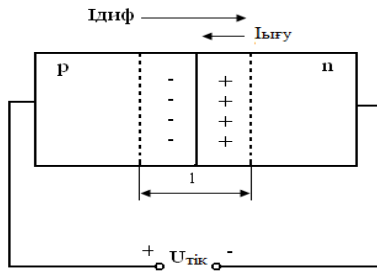
$\Delta\varphi_0$ шамасы N_d және N_a -ден тәуелді болады. Концентрацияның жоғарылауы (ρ_n және ρ_p төмендеуі) $\Delta\varphi_0$ жоғарылатады, бұл кезде өткел аумақтарында бір белгілі заряд тасымалдаушылар концентрациясының айырымы өседі.

Өткелдің ені p - және n -аумақтардағы қоспалар концентрациясы мен потенциал айырымына тәуелді болады. Донорлық және акцепторлық қоспалардың концентрациясы жоғары болған жағдайда өткел жіңішке болады. Физика тұрғысынан оны былай ұғындыруға болады, p - және n -аумақтардағы қоспа концентрациясы жоғары болған кезде тепе-теңдік күйге сәйкес келетін потенциалдық тосқауыл болатындай, жіңішке қабатта орналасқан негізгі заряд тасымалдаушылар өткелді аумаққа ауысуы жеткілікті. p - және n -аумақтардағы қоспалар концентрациясы төмен болған кезде ені үлкен болады. pn -өткелдің тепе-теңдік күйдегі ені микрометрдің оннан бір бөлігін құрайды.

1.8.2. Тура қосу кезіндегі pn -өткелі

Тура қосу – бұл потенциалдық тосқауыл азайып және өткел арқылы үлкен ток өткен кездегі pn -өткелінің қосылуы.

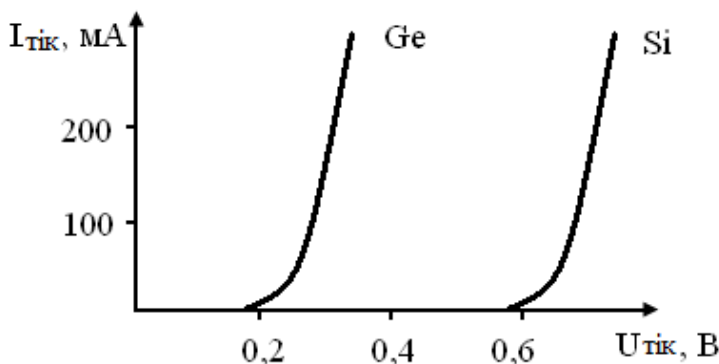
Ол үшін сыртқы қорек көзімен жасалынатын электр өрісі өткелдің ішкі өрісіне қарсы бағытталуы қажет. Демек, қорек көзінің «+» p -аумаққа, ал «-» n -аумаққа қосылуы тиіс. p - және n -аумақтардың кедергілері төмен болғандықтан ток көзінің кернеуі pn -өткеліне қоса тіркеледі. pn -өткеліне тіркелген сыртқы ток көзі кернеуінің полярлығы өткел алдында «+» және «-» белгілерімен көрсетілген. Потенциалдық тосқауылдың төмендеуі диффузиялық токтың көбеюіне әкеледі, ал ығу тогына әсер етпейді. Сол үшін pn -өткелі арқылы сыртқы тізбекте де диффузиялық және ығу токтарының айырымына тең болатын $I_{\text{тура}} = I_{\text{диф}} - I_{\text{ығу}}$ тура ток өтеді.



1.13-сурет. pn -өткелінің тура қосылуы

Бөлме температурасында потенциалдық тосқауылдың біраз төмендеуі кезінде $I_{\text{диф}} \gg I_{\text{ығу}}$ қатынасы дұрыс деп саналады, және сол үшін $I_{\text{диф}} \approx I_{\text{ығу}}$ тең болады деп санауға болады, бұл pn -өткелі арқылы өтетін тура ток – ол негізгі заряд тасымалдаушылар құрайтын диффузиялық ток.

1.14-суретте pn -өткелдерді тура қосқан кездегі германий мен кремнийдің вольт – амперлік (ВАС) сипаттамалары көрсетілген. Сипаттаманың бастапқы қисықтары потенциалдық тосқауылдың бар екендігін көрсетеді. Ары қарай тура кернеуді жоғарылатқан кезде, потенциалдық тосқауыл толықтырылған кезде $I_{\text{тура}}$ тогының $U_{\text{тура}}$ кернеуге тәуелділігі сызықтыққа жақын болады. Осы кезде туратоктың шамасы p - және n -аумақтардың көлемдік кедергісімен анықталады.



1.14-сурет. Тура қосу кезіндегі германий және кремнийлі pn -өткелдерінің вольт-амперлік сипаттамалары

Германий pn -өткеліндегі потенциалдық тосқауылдың шамасы кремнийден төмен болғандықтан, германий өткелінің қисық сызықты сипаттамалары төменгі кернеуде аяқталады, германийлі өткелдің сипаттамасы кремнийлі өткелдің сипаттамасынан солға жылжытылады.

Жартылай өткізгіштің берілген аумағына негізгі емес заряд тасымалдаушыларын төмендеген потенциалдық тосқауыл арқылы енгізу процесі *инжекция* деп аталады.

p -аумақтан n -аумаққа кемтіктер инжекцияланады, ал n -аумақтан p -аумаққа бос электрондар инжекцияланады.

Инжекция нәтижесінде жартылай өткізгіште негізгі емес заряд тасымалдаушылардың артық концентрациясы пайда болады. Негізгі емес заряд тасымалдаушылар инжектеліп, берілген аумақтың түбіне диффузияланып, осы аумақтың негізгі тасымалдаушыларымен рекомбинацияланады. Сол үшін негізгі емес заряд тасымалдаушылардың артық концентрациясы өткелде қашықтық артқан сайын азаяды.

Сонымен, заряд тасымалдаушылардың инжектелген бөлігі белгілі бір қысқа мерзімді уақыт өмір сүреді τ .

Негізгі емес тасымалдаушылардың артық концентрациясы e есе азайған кездегі қашықтық *диффузиялық жол* деп аталады ($e = 2,718$ – натуралдық логарифмнің негізі) және ол төмендегідей анықталады:

$$L = \sqrt{D \cdot \tau}, \quad (1.24)$$

мұндағы D – диффузия коэффициенті.

Сыртқы кернеу U болған кезде pn -өткелінің ені мынаған тең болады:

$$l = l_0 \sqrt{\frac{(\Delta\varphi_0 - U)}{(\Delta\varphi_0)}}, \quad (1.25)$$

мұндағы $\Delta\varphi_0$ – өткелдің тепе-теңдік ені.

$U > 0$ тікелей қосу кезінде ауысудың ені кішірейеді. Өйткені ток көзінің электр өрісі әсерінен p - және n -аумақтағы негізгі заряд тасымалдаушылар аумақтар бөлігінің шекарасына қарай ығысады.

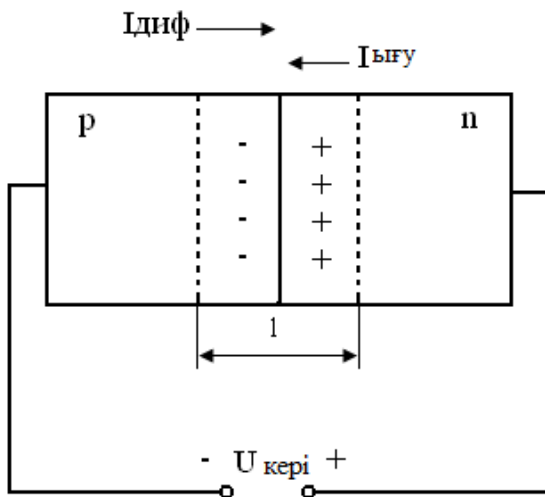
1.8.3. Кері қосу кезіндегі pn -өткелі

Кері қосу – бұл потенциалдық тосқауылдың ұлғаюына әкеп соғатын pn - өткелінің қосылысы.

Ол үшін ток көзінің «+» n -аумаққа қосып, ал «–» p -аумаққа қосады (1.15-сурет).

Потенциалдық тосқауыл биіктеген сайын диффузиялық ток азаяды, ал ығу тоғы өзгеріссіз қалады, өйткені ол электр өрісінің

кернеулігіне емес p - және n -өткелдердегі негізгі емес заряд тасымалдаушылардың концентрациясына тәуелді болады. Нәтижесінде pn -өткелде және сыртқы тізбекте *кері ток* деп аталатын, ығу және диффузиялық токтың айырымына тең болатын $I_{\text{кері}} = I_{\partial p} - I_{\text{диф}}$ шамалы ток өтеді.



1.15-сурет. pn -өткелінің кері қосылысы

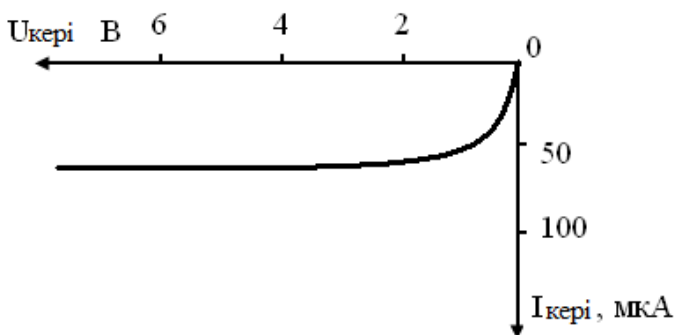
Потенциалдық тосқауыл биіктеген сайын диффузиялық ток азаяды, ал ығу тоғы өзгеріссіз қалады, өйткені ол электр өрісінің кернеулігіне емес p - және n - өткелдердегі негізгі емес заряд тасымалдаушылардың концентрациясына тәуелді болады. Нәтижесінде pn -өткелде және сыртқы тізбекте *кері ток* деп аталатын, ығу және диффузиялық токтың айырымына тең болатын $I_{\text{кері}} = I_{\text{ығу}} - I_{\text{диф}}$ шамалы ток өтеді.

Сыртқы кернеуді нөлден жоғарылатқанда диффузиялық ток күрт нөлге дейін түседі ($U_{\text{кері}}$ кезінде шамамен вольттің ондаған бөлігінде) және кері ток ығу (жылулық) тогына теңеледі, $I_{\text{кері}} = I_{\text{ж}}$.

Сонымен, pn -өткел арқылы жүретін кері ток – бұл бөлме температурасында болатын негізгі емес заряд

тасымалдаушылармен қалыптасатын ток, сондықтан $I_{кері}$ аз болады. Бөлме температурасында шамамен жүздеген миллиампер болатын тура токқа арналған жазықтықты германий pn -өткелдердегі (I_T) жылулық тогы ондаған микроамперді құрайды. Кремнийлі pn -өткелдерде, әртүрлі жағдайларда германийлі өткелдерден 6–7 есе аз болады. Соңғысы кремнийлі pn -өткелдердің жетістігі болып табылады.

Германийлі pn -өткелі кері қосылған кездегі вольт–амперлік сипаттамасы 1.16-суретте көрсетілген. Кремнийлі pn -өткелдің вольт–амперлік сипаттамасындағы бастапқы бөлігін осы масштабта көрсету мүмкін емес, өйткені кері $I_{кері}$ тогы өте аз (сипаттама кернеу осімен қосылады).



1.16-сурет. Кері қосылу кезіндегі германийлі pn -өткелінің вольт–амперлік сипаттамасы

Тура және кері токтардың келтірілген сипаттамаларына қарап, германийлі pn -өткелдегі тура ток кері токтан 3 есе көп екені белгілі (кремнийлі pn -өткеліндегі бұл айырмашылық одан да көп). Бұл дегеніміз электронды-кемтікті өткел *бір жақты өткізгіштік* қасиетіне ие болады, сол үшін ол айнымалы токтарды түзеу үшін кең түрде қолданылады.

pn -өткелді кері қосқан кезде берілген аймақтағы негізгі емес тасымалдаушылар pn -өткелінен ауыспалы аймаққа өтіп, ал қайтқан кезде потенциалдық тосқауыл биік болғандықтан, берілген аумақта негізгі емес заряд тасымалдаушылардың концентрациясы төмендеп, тепе-тең күйге түседі.

Кернеуді кері қосып, pn -өткелдегі негізгі емес тасымалдаушыларды аумаққа өткізу процессін *экстракция* деп атайды.

pn -өткелді кері қосқан кезде $U < 0$ және 1.12-суретке сәйкес өткелдің ені кеңейеді. Бұл электр көзінен пайда болған электр өрісі бөліктің шекарасына тиетін негізгі заряд тасымалдаушыларды p - және n -өткелдерге ауыстыратынын көрсетеді.

Біз симметриялы pn -өткелдегі кері және тура қосылу кезіндегі процестерді қарастырдық. Бірақ жартылай өткізгіштерде көбінесе симметриялы емес pn -өткелі қолданылады, ондағы p - және n -өткелдердің қоспаларының концентрациясы бір-бірінен айырықшаланады. Мұндай өткелдерді n -аймақтағы қоспа концентрациясы p -аймағынан жүз есеге дейін аз болуы мүмкін.

1.8.4. Симметриялы емес pn -өткелі

Симметриялы емес pn -өткеліндегі процестерді қарастырамыз. Біз білетіндей, pn -өткелі пайда болған кезде, диффузия нәтижесінде әр аумақта қоспалардағы атомдардың толықтырылмаған зарядтары қатысады. Және бұл кезде берілген аумақта олардың бір бөлігі негізгі заряд тасымалдаушылар өткелден аумаққа өткен соң қатысады, ал басқа бөлігі – өтпелі аумақтан негізге заряд тасымалдаушылар тудыратын негізгі емес заряд тасымалдаушылардың келуі салдарынан соңғы зарядтарды нейтралдайды.

Симметриялық pn -өткелде бұл бөліктер шамасы бірге тең, ал симметриялы емес pn -өткеліндегі қатынас басқаша. Егер n -аумақтағы донорлық қоспаның концентрациясы p -аумақтағы акцепторлық қоспаның концентрациясынан 2–3 есе кіші болса, онда концентрация градиенті, сәйкесінше p -аумақтың бағытындағы бос электрондар диффузиялық тоғы мен n -аумақтың бағытындағы кемтіктердің диффузиялық тоғынан аз болады. Сондықтан p -аумақтағы n -аумақтан келген

бос электрондар арқасында қатысқан акцепторлар зарядының саны, n -аумаққа диффузияланған кемтіктер арқасында қатысқан акцепторлар зарядының санынан әлдеқайда аз болады. n -аумақтағы p -аумаққа өткен диффузияланған электрондар арқасында донорлық зарядтар саны, p -аумақтан келген кемтіктер арқасында қатысқан донорлар санынан әлдеқайда көп болады.

Бірақ көрсетілген бөліктердің кезкелген қатынасында p -аумақтағы акцепторлық қоспаның қатысқан теріс зарядтарының ортақ саны n -аумақтағы донорлық қоспа зарядтары оң зарядтарының ортақ санына тең болады. Өйткені n -аумақтағы донорлық қоспа концентрациясы p -аумақтағы акцепторлық қоспа концентрациясынан төмен болады, донорлық қоспадағы толықтырылмаған оң зарядтар p -аумақта қатысқан акцепторлық қоспаның теріс зарядтарынан көп орын алады.

Қорытындылай келе, *симметриялы емес pn -өткел* үлкен кедергіге ие болатын аумаққа қарай жылжиды.

Симметриялы емес *pn -өткелде* сыртқы қорек көзі потенциалдық тосқауылды төмендеткен кезде қоспасы көп болатын аумақтан қоспасы аз болатын аумаққа қарай инжекцияланады.

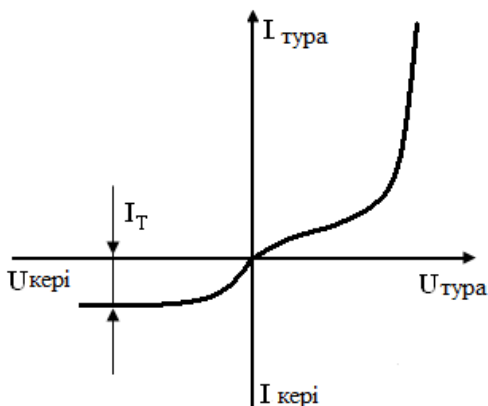
Сондықтан жартылай өткізгіштегі заряд тасымалдаушылар инжектелетін негізгі заряд тасымалдаушылар концентрациясы жоғары аумақты *эмиттер* деп атайды, ал заряд тасымалдаушылар инжектелетін қоспа концентрациясы аз аумақты *база* деп атайды. Қоспа концентрациясы аз аумақ база деп аталатын себебі, ол әр кезде жартылай өткізгіштегі, қоспа концентрациясы жоғары аумақ жасайтын шығыс пластинкасының бөлігі болып табылады. Қарастырылып отырған мысалда (1.17-сурет) p -аумақ *эмиттер*, ал n -аумақ *база* болып табылады.

1.8.5. *pn-өткелдің теориялық вольт-амперлік сипаттамасы*

pn-өткелі арқылы тұрақты және кері токтардың тәуелділігі берілген кернеумен, яғни *pn-өткелінің* вольт-амперлік сипаттамасы мына формуламен еспетелінеді:

$$I = I_{ж} \left[\exp \left(\frac{U}{\varphi_T} \right) - 1 \right], \quad (1.26)$$

мұндағы $I_{ж}$ – *pn-өткелінің* ауданымен бастапқы материал негізіндегі белгілі температурамен анықталатын жылулық ток; U – қойылатын кернеу (белгісін ескерген кезде). Оның тәуелділік графигі 1.17-суретте көрсетілген.



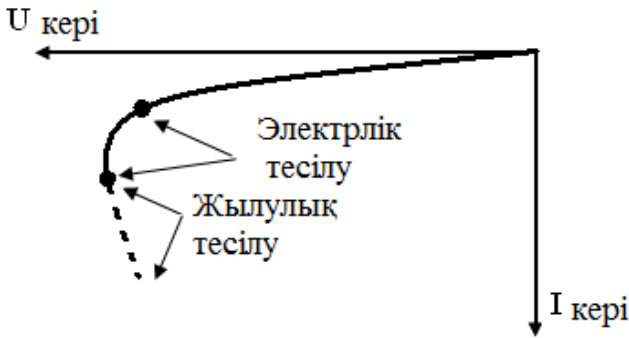
1.17-сурет. *pn-өткелінің* теориялық вольт-амперлік сипаттамасы

$I_{кері} = I_T$ теңдігі идеалды *pn-өткелге* сәйкес келеді, оның қалыңдығы өткелдегі заряд тасымалдаушылардың нәтижесінде болатын кері токтың құрамы ескермейтіндей аз болады.

Сонымен қатар *pn-өткелде* реалды орын алатын кері $I_{кері}$ токтың үшінші құрамы ескерілмейді.

1.8.6. *pn-өткеліндегі тесілудің пайда болуы*

Егер *pn-өткеліне* берілетін $U_{\text{кері}}$ кернеуді біртіндеп жоғарылатсақ, ол белгілі бір мәнге жеткен кезде өткел арқылы өтетін кері ток ауысуындағы кернеуді біраз көтерген кезде де жоғарылағанын байқауға болады (1.18-сурет). Сондай-ақ ол *pn-өткелдің* дифференциалдық өткізгіштігінің күрт өсуін көрсетеді.



1.18-сурет. *pn-өткелінің кері тармағы*

pn-өткелінің тесілуі – бұл берілген өткелде кері кернеу (ток) арқылы критикалық мәнге ие болатын дифференциалдық өткізгіштіктің күрт ұлғаю құбылысы.

Тесілудің *электрлік* және *жылулық* түрі болады.

Электрлік тесілу – қайталанатын құбылыс, $U_{\text{кері}}$ кернеуін алып тастағанда *pn-өткелдің* қасиеттері толық орнына келеді.

Жылулық тесілу – қайталанбайтын процесс, оның нәтижесінде кристалдық тор бұзылып, *pn-өткелі* істен шығады.

Электрлік тесілу өткелдің ішінде күшті электр өрісі әсерінен заряд тасымалдаушылардың ағынының көбеюінен пайда болатын *ағымды тесілу*, және туннельді эффект барысында пайда болатын *туннельді тесілу*.

Ағымды тесілудің негізі келесіден тұрады. Өткелдегі электрлік өрістің кернеулігі үлкен болған сайын, *p-аумақтан n-аумаққа* өтетін электрондардың жылдамдығы да артады.

Кері кернеудің мәнін тапқан кезде осы электрондар жартылай өткізгіштегі өткел ішіндегі орналасқан атомдарды иондауға жеткілікті энергияға ие болады. Атомдардан шыққан электрондар электр өрісі әсерінен қозғалған кезде басқа атомдармен соқтығысып оларды иондайды. Бұл процесс тізбекті реакция тәрізді ағымды түрде жүзеге асырылады, сондықтан өткелден өтетін кері ток күрт өседі. Өткелдегі кернеуді арттырған кезде, тек өткелдегі кері ток артады, ал ондағы кернеу мүлдем артпайды. Тізбектегі ток күшейген сайын ток көзінің ішкі кедергісіндегі кернеудің түсуі жоғарылайды. Сонымен, ток көзіндегі ЭҚК бұл режимде *pn*-өткелі мен ток көзінің ішкі кедергісінің арасында таралады. ЭҚК-ның біраз бөлігі *p*- және *n*-аумақтарына таралады.

Туннельді тесілуді қарастырайық. *Туннельді эффекттің* мағынасын түсіндіру үшін *pn*-өткелінің энергетикалық диаграммасын қолданамыз, оны біз өткізгіштің *p*- және *n*-аумақтарындағы валентті аймақтың «төбесі» мен «түбіне» сәйкес келетін энергетикалық аймақтарды көрсететіндей етіп қарапайым түрде көрсетеміз.

Кері кернеудің әсерінен потенциалдық тосқауыл көтеріледі және осыған қатысты аймақтардың энергетикалық диаграммалар қозғалысы өседі.

Кері кернеудің белгілі бір шамасында *p*-аумақтағы валентті аймақтың «төбесі» өткізгіштің *n*-аумақтың «түбінен» жоғары орналасқан, демек, *p*-аумақтағы валентті аймақтың үстіңгі жағы және өткізгіштің *n*-аумағында аймақтың төменгі бөлігі кабаттасады.

Осы кезде *p*-аумақтағы валентті электрондардың бір бөлігі *n*-аумақтың өткізгіш аймағы электрондармен толтырылған деңгейлерге тең энергетикалық деңгейлерде орналасады. Сол үшін өткізгіштік аймақта бос аймақтар болған жағдайда *p*-аумақтың жеке электрондары тыйым салынған аймаққа өтпей-ақ, сол энергетикалық деңгейде қала отырып, *n*-аумаққа ауысуы мүмкін.

Осы уақытта *n*-аумақтың *p*-аумақта бос энергетикалық деңгейі болған кезде, потенциалдық тосқауылды өтпей соңғы деңгейге өте алады («туннель» арқылы өткен тәрізді).

Электронлардың кезкелген бағытта ауысу ықтималдылығы бірдей, сол үшін туннельдітокнөлге тең болады. *n*-аумақта өткізгіштік аймақтағы сол аумақтағы бос электрондарға тола алатын энергетикалық деңгейлер саны шектеулі, өйткені *p*-аумақтағы электрондармен толтырылған валентті аймақтағы энергетикалық деңгейлердің саны үлкен. Сондықтан кері кернеуді жоғарылатқан кезде кері бағыттағыдан қарағанда *p*-аумақтан *n*-аумаққа өтетін электрондар саны көп болады.

Нәтижесінде, *pn*-өткелі арқылы кері туннельді ток жүреді, оның шамасы кері кернеу өскен сайын өседі. Энергетикалық диаграммада туннельді ток алты бірлікке тең болады.

pn-өткелден өтетін $I_{\text{кері}}$ кері ток есебінен қоршаған ортаға таралатын жылудан қарағанда уақыт бірлігінде көп жылу шығаратын жылулық баланстың бұзылуы салдарынан *жылулық тесілу* пайда болады. Осы кезде ауысудың температурасы жоғарылайды, ол жартылай өткізгіштегі *pn*-өткелдегі атомдарды қосымша иондалуына әкеп соғады, демек, $I_{\text{кері}}$ кері токтың одан әрі ұлғаюына және ауысудағы температураның жоғарылауына әкеледі. Бұл процеске шектеу қоймаса, кристалдық тор бұзылады және *pn*-өткелі істен шығады. Әлбетте жылулық тесілуден кейін электрлік тесілу пайда болады.

1.8.7. *pn*-өткелдің сыйымдылығы

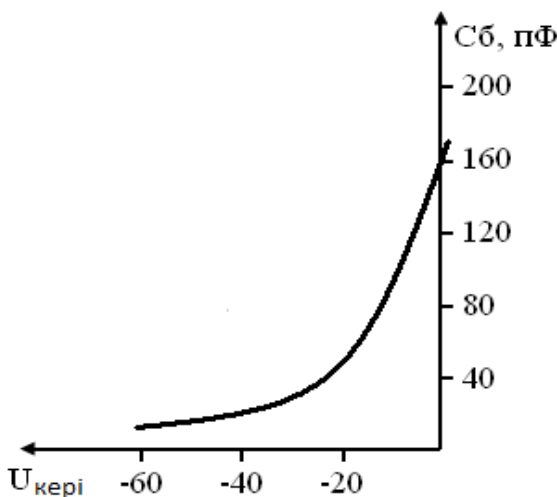
Электр өткізгіштігі жұқа қабатпен бөлінген *pn*-ауысудағы акцепторлық ($-q$) және донорлық ($+q$) қоспалардың атомдарының толықтырылмаған көлемдік зарядтары сыйымдылықты құрайды. Бұл сыйымдылықты тосқауылдық сыйымдылық немесе *pn*-өткелдің зарядты сыйымдылығы деп атау орынды. Тосқауылдық сыйымдылық *pn*-өткелге жабыстырылған кернеуге тәуелді болады. Кері кернеуді жоғарылатқанда *pn*-өткелдің ені үлкейіп, тосқауылдық сыйымдылық азаяды. Тура кернеуді жоғарылатқанда керісінше *pn*-өткелдің ені кішірейіп, тосқауылдық сыйымдылық жоғарылайды.

$N_a > N_d$ шартына сәйкес құймалы симметриялы емес *pn*-өткелдің тосқауылдық сыйымдылығы мына формуламен анықталады:

$$C_{\phi} = S \sqrt{\frac{0.5 \varepsilon_0 \varepsilon_q N_d}{U}}, \quad (1.27)$$

мұндағы S —ауысудың ауданы, см²; N_d — n -типті базадағы донорлық қоспаның концентрациясы; U — кері кернеу.

1.19-суретте pn -өткелдегі тосқауылдық сыйымдылықтың кернеуден тәуелділігі көрсетілген. Тосқауылдық сыйымдылық pn -өткелді жоғары жиіліктегі токты түзеу үшін қолдану қиынға түседі, өйткені оның кедергісі жоғары жиілікте төмендейді және ол pn -өткелдің кері кедергісін шунттайды: токтың кері жарты толқыны тосқауылдық сыйымдылық арқылы тұйықталып, түзету әсері жоғалады.



1.19-сурет. Тосқауылдық сыймдылықтың тәуелділігі

pn -өткелі бар жоғары жиіліктегі жартылай өткізгіштік құрылғыларда тосқауылдық сыйымдылық төмен болады. Сол кезде тосқауылдық сыйымдылықты пайдалану тиімді болып табылады. Тосқауылдық сыйымдылықтың кернеуден тәуелділігі pn -өткелді реттеуші электр сыйымдылығы тәрізді, кері қосу кезінде қолдануға мүмкіндік береді.

Тура кернеу кезінде симметриялы емес pn -өткеліндегі базаға мысалы кемтіктер сияқты негізгі заряд тасымалдаушылар инжектеледі. Осының нәтижесінде база оң зарядталады және оған жалғасқан сыртқы тізбектен сәйкес келетін бос электрондардың саны енеді.

Кемтіктер базада жылдам өндіріле алмайтындықтан көлемдік зарядтар қарсы тұрады: инжектелген кемтіктермен жасалған оң және базаға бос электрондармен түсетін теріс зарядтар.

Осының негізінде базада диффузиялық сыйымдылықтың бар екенін байқауға болады. Сыртқы кернеудің полярлығын ауыстырған кезде базаның негізгі емес заряд тасымалдаушылары экстракция нәтижесінде эмиттерге ауысады. Бірақ жоғары жиілікте бұл процесс сыртқы кернеудің кері толқыны өткен кезде аяқталмайды және базада негізгі емес тасымалдаушылар саны көбейеді.

Сонымен pn -өткелі анық бір инерцияға ие, осының нәтижесінде pn -өткелінің қалыпты жұмысы бұзылады. Осының салдарынан диффузиялық сыйымдылықтың pn -өткелі жұмысына кері әсері байқалады. Айтылған құбылысты болдырмау мақсатында арнайы шаралар қолданылады, олар төменде айтылған.

1.9. Металл-жартылай өткізгіш өткелі

Металл мен жартылай өткізгіш арасындағы электрлік ауысуларды металл-жартылай өткізгіш контактілері деп атау қабылданған. Металл-жартылай өткізгіш контактілерінің қасиеттері жартылай өткізгіштің электр өтімділігі типімен және металдан шығатын A_m және жартылай өткізгіштің A_n жұмыстарының қатынастарымен анықталады. Металдың n -типті жартылай өткізгішпен жасалатын контактісін $A_m > A_n$ қатынасы кезінде қарастырамыз.

Металдың бос электронға ие болатыны белгілі, сол үшін металл атомдары оң зарядталған иондар болып табылады. Бос электрондардың теріс зарядтары атомдардың оң зарядтарымен толықтырылады, сол үшін де металл тұтастай электр жағынан нейтралды болады.

n-типті жартылай өткізгіш сол сияқты көп бос электрондарға ие, олардың зарядтары донорлық қоспа атомдардың оң зарядтарын толықтырады. Электрон металдан (жартылай өткізгіштен) босап шығып, одан алыстап кетуі үшін, оған жылулық сияқты қосымша энергия қажет.

Шығу жұмысы (А) – бұл бос электрон мен кристалдық тор атомдарының арасындағы тартылыс күшін жеңуге арналған және оны металдан (жартылай өткізгіштен) металл бетінің данындағы вакуумға ауыстыру үшін қажетті жұмыс.

Металл-жартылай өткізгіш контактісін болдыру барысында бөлімінің жанында орналасқан бос электрондарға металдың кристалдық торындағы атомдардан келетін тартылыс күштері де, жартылай өткізгіштегі донорлық қоспа атомдарынан да келетін күштер де әсер етеді. Шығыс жұмысы үлкен болатын ортада тартылыс басым болады.

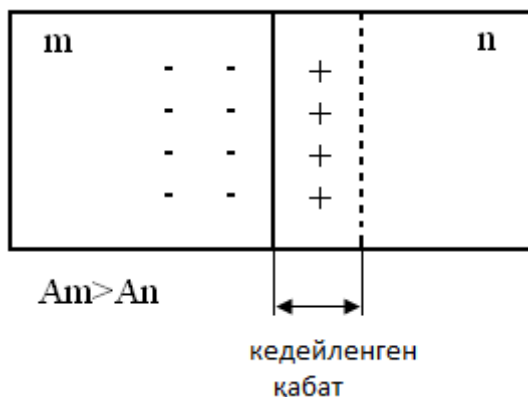
Біздің жағдайда бос электрондар жартылай өткізгіштен металға оны теріс зарядтап, ауыса бастайды. Жартылай өткізгіште бөлімнің шекарасы маңында донорлық қоспа атомдарының толықтырылмаған оң зарядтары қатысады (1.20-сурет).

Осы кезде электрондардың жартылай өткізгіштен металға өтуіне кедергі болатын потенциалдық тосқауыл пайда болады.

Контактіде *pn*-өткеліндегідей динамикалық тепе-теңдік орнайды, осы кезде электр өрісі жағынан электронға әсер ететін күш металл атомдары жағынан электронды тарту күшінің шамасына тең болады. Электронның металға өтуінің нәтижесінде жартылай өткізгіште негізгі заряд тасымалдаушылары – электронды аз қабат пайда болады.

Бұл қабаттың *pn*-өткелден айырмашылығы – ол жоғары меншікті кедергіге ие және ол бүкіл контактінің кедергісін анықтайды, сол үшін оны *жапқыш* қабаты деп атайды

Егер металға «–», ал жартылай өткізгішке «+» зарядын тигізсе, онда сыртқы ток көзіндегі электр өрісі әсерінен пайда болатын жартылай өткізгіштегі бос электрондар контактідегі аумақтан жартылай өткізгіштің түбіне қарай ығысады. Тұйықтайтын қабаттың ені кеңейіп, контактінің кедергісі ұлғаяды. Бұл кері қосылу.



1.20-сурет. Металл-жартылай өткізгіш контактісінің құрылымдық жүйесі

Егер сыртқы кернеудің полярлығын өзгертсек, онда тұйықталатын қабаттың ені үлкейіп, оның бастапқы мәнімен салыстырғанда кедергісі азая түседі, бұл контактінің тура қосылуына сәйкес келеді.

Металл-жартылай өткізгіш контактісін неміс ғалымы В. Шоттки зерттеді. Негізінен ол 1938 ж. контактілі аумақта потенциалдық тосқауылды байқаған, сондықтан тұйықталатын қабаты бар металл-жартылай өткізгіш контактісін Шоттки тосқауылы деп атайды.

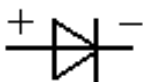
Түзетуші контактілерде инжекция құбыластары мен негізгі емес заряд тасымалдаушылардың топтасуы байқалмайтындықтан олардағы инерттілік өте аз болады (ауысудың тек қана тосқауылдық сыйымдылығымен шартталады). Осының арқасында металл-жартылай өткізгіш контактілері тек қана жоғары жиілікте қолданыла алады. *pn*-өткелмен салыстырғанда олардың артықшылығы осында.

2. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТІ ДИОДТАР

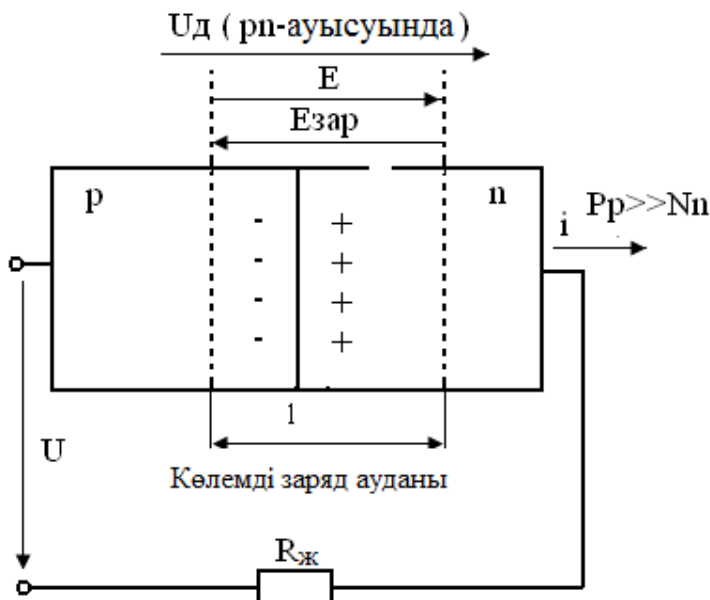
2.1. Жартылай өткізгішті диодтың құрылымы

Жартылай өткізгішті диод – бұл бір түзетуші электрлік ауысуы бар және электронды-кемтікті ауысудың қасиеті қолданылатын екі шығысы бар жартылай өткізгішті құрал.

Жартылай өткізгішті диодтың графикалық белгіленуі:



Электронды-кемтікті ауысу диодтарда көбінесе электрлік ауысуды түзетуші ретінде р- және n-аумақтарды бөлетін жартылай өткізгіштің кристалы қолданылады (2.1-сурет).



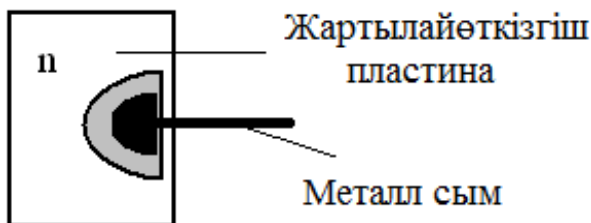
2.1-сурет. Жартылай өткізгішті диодтың қосылу жүйесі және сыртқы кернеу болмаған жағдайдағы pn -өткелінің көлемді зарядтарын тарату

Кристалдың p және n -аумақтарына металдық шығыстар күйдіріліп жалғастырылады және бүкіл жүйе металл, металлокерамикалық, шыны немесе пластмассалы корпусқа енгізіледі.

Кристалдағы жартылай өткізгіш аумақтардың жоғары қоспалы концентрациясы бар, негізгі заряд тасымалдаушылары көп аумақты *эмиттер* деп атайды. Қоспа концентрациясы аз басқа аумақты *база* деп атайды. Негізгі заряд тасымалдаушылары P_p кемтіктері болатын p -аумақ эмиттер болса, онда n -аумақ – база болып саналады (ондағы негізгі заряд тасымалдаушылар нейтрондар N_n болып табылады), бұдан кейін $P_p \gg N_n$ шарты орындалады.

Тәжірибеде нүктелік, жазықтықты (құймалы) және диффузиялық диодтар кең түрде қолданылады.

Нүктелік диод жартылай өткізгіштің кішігірім пластинасы орнында және металл проволокасы – серіппенің ұшында пайда болады (2.2-сурет). Сол үшін ауысудың сызықтық өлшемдері оның енінен кіші болады.



2.2-сурет. Нүктелік диодтың құрылысы

Диодтың ауданы аз болғандықтан ол ауысудың аз сыйымдылығына ие болады және ол жүз МГц-ке жуық жиілікке дейін қолданылады. Ауысудың кіші ауданы диодтың тоғын анықтайды. Нүктелік диодтарды көбінесе германий негізінде жасайды.

Жазықтықты (құймалы) диодтың жазық электрлік ауысуы болады, олардың ауданын анықтауға арналған сызықтық өлшемдері p -өткелдің енінен әлде қайда жоғары болады.

Мұндай диодтардағы өткел жартылай өткізгіш пластинаны металмен еріту әдісімен орындалуы мүмкін. Шығыстағы жартылай өткізгіштің пластинасына құрамында донорлық немесе акцепторлық қоспалары бар металл немесе балқытылған зат қояды. Содан кейін осы металды жартылай өткізгіштің бір бөлігі алынған балқытылған затта еритіндей температураға дейін қыздырады. Суыту процессінен кейін шығыстағы жартылай өткізгіш пен балқытылған металл қоспасы арасында рекристалдау процесі жүреді және pn -өткелі пайда болады.

Диффузиялық диодтарды газ, сұйық немесе қатты түрдегі қоспаларды жартылай өткізгіш пластинасына диффузиялау арқылы жасайды. Егер қоспаның диффузиясы жартылай өткізгіш бетіндегі қорғаныс қабатының тесіктері арқылы жүрсе, онда планарлы pn -өткелін аламыз.

Диффузионды диодтардың құймалы диодтардан айырмашылығы олардың өзіндік сыйымдылығы және уақыт тұрақтысы мәнінің аздығымен ерекшеленеді.

2.2. Сыртқы кернеу болмаған жағдайда жартылай өткізгішті диодтың жұмыс істеу принципі

p -аумақтан n -аумаққа өтетін кемтіктер және n -аумақтан p -аумаққа өтетін электрондармен негізделетін қарама-қарсы диффузия нәтижесінде қоспадағы қозғалысыз күйде болатын иондардың зарядтары толықтырылмайды (p -аумақ үшін акцепторлық; n -аумақ үшін донорлық).

pn -құрылымның электрлік нейтралдығын сақтау үшін pn -өткелі арқылы p -аумақтан n -аумаққа диффузияланған негізгі заряд тасымалдаушылар саны n -аумақтан p -аумаққа диффузияланған негізгі заряд тасымалдаушылар санына теңелуі қажет. $N_n \gg P_p$ шарты орындалатындықтан көлемдік зарядтар аумағы база (n) жақтан (p) эмиттерге қарағанда көп болады.

Қарама-қарсы диффузия нәтижесінде пайда болған көлемдік заряд негізгі заряд тасымалдаушыларды қарама-қарсы диффузияға кедергі жасайтын $E_{зар}$ кернеулігі бар электр өрісін пайда болдырады.

Сонымен pn -өткелі шекарасында контактілердің потенциалдық айырымы пайда болады, сандық мәнінде ол

потенциалдық тосқауыл биіктігімен $\Delta\phi_0$ сипатталады. Потенциалдық тосқауылды өту үшін заряд тасымалдаушылардың энергиясы жетпеген кезде диффузия токталады.

2.2.1. Тұрақты кернеу кезіндегі жартылай өткізгішті диодтың жұмыс істеу принципі

Тұрақты кернеу U , $E_{\text{зар}}$ өрісін толықтыратын E электр өрісін пайда болдырады және осы кезде базаның (n) аумағына кернеу ұлғайған сайын $I_{\text{пр}}$ диодтың тогын болдыратын (2.1-сурет) кемтіктер (n -аумақтағы негізгі емес тасымалдаушылар) көбірек енгізіледі. p -аумаққа қарама-қарсы (эмиттерге) N_n (n -аумақтағы n электрондарды) инжекциясын, $P_p \gg N_n$ шартын қолдана отырып ескермеуге болады.

2.2.2. Кері кернеу кезіндегі жартылай өткізгішті диодтың жұмыс істеу принципі

Кернеуден пайда болған E -электр өрісі $E_{\text{зар}}$ бағытымен сәйкес келеді, ол потенциалдық тосқауылдың биіктеуіне әсер етіп, негізгі заряд тасымалдаушылардың көрші аумақа өтуіне кедергі болады (2.1-сурет). Электр өрістердің қосынды кернеуі негізгі емес заряд тасымалдаушылардың алынып тасталуына (экстракциясына) әсер етеді: электрондарды p -аумақтан n -аумаққа және $I_{\text{кері}}$ тогын болдыратын кемтіктерді n -аумақтан p -аумаққа қарай өткізеді.

Негізгі емес заряд тасымалдаушылар тосқауылдық сыйымдылықты немесе температураны жоғарылатқанда $I_{\text{ж}}(T)$ жылулық тогы деп аталатын $I_{\text{кері}}$ тогын болдырады:

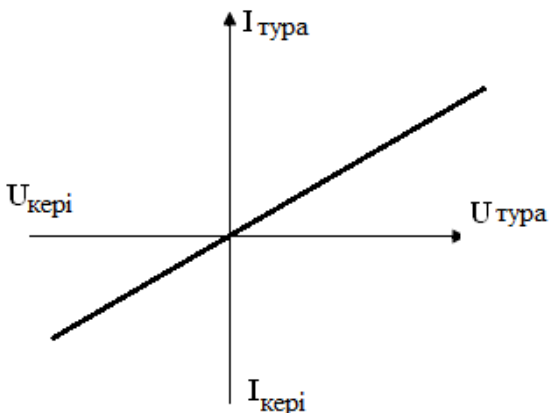
$$I_{\text{ж}}(T) = 2I_o \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad (2.1)$$

мұндағы I_o – бөлме температурасындағы $T_0 = 300$ К жылулық токтың мәні.

2.3. Жартылай өткізгіштердің вольт-амперлік сипаттамасы

Кез келген электр құралы үшін құрал арқылы өтетін ток пен кернеу арасындағы тәуелділік маңызды болып табылады. Осындай тәуелділікті біле отырып, берілген кернеуде токты анықтауға болады немесе керісінше. Құралдың R кедергісі тұрақты болып, ток немесе кернеуге тәуелді болмаса, онда ток пен кернеу арасындағы байланыс Ом заңына бағынады, $I = \frac{U}{R}$ болады.

Берілген кернеудің вольт-амперлік сипаттамасы (ВАС) – бұл ток пен кернеу арасындағы тәуелділік графигі. Ом заңына бағынатын құрылғы үшін ВАС түрі 2.3-суретте көрсетілген. Ондай құралдар *сызықтық* деп аталады.



2.3-сурет. Жартылай өткізгішті құрылғының сызықты ВАС-сы

R кедергісі тұрақты емес құрылғылар болады, ал ВАС координат басынан өтетін түзу сызық болып табылмайды. Мұндай құрылғылар *сызықты емес* деп аталады.

ЭДП жартылай өткізгішті диод болып табылады. Диодтың сызықтық емес қасиеттері оның ВАС-нан көрінеді. Диодтың ВАС-сы төмендегідей формуламен шешіледі:

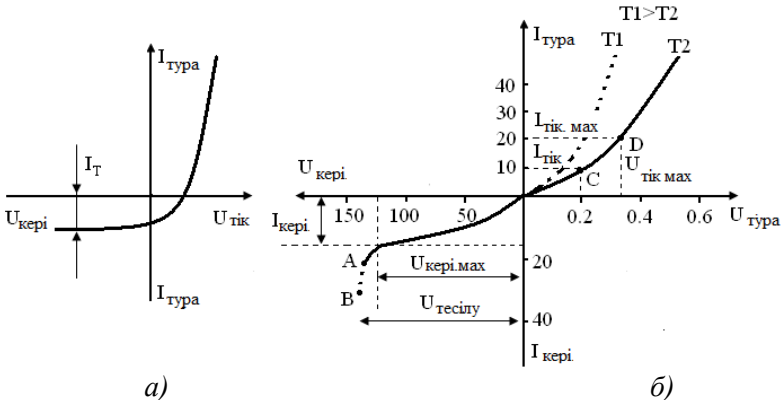
$$I = I_o [\exp \left(\frac{U_D}{\varphi_T} \right) - 1], \quad (2.2)$$

мұндағы I_o – қанығу тогы; U_D – pn -өткелдегі кернеу; φ_T – pn -өткелі шекарасындағы, $U_{\text{сыртқы}}$ болмаған жағдайдағы ($T = 300 \text{ К}$ $\Delta\varphi_T = 0,025 \text{ В}$ болған кездегі) потенциалдардың контактілі айырымына тең жылулық потенциал.

$$\Delta\varphi_T = \frac{kT}{q}, \quad (2.3)$$

мұндағы $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ – Больцман тұрақтысы; T – абсолюттік температура; $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – электрон заряды.

Бұл айналыммен сипатталатын ВАС, 2.4, б-суретте көрсетілген. Pn -өткелдегі $U_{\text{мура}}$ кернеуді көбейткен сайын диодтың $I_{\text{мура}}$ -ғы күрт өседі. Сондықтан $U_{\text{мура}}$ кернеудің болымсыз өзгерістері $I_{\text{мура}}$ мәнін айтарлықтай өзгертеді, бұл $U_{\text{мура}}$ кернеу арқылы түзілетін $I_{\text{мура}}$ -ның қажетті мәнін алуды қиындатады. Сондықтан pn -өткелі үшін берілген $I_{\text{мура}}$ мәні сәйкес келеді.



2.4-сурет. а) идеалды pn -өткелдің;
б) реалды диодтың статистикалық вольт-амперлік сипаттамасы

Бұл айналыммен сипатталатын ВАС, 2.4, б-суретте көрсетілген. pn -ауысудағы $U_{мура}$ кернеуді көбейткен сайын диодтың $I_{мура}$ -ғы күрт өседі. Сондықтан $U_{мура}$ кернеудің болымсыз өзгерістері $I_{мура}$ мәнін айтарлықтай өзгертеді, бұл $U_{мура}$ кернеу арқылы түзілетін $I_{мура}$ -ның қажетті мәнін алуды қиындатады. Сол үшін pn -ауысу үшін берілген $I_{мура}$ мәні сәйкес келеді.

Келтірілген ВАС (2.4, а-сурет) pn -өткелдің идеалды ВАС-сы болып саналады. Ол pn -өткелдің көлемі мен бетінде болатын рекомбинациялы-генерациялы процестерді ескермейді, ол pn -өткелінің ішкіке үздіксіз ұзындықта деген қағидаға сәйкес салынған.

Реалды өткел жіңішке болып табылмайды сол үшін $U_{кері}$ кернеу кезінде $I_{ген}$ генерациялық тогын болдыратын электрондық-кемтікті жұбы пайда болады. Осы кезде $U_{кері}$ кернеуін көбейткен сайын pn -өткелдің қалыңдығы да артады (Эрли эффектiсі немесе база қалыңдығының модуляциясы) және осыған сәйкес өндірілетін жұптардың саны көбейеді. Сондықтан $U_{кері}$ кернеуін өсіргенде сол мезгілде $I_{кері}$ тогы да көбейеді (2.4, б-сурет).

Жартылай өткізгішті кристалдың беті кристалдық тордың бұзылуы мен әртүрлі ластанулармен сипатталады, ол pn -өткелінің бетіндегі рекомбинациялық-генерациялау процестері қосымша – ағып кететін $I_{ағу}$ токтың пайда болуына әсер етеді.

Реалды өткелдің кері $I_{кері}$ тогы мынаған тең:

$$I_{кері} = I_T + I_{ген} + I_{ағу}.$$

Токтардың қатынасты бөлігі $I_{ген}$ және $I_{ағу}$, сонымен қатар $I_{кері}$ былай болады:

- германий үшін $I_{ген}/I_{ағу} \ll 1$; кремний үшін $I_{ген}/I_{ағу} \approx 1000$;
- германий үшін $I_T = I_{ген} + I_{ағу}$; кремний үшін $I_T > I_{ген} + I_{ағу}$.

Айтылғандарға сәйкес германийлі диодтар үшін $I_{\text{кері}} \approx I_0$ деп санауға болады, кері ток жылулық ток болып табылады, сол үшін температураның үлкен өзгерістеріне ие болмайды және кремнийлі диодтардың кері токтары мәндерін бірнеше есе жоғарылатады. Кремнийлі диодтар үшін $I_{\text{кері}} = I_{\text{ген}} + I_{\text{ағу}}$.

Реалды диодтың ВАС-сы 2.4, б-суретте (T_2) көрсетілген. Белгілі бір уақытта $U_{\text{кері}}$ кернеуі $U_{\text{тесілу}}$ мәніне сәйкес келеді, ол *pn-өткелдің электрлік тесілуін* болдырады (АВ кесіндісі). Егер осы кезде $U_{\text{кері}}$ кернеуіне шек қойылмаса, онда электрлік тесілу жылулыққа айналады (В белгісінен кейінгі ВАС бөлігі). $I_{\text{кері}}$ тогының осындай көтерілу процесі кремнийлі диодтарға тән.

Электрлік тесілу қайтымды, ол $U_{\text{кері}}$ кернеуі азайған соң диодтың жұмысы ВАС-тың қайтымды тармағының пологты бөлігіне сәйкес келеді. Жылулық тесілу – қайтымсыз процесс, өйткені ол жартылай өткізгіштің кристалдық торын бұзады.

Жылулық тесілу *pn-ауысудағы тасымалдаушылар санының* өсуімен жүзеге асырылады. $U_{\text{тесілу}}$ кернеуінің бір мәнінде диодта пайда болатын қуат $P_D = U_{\text{кері}} \cdot I_{\text{кері}}$ диодында ауысып үлгермейді, сол үшін ондағы температура мен $I_{\text{кері}}$ ток көбееді, нәтижесінде қызып кету салдарынан диод бұзылады. Германийлі диодтар үшін кремнийлі диодтарға қарағанда $I_{\text{кері}}$ тогы көбірек болады, жылулық тесілудің ықтималдылығы жоғары болады. Сондықтан айналадағы және *pn-ауысудағы* максималды жұмыс температурасы кремнийлі диодтар үшін германийлі диодтармен салыстырғанда жоғары болады (кремнийлі – 75–90С; германийлі – 150–200С).

Диодтың $I_{\text{тур}}$ тура тогы айналадағы температураның жоғарылауына тәуелді болады, $I_{\text{кері}}$ ток мәнінен айтарлықтай аз дәрежеде болады. Температурасының өзгеруі кезіндегі ВАС-тың түзу тармағының өзгеру сипаты 2.4, б-суретте (T_1). $T_1 > T_2$, мұндағы $T_2 \approx 300$ К (бөлме температурасында).

Диодтың ВАС түзу тармағының температуралық тәуелділігін анықтау мақсатында кернеудің температуралық коэффициенті қолданылады (КТК):

$$КТК = \frac{\Delta U}{U \Delta T}, \quad (2.4)$$

2.4. Диодтың негізгі параметрлері

Жартылай өткізгішті құрылғының қасиетін немесе жұмыс режимін (электрлік, механикалық, климаттық) сипаттайтын шама *параметр* болып табылады.

Негізгі болып табылатын электрлік параметрлердің бір бөлігіне дайындаушы мекеме кепілдік береді. Қалған электр параметрлерін анықтамалық деп атайды. Анықтамада көрсетілетін параметрлерді жұмыстың номиналды режиміндегі параметрлер және жұмыстың шектеулі режиміндегі параметрлер деп атайды.

Жартылай өткізгішті құрылғылар, сонымен қатар электродтарға тұрақты және айнымалы ток көздеріне қосуға болады. Электронды құрылғылардың жұмыс істеу принциптері айнымалы кернеудің жиілігіне тәуелді болады.

Жартылай өткізгішті құрылғылардың жұмысы үш режимге бөлінеді: статистикалық, квазистатистикалық және динамикалық болып.

Егер электродтағы кернеу тұрақты болса, онда режимді *статикалық* деп атайды. Осы режимде барлық параметрлер өзгеріссіз қалады.

Егер параметрлер жұмыс режимінің кезкелген уақытында статикалық режимнен айырмашылығы болатындай және жартылай өткізгіш құрылғысы үшін статикалық режим (дәлдікте анықталған дәрежеде) заңдары қолданылатындай баяу жұмыс істесе, онда мұндай режимді *квазистатистикалық* деп атайды.

Параметрлердің тым болмаса біреуі уақытқа сәйкес өзгертін болса, ондай режимді *динамикалық* деп атайды.

Диодтардың қасиеттері мен олардың бір-бірінің жұмысын атқару қасиеттері олардың параметрлері бойынша анықталады. Негізгі параметрлерге ВАС-пен байланысты токтар мен кернеулер жатады (2.4-сурет).

Диодтарды айнымалы және тұрақты ток тізбектерінде қолданады. Сондықтан диодтар қасиетін бағалау үшін тұрақты ток көзіндегі параметрлермен қоса, диод арқылы өтетін айнымалы ток жұмысын сипаттайтын *дифференциалдық параметрлер* қолданылады, осы кезде ұзақ уақытта сенімді

жұмыс істеуге болады. Осы токтың күші қызу немесе P_{max} максималды қуатпен шектеледі. $I_{тура}$ тогын көбейту жылулық тесілу және диодтың бұзылуына әкеп соғады.

Түзетуші диодтың негізгі параметрлерін атап өтейік.

Орташа түзелілген (тура) ток $I_{орт\ түз}$ – рұқсат етілген қызудағы диод арқылы ұзақ уақыт бойы өтетін, түзелген токтың орташа мәні (жүздеген миллиампер – ондаған ампер).

Орташа тура кернеу $U_{орт\ түз}$ – орташа түзелген ток кезінде анықталатын тура кернеудің түсуінің орташа мәні.

Рұқсат етілетін кері кернеу $U_{кері}$ – диодты ұзақ уақыт бойы сенімді жұмыс атқаратын уақыттың максималды мәні. $U_{кері}$ кернеуінің жоғарылауы диодтың тесіліп істен шығуына әкеп соғады. Температураны жоғарылатқан кезде $U_{кері}$ кернеу мен $I_{кері}$ ток мәндері азаяды.

Кері ток $I_{кері}$ – рұқсат етілген $U_{кері}$ кернеуі кезіндегі кері кернеудің орташа мәні (белгілі бір уақытта). $I_{кері}$ ток азайған сайын диодтың түзету қасиеттері жақсарады.

Максималды тұрақты немесе орташа (белгілі бір уақыттағы) қуат P_{max} – диод өз параметрлерін өзгертпей ұзақ уақыт бойы жұмыс істейтіндей диодпен таралатын қуат.

Өткелдің максималды температурасы $T_{өткел\ max}$ – жартылай өткізгіштің материалы (тыйым салынған аймақтың ені) мен оның легирлеу дәрежесіне тәуелді болады. Германий үшін ол 80–110 С, ал кремний үшін – 150–220 С-ты құрайды.

Түзетуші режимдерінің есебі кезінде келесі параметрлер қолданылады:

1. Айнымалы токтағы дифференциалдық кедергі:

$$r_{диф} = \Delta U / \Delta I \text{ немесе } r_{диф} = \partial U / \partial I - \text{тура ток аумақтарында.}$$

2. Тұрақты токтағы статикалық кедергі:

$$r_{тура\ д} = \frac{U_{тура}}{I_{тура}}; r_{тура\ д} > r_{диф.тура} - \text{тура ток аймақтарында.}$$

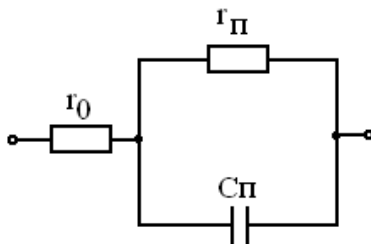
$$r_{кері\ д} = \frac{U_{кері}}{I_{кері}}; r_{кері\ д} > r_{диф.кері} - \text{айнымалы ток аумақтарында.}$$

3. Диод сыйымдылықтары:

$$C_d = C_{бар} + C_{диф} + C_{аспап\ корпусы}$$

2.5. Төменгі жиіліктегі диодтардың эквивалентті жүйесі

Төменгі жиіліктегі диодтардың эквивалентті жүйесі 2.5-суретте көрсетілген



2.5-сурет. Диодтың эквиваленттік жүйесі

мұндағы r_0 — p —және n —аумақтарындағы кедергілердің қосыдысы; r_{Π} — pn —өткелінің кедергісі (бекіткен кернеудің полярлігі мен мәніне тәуелді болады); C_{Π} — өткел сыйымдылығы.

Жартылай өткізгішті диодтардың классификациясы.

1. Өткелдің ауданы бойынша:

— жазықтықтық және нүктелік болып бөлінеді;

2. Қолданылатын материалдар бойынша:

— германийлі;

— кремнийлі;

— арсенид-галийлі.

3. Қолданысы бойынша:

— түзеткіш;

— импульсті;

— стабилитрон (стабистор);

— варикап;

— жоғары жиілікті, т.б.

4. Әсер ету принципі бойынша:

— ағымды-ауытқыма;

— туннельді;

— Шоттки диоды;

— сәуле шығарушы;

— фотодиод;

— Ганн диоды.

2.6. Жартылай өткізгіш диодтардың түрлері

2.6.1. Түзеткіш диодтар

Түзетуші диодтар айнымалы токтарды түзеу үшін қолданылады. Германий мен кремнийді материал ретінде қолданады. Түзетуші диод оған берілетін кернеумен басқарылатын электронды кілт тәрізді болады. $U_{тура}$ қосқанда кілт тұйықталады, $U_{кері}$ қосқан кезде кілт тұйықталмайды.

Тура кернеу $U_{тура}$ кернеуі тусуінің есебінен пайда боған кезде ашық диодта жүктеме құрылғыдан түсетін түзетуші кернеу кірістегі кернеуден төмен болады. Керенудің түсуі Ом заңына сәйкес, тура бағытта диод кедергісіне өтетін ток күшінің туындысынан табылады:

Ашық диодтағы $U_{тура}$ кернеуінің мәні:

- германий диодтары үшін 0,5 В аспайды;
- кремний диодтары үшін 1,5 В аспайды.

Түзетуші диодтарды қуат пен жиілік бойынша келесі түрге бөлінеді:

Қуаты бойынша:

- аз қуатты: $I_{тура\text{ орт.мах}} < 0,3\text{ A}$;
- орташа қуатты: $0,3\text{ A} < 0,3A < I_{тура\text{ орт.мах}} < 10\text{ A}$;
- жоғары қуатты: $I_{тура\text{ орт.мах}} > 10\text{ A}$.

Жиілік бойынша:

- төменгі жиілікті: $f_{max} < 10^3\text{ Гц}$;
- жоғары жиілікті: $f_{max} > 10^3\text{ Гц}$.

2.6.2. Шоттки диодтары

Түзетуші диодтар болып металл-өткізгіште орындалатын түзеуші диодтар қолданылады.

Шоттки диодтарында электрондық-кемтікті ауысуға жататын негізгі емес заряд тасымалдаушыларда жүрегін жиналу және сіңіп кету процестері жүрмейді. Сондықтан Шоттки диодтары басқа диодтарға карағанда жылдам әсер ету қасиетіне ие.

Шоттки диодтарының артықшылығы төменгі кернеуді түзеткен кезде ерекше бйқалады. Түзеткіште Шоттки диодын пайдалану жоғалтуды 10–15 %-ға азайтуға мүмкіндік береді (жылдам әсер ету есебінен). Шоттки диодының жұмыс кезіндегі жиілігі $f_{\max}$ 30 А токта, 200 кГц болады.

Шоттки диодтары келесі параметрлер бойынша сипатталады.

$I_{\text{орт.кері}}$ – қайтымды токтың орташа мәні (немесе $I_{\text{кері}}$ – бекітілген кері кернеудегі кері тұрақты ток);

$U_{\text{тура орт}}$ – бекітілген тура токтағы тура кернеудің белгілі бір уақыттағы орташа мәні (немес $U_{\text{тура}}$ – бекітілген тұрақты ток кезіндегі тұрақты тура кернеу;

$U_{\text{кері.мах}}$ – рұқсат етілетін максималды қайтымды кернеу (амплитудалық мәні);

$U_{\text{орт.кері}}$ – токтың максималды рұқсат етілетін орташа мәні (немесе $I_{\text{түзелген орт.мах}}$ – түзетілген рұқсат етілетін максималды орташа мәні) – белгілі бір уақыттағы активті жүктелген бір жартылы периодты түзеткіштен өтетін токтың орташа мәні.

2.6.3. Жоғары жиілікті диодтар

Жоғары жиіліктегі диод (ЖЖД) 1000 МГц жиілікте жұмыс істеуге арналған. Мұндай жиіліктегі ауысудың кіші тосқауылдық сыйымдылықтағы диодтары ғана жұмыс істей алады (1–2 пФ). Сондықтан жоғары жиіліктегі диодтар ретінде көбінесе нүктелік диодтар қолданылады. 10 МГц жиілікте микроеріткіш диодтар қолданылады. Жоғары жиіліктегі диодтар жиіліктің кең диапазонында, яғни, төменгі жиілікте жұмыс істей алатындықтан оларды универсалды деп атайды.

Жоғары жиіліктегі диодтар жиілікті ауыстырушыларды және басқа сызықтық емес құрылғыларды қолданатындықтан, олардың маңызды параметрі болып тура дифференциалдық кедергі немесе айнаымалы токқа түсетін кедергі болып табылады:

$$r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{тура}}}{\Delta I_{\text{тура}}}.$$

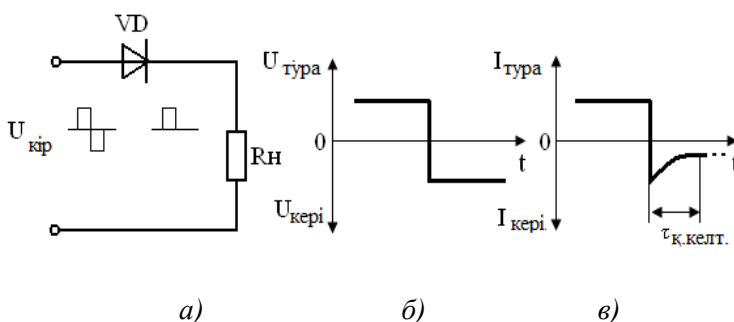
Жоғары жиіліктегі диодтардың ерекшеліктері:

- жоғары жиіліктегі диодтар 1000 МГц жиіліктегі токтарды түзеу (детектрлеу) үшін арналған;
- мұндай жиілікте жұмыс істейтін диодтар тек қана сыйымдылықтың аз шамасында қалыпты жұмыс істей алады. Сондықтан да жоғары жиілікті диодтарда нүктелік немесе микроқұймалы pn-ауысуларды орнатады;
- жоғары жиіліктегі диодтарда түзетілген токтың рұқсат етілген максималды мәні ондаған миллиамперден аспайды, ал рұқсат етілетін кернеудің максималды кернеуі он вольтқа жетеді.

2.6.4. Импульсті диодтар

Импульсті диод – бұл импульсті режимдегі жұмысқа арналған ауыспалы процестердің аз шамасындағы уақытта қолданылатын диодтар.

Импульсті диодтар әртүрлі электронды жүйелерде электронды кілт ретінде жұмыс атқарады (2.6, а-сурет). Жүктеме тізбектелген диодқа кернеу беріледі. Оң импульс кезінде диодта тура кернеу болады, осыған орай оның кедергісі аз (кілт тұйықталған), R_n резистор арқылы ток өтеді. Теріс импульс кезінде диодқа кері кернеу түседі, оның кедергісі үлкен, (кілт тұйықталмаған), жүктемеде ток болмайды.



2.6-сурет. Диодты кілттің қарапайым жүйесі және ондағы жұмыстардың уақытша диаграммалары

Импульсті диодтарда $\tau_{к,келт}$ азайту бірнеше әдіспен жасалынады:

1. Базадағы өндіру процесін жылдамдату арқылы (базаға аз мөлшердегі алтын қоспасын енгізу арқылы).

2. Диодтың сыйымдылығын азайту арқылы (микроқұйылмалы ауысуларды қолдану арқылы). Диодтағы ауыспалы процесі диодта және оны $U_{кері}$ -дан $U_{тура}$ кернеуіне қосқан кезде пайда болады.

Импульсті диодтардың жалпы параметрлері:

$U_{тура}$ – белгілі бір тұрақты токтағы диодтың тура кернеуі;

$I_{түзелген.мах}$ – рұқсат етілген максималды түзетуші ток;

$I_{кері\ max}$ – рұқсат етілген максималды кері бағыттағы ток;

C_D – диод сыйымдылығы.

$U_{тура\ imp}$ – тұрақты токтың бекітілген импульсіндегі тура импульсті кернеуі;

$I_{тура\ imp.мах}$ – импульс ұзақтығы бекітілген кездегі токтың максималды рұқсат етілетін мәні;

$\tau_{к,келт}$ – қайтымды кернеуді қалпына келтіруге кететін уақыт.

Импульсті диодтар электронды кілт режимінде жұмыс істейді. Импульс ұзақтығы аз болғандықтан, диод бір күйден екінші күйге тез көшуі тиіс. Импульсті диодтардың жылдам ауысып тұруы негізгі параметрмен сипатталады – қайтымды кедергіні қалпына келтіру уақытымен. Импульсті диодтарда $\tau_{к,келт}$ азайту үшін базадағы негізгі емес заряд тасымалдаушыларды тартып алуға арналған процесті жылдамдататын арнайы шаралар қолданады. Импульсті диодтардың талаптарын базадағы негізгі емес тасымалдаушылардың топталуы мен инжекцияның болмауы салдарынан кіші инерттілікке ие болатын Шоттки диодтары қанағаттандырады.

2.6.5. Аса жоғары жиіліктегі диодтар

Аса жоғары жиіліктегі диодтар (АЖЖД) толқын ұзындығы сантиметр және миллиметрмен өлшенетін диапазонда жұмыс істеуге арналған (10^8 – 10^9 Гц).

АЖЖД түрлері:

- *аралас* (супергетеродинді қабылдағыштарда қолданылады);
- *видеодетекторлы* (АЖЖ–сигналдарды детектірлеу үшін қолданылады);
- *параметрлік* (АЖЖ күшейткіштерде қолданылады);
- *қосылғыш* (АЖЖ тізбектерде электронды қосып өшіру үшін қолданылады);
- *көбейткіш* (диодтың сызықтық еместігінен шығатын жиіліктердің жоғары гармоникаларын алу жолымен жиілікті көбейтуге арналған).

АЖЖ диодтардың меншікті кедергісі аз болатын жартылай өткізгіштен жасайды (базадағы қоспаның жоғары концентрациясымен), оларды өте кіші өлшемді нүктелік рп-ауысу болады. АЖЖ диодтарға төменгі қасиеттер тән:

- базадағы заряд тасымалдаушылардың жылдам өндірілуі;
- ауысудың кіші сыйымдылығы.

Бірақ қоспасының концентрациясы жоғары болатын жартылай өткізгішті қолдану келесі құбылыстарды болдырады:

- потенциалдардың контактілі айырымының өсуіне, яғни, $U_{\text{тура}}$ кернеуінің өсуіне;
- рп-өткелінің қалыңдығын азайтады, ол $U_{\text{проб}}$ кернеуінде және $I_{\text{қосымша тура.мах}}$ тогын төмендетеді.

АЖЖ арналған $U_{\text{проб.}}$ кернеу ойығы вольт бірлігінен тұрады, $I_{\text{тур.қос.мах}}$ – 10–15 мА. Бұл диодтың кемшілігі болып табылады.

Осыған байланысты қазіргі уақытта АЖЖ-диодының ауыстырғышы ретінде рп-құрылымын қолданады. рп-құрылымы бар АЖЖ-диодтар қажетті мөлшердегі тоқты өткізуге болады және сонымен қатар АЖЖ-аумағындағы диодтарды қолдануға болатындай көлемі де кішкентай.

АЖЖ-диоды ретінде Шоттки диодын қолдану кең таралған. *pin*-құрылымды диодтардың жұмысын қарастырайық. Мұнда p және n -аймақтарының арасында өзіндік өткізгіші бар жайртылай өткізгіш аймақ орналасқан. Сыртқы кернеусіз бұл құрылымда екі өткел пайда болады: p_i және n_i (2.7-сурет).



2.7-сурет. Сыртқы кернеусіз *pin*-құрылымды АЖЖ-диоды

АЖЖ-диодтары 10^8 – 10^9 Гц жиіліктегі жұыстарға арналған және сол себепті нүктелі pn -өткелі бар. Базадағы жанама заряд тасымалдағыштарды сіңіруді тездетуге арналған АЖЖ-диодын қоспа концентрациясы көп жартылайөткізгіштен жасайды. Осының нәтижесінде pn -өткелі өте жұқа, әрі ойық кернеуі вольт бірлігін құрайды. Ойықтың аз кернеуі мен АЖЖ-диодындағы түзеткіш ток ауытырғыш элемент ретіндегі қолдану мүмкіншілігін шектейді. *pin*-диодында бұл кемшілік жоқ.

2.6.6. Туннелді диод

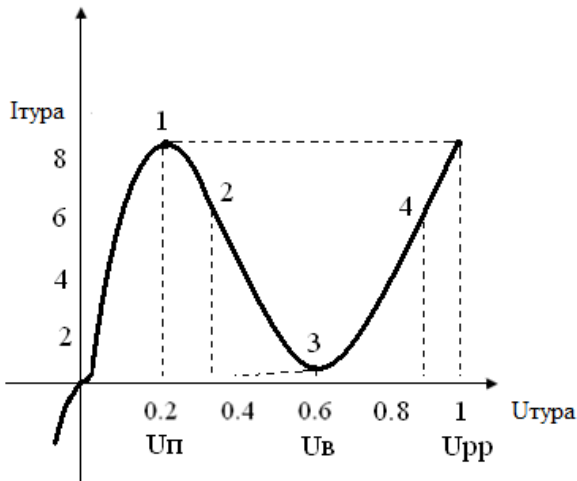
Туннелді диод – жайртылайөткізгіш негізінде жасалған жартылайөткізгіш, мұнда туннелді әсердің пайда болуы тура кернеу кезіндегі кері дифференциалды өткізгіштігі бар ВАС аймағының пайда болуына алып келеді.

2.8-суретте көрсетілген туннелді диодтың ВАС (1 және 3 нүктелер аралығындағы) қосылған кернеуі азайтылған құламалы аймағы бар. Мұнда оның кері көтерілуі токтың жоғарылауын тудырады.

Бұл туннельдік диодтың бұл аймақта кері дифференциалды кедергіге $r_{\text{diff}} = \Delta U_{\text{тура}} / \Delta I_{\text{тура}} < 0$ ие дегенді білдіреді. Осының көмегімен, туннельдік диодты электрлік ауытқуларды күшейту мен генерациялау үшін қолданады.

2.8-суретте көрсетілген туннельдік диодтың ВАС қарастырайық.

Аймақтағы белгіленген қоспа концентрациясы арқылы күй тепе-теңдігіне сәйкес осы аймақтың бастапқы (сыртқы кернеусіз) зоналық диаграммасының салыстырмалы жылжуын алуға болады. Сонымен қатар, туннельдік ток нөлге тең. Егер енді диодқа тура кернеуді қосып, оны 0-ден 0,18-ге дейін жоғарылатса, онда p -аймағының зоналық диаграммасы n -аймағының диаграммасына қарағанда төмен түсе бастайды.



2.8-сурет. АИ301Г туннельдік диодының ВАС

p -аймағындағы валенттік зонада энергетикалық деңгейі төменірек электрондар және n -аймағындағы өткізгіштік зонасының жоғарырақ деңгейі деңгейлерін баса алмайтын рұқсат етілмеген аймақта болады. Электрондар алатын деңгейлер тығыздықтарының әртүрлілігінен n -аймағының рұқсат етілмеген зонасының алдында p -аймағының рұқсат етілмеген зонасына қарағанда электрондар көбірек болады. Осылай, тепе-теңдік күй

бұзылады. Өтімділік зонасы n -аймағынан валенттік зона p -аймағына өте алатын электрондар саны кері бағытқа қарағанда көбірек болады. Сондықтан, диод арқылы мәні жоғары $U_{тура} = 0,18 В$ тең тура тунелдік ток жүреді (2.8-суреттегі 1 нүкте). Тура кернеудің келесі жоғарылауында тунелдік ток төмендейді. $U_{тура} = 0,4 В$ мәніндегі кернеу тунелді ток шамамен максималды мәnnің жартысына тең келеді (2.8-суреттегі 2 нүкте). Кернеу мәні шамамен $U_{тура} = 0,6 В$ болғанда, тунелді ток нөлге тең болады, себебі p және n -аймақтарындағы өзара жабылған зона тоқтатылады және тунелді ток мүмкін болмайды (2.8-суреттегі 3 нүкте). Бірақ сонымен қатар, потенциалды бөгет тура кернеу өскенде ол да жоғарылайтын диффузияның тогы байқалатындай төмендейді (2.8-суреттегі 4 нүкте). Кері кернеу кездегі зоналардың өзара жабылуы шығыстың тепе-теңдік күймен салыстырғанда жоғарылайды және жедел түрде кері кернеу жоғарылауы кезіндегі диод арқылы кері тунелдік ток жүреді.

Мәндері бойынша тунелдік диод *күшейткіш, генераторлы және ауыстырғыш* болып бөлінеді.

Практика жүзінде тунелдікке (критикалык) қарағанда қоспа концентрациясы азырақ жартылайөткізгіштен жасалған қарымта диодтар да қолданыс тапқан. Қарымта диодтардың өте аз тура кернеуі болады.

Осыған орай, басқа диодтарға қарағанда детектордың сапа жұмысында олардың сезімталдығы жоғары болады. Қарымта диодтардың кері кернеуі де онша көп емес (0,3–0,5 В).

Тунелдік диодтардың негізгі параметрлері:

I_u – шындық ток, ВАС максимум нүктесіндегі тура ток, (2.8-суреттің 1 нүктесі);

U_u – шыңның кернеуі, шындық токқа сәйкес келетін тура кернеу;

I_a – ойық тогы, ВАС минимум нүктесінің тура тогы; (2.8-суреттің 3 нүктесі);

U_a – ойық кернеуі, ойық тогына сәйкес келетін тура кернеу;

U_{pp} – ерітінді кернеуі, тура кернеу, ток шегіне жеткен жағдайдағы ойықтың үлкен кернеуі;

C_0 – сыйымдылық.

Туннельді диодтың шекті параметрлері:

$I_{\text{тура.мах}}$ – мүмкін болатын рұқсат етілген екінші басталғалы жатқан тармақтағы максималды тұрақты ток;

$I_{\text{кері.мах}}$ – рұқсат етілген максималды тұрақты кері ток;

$I_{\text{тура.мах}}$ – күшейткіш және генераторлық диодтарға арналған анықтамаларда көрсетілген тұрақты максималды тура кернеу.

Туннельдік диодтарды дайындауда негізгі материал болып германий және галий арсениді қолданады.

Туннельдік диодтарды туннельдік эффект p және n –аймақтарындағы қоспа концентрациясының көп мөлшерінен туындайды.

2.6.7. Варикап

Варикап – бұл жұмысы көлемнің кері кернеуге байланысын пайдалануға негізделген және электрлік басқарылатын көлем сапасына арналған жартылайөткізгіш диод.

Варикаптар жиілік құрылысының автоматты сұлбасында, параметрдің күшейткіштегі жиілікті модуляцияда кең қолданылады.

Варикап параметрлері:

– C_n – номиналды көлем, берілген кері кернеуді өлшеу кезіндегі шығыстар арасындағы көлем;

– K_c – ыдысты жабатын коэффициент, кері кернеудің берілген екі мәніндегі варикап ыдысының қатынасы;

– Q – варикаптың қуаты, берілген жиіліктегі варикаптың реактивті кедергісінің берілген ыдыстағы немесе кері кернеудің шығын кедергісіне қатынасы;

– $\alpha = \Delta C / (C \Delta T)$ – варикап ыдысының салыстырмалы өзгеруін көрсететін ыдыстың температуралық коэффициентінің, олар қоршаған ортаның бір градусына сәйкес келеді;

– $U_{\text{кері.мах}}$ – максималды жіберілетін кері кернеу;

– $P_{\text{мах}}$ – максималды жіберілетін қуат.

Сыйымдылықтың қатысты өзгеруі температураның абсолютті мәндері үшін бірдей болмайды. Сондықтан анықтамаларда коэффициенттің температуралық тәуелділігі беріледі. Варикаптың төзімділігі де температураға тәуелді

болады. Анықтамаларда Q төзімділіктің немесе $\Delta Q/Q_0$ төзімділіктің қатысты өзгеруінің температуралық тәуелділігімен көрсетіледі.

Варикаптакорыту немесе диффузиялық әдіспен алынған кремнийлі pn -өткел бар. Негізі варикаптар металл, металшынылы немесе пластмасса корпуста салынады.

2.6.8. Стабилитрон

Жартылай өткізгіш стабилитрон – бұл электрлік ойық режимінде жұмыс жасайтын және кернеуді тұрақтандыруға арналған кремнийлі диод.

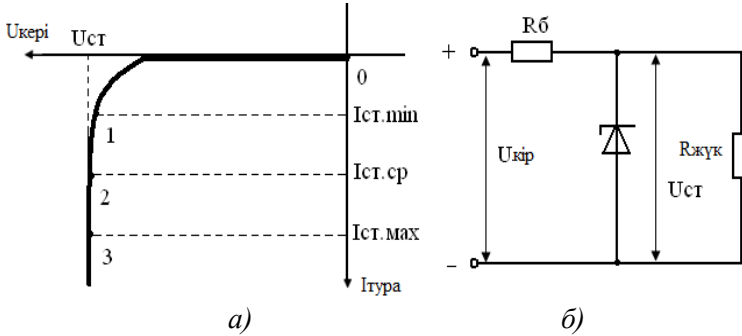
Стабилитрондарды жасау кезіндегі кремнийді шығыс материал ретінде қолдану кіші мәнімен және кремнийлі диодтың кері ток температурасына қатынасымен түсіндіріледі. Диодтағы электрлік ойық кері кернеу орнын алатындықтан ол стабилитрон үшін жұмыс кернеуі болады. Стабилитрон кернеуді тұрақтандыру үшін сызықты емес тізбекте тұрақты токта қолданылады.

$U_{ст} > 3$ В жоғары кернеуді тұрақтандыру үшін ВАС кері бұтағы қолданылады (2.4, б-суретінің АВ аймағы). $U_{ст} < 1$ В кернеуінің төменгі мәнін тұрақтандыру үшін, мысалы интегралды сұлбаларда ВАС тура тармағы қолданылады (2.4, б-суретінің СД аймағы), ал осы кезде қолданылатын диодтар *стабисторлар* деп аталады. Стабисторлардың параметрлері стабилитрондарға ұқсас болып келеді.

2.9, а-суретінде кремнийлі табилитронның ВАС көрсетілген, ал 2.9, б-суретте стабилитрон көмегімен жасалған кернеу тұрақтандырғыштың сұлбасы көрсетілген.

1 нүкте электрлік ойықты қамтамасыз ететін токтың минималды мәніне сәйкес келеді. 3 нүкте кері қосылу кезіндегі диодтың рұқсат етілген максималды қуатымен сәйкес келеді.

Тұрақтандырғыш сұлбасы келесідей есептеледі, $U_{кір}$ номиналды кіріс кіру кезінде $R_{ж}$ жүктеме кедергісі арқылы қажетті ток ағып өтеді. Осыған байланысты стабилитрон мен жүктемедегі кернеу $U_{ст}$ стабилизация кернеуімен тең, ал стабилитрон арқылы ағып өтетін ток $I_{ст.ор}$ тең (2 нүкте) болады.



2.9-сурет. Кремнийлі стабилитрон:
а) ВАС; б) қосылу сұлбасы

Кернеуді тұрақтандыру процесі келесі түрде жүзеге асады. Егер, мысалы кіріс кедергісі жоғарылайтын болса, онда стабилитрон кедергісі азаяды, ток сол арқылы өседі, ал кернеу болса өзгермейді. $R_{\text{б}}$ резистордағы кернеудің артығы өшеді.

Стабилитрондағы тұрақтану кернеуі қоспа концентрациясымен анықталатын базадағы меншікті кедергіге тәуелді. Базадағы меншікті кедергі көп болған сайын, соғұрлым тұрақтану кернеуі жоғары болады. Өндірісте 3,3–180 В тұрақтандыру кернеуі бар стабилитрондарды шығарады.

Стабилитронның негізгі параметрлері:

- $U_{\text{ст}}$ – тұрақтандырғыш кернеу, яғни тұрақтандыру тогы өткен кезде стабилитрондағы кернеу;

- $r_{\text{ст}}$ – стабилитронның дифференциалды кедергісі, яғни $\Delta U_{\text{ст}}/\Delta I_{\text{ст}}$;

- $\alpha_{\text{ст}}$ – тұрақтандыру кернеуінің температуралық коэффициенті, яғни тұрақтандыру кернеуінің салыстырмалы өзгерісінің тұрақты стабилизация тогы кезіндегі қоршаған ортаның абсолютті температура өзгерісіне қатынасы.

Стабилитронның шекті параметрлері:

- $I_{\text{ст. min}}$ – минималды шекті тұрақтандыру тогы (стабилитрон арқылы жүретін аздаған ток), мұнда белгіленген шектегі кернеу $U_{\text{ст}}$;

– $I_{ст. max} - U_{ст}$ белгіленген шектегі кернеу кезіндегі максималды шекті тұрақтандырудың тоғы, ал өту температурасы шектен аспайды;

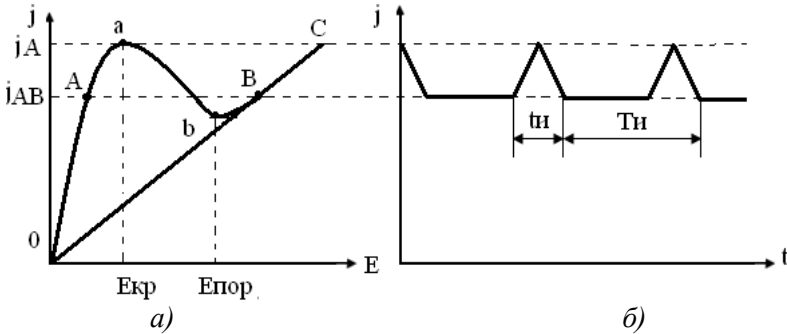
– R_{max} – жылулық өту ойығының пайда болмаған кезде желдетілетін максималды шекті қуаты.

Қорытынды. Жартылай өткізгіш стабилитрон электрлік ойылу режимінде кері кернеумен жұмыс істейтін кремнилік диод. Стабилитронды сұлбаға қосқанда жүктемеге параллельді, ал тармақталмаған тізбегін балласты кедергіге қосады. Сұлба келесідей есептеледі, жүктемедегі берілген ток пен номинальды кіріс кернеу болғанда, стабилитрон арқылы өткен токстабилитроннан берілетін максималды және минималды берілетін токтың орташа мәніне тең болады.

2.6.9. Ганн диодтары

Ганн диодтары негізінен жоғары жиілікті (ЖЖ) және аса жоғары жиілікті (АЖЖ) тербелістерін генерациялау үшін қолданылады. Диодтың жұмыс істеу принципінің негізінде Ганн эффектсі жатыр, мұнда электрон типті галий арсенидінің кристалында қатты білінеді. Бұл эффект заряд тасымалдаушылардың белсенділігінің электр аймағына тәуелділігімен байланысады.

Енді келесі әлсіз және күшті физикалық мәндерді 1 және 2 индекстерімен белгілейміз. Әлсіз электр аймақтарында электрондардың салыстырмалы белсенділігі жоғары және тұрақты: $\mu_n = \text{const}$ (1.8-сурет) Дрейфті токтың тығыздығы E тура пропорционал: $j_{n,др} = eN_n\mu_{N1}E = \sigma_1 E$, мұнда N_n – жартылай өткізгіштегі өткізгіштің электрон концентрациясы, e – заряд электроны, $\sigma_1 = eN_n\mu_{N1}$ – жайртылай өткізгіш өткізгіштігі, 0A аймағындағы сипаттаманың көлбеу бұрышының тангенсіне тура пропорционал шама (2.10, а-сурет).



2.10-сурет. Ганн диодының сипаттамасы
 а) электронды түрдегі галлий арсений кристалындағы ток тығыздығының кернеу аймағына тәуелділігі; б) зарядтарды жинау режиміндегі Ганна диод тогының уақытша диаграммасы

$E > E_{кр} \approx 3$ кВ/см электр өрісінің кернеуін арттырған кезде, бір-бірімен соқтығысқан электрондар жылдамдығы артады және осы соқтығысулар жиілеген сайын электрондардың қозғалысы баяулайды. Бұлыстық құбылыс деп аталынады. Кейбір $E = E_{таб} \approx 50$ кВ/см табалдырықты мән болғанда барлық электрондар «ыстық» болады, сондықтан $j_{н.др} = eN_n \mu_{N2} E = \sigma_2 E$ болады, мұндағы $\mu_{N1} > \mu_{N2}$ – «ыстық» электрондардың қозғалыстары; $\sigma_2 = eN_n \mu_{N2}$ – BC ауданындағы тангенс бұрышына тура пропорционалды шама $E \geq E_{таб}$ кезіндегі жартылай өткізгіштің өткізгіштігі (2.10, а-сурет).

2.7. Жартылай өткізгіш диодтардың белгілену жүйесі

МЕСТ 10862–72-ке сәйкес, жартылайөткізгіш диодқа төрт элементтен тұратын анықтама беріледі.

1. Шығыс материалды білдіретін әріп пен сан: Г немесе 1 – германий; К немесе 2 – кремний; А немесе 3 – арсенид галлий (сандық анықтамалар арнайы мақсатта қолданылатын құрылғыларда қолданылатын аспапты білдіреді).

2. Аспаптың кластарын көрсететін әріп.

3. Аспап мәнін көрсететін алғашқы сан және оның электрлік қасиеті, ал келесі екі сан (1-ден 99 дейін) құрастырудың реттік нөмірін білдіреді. Стабилитрондар үшін келесі екі сан мынаны білдіреді: $U_{\text{стаб}} < 10$ В кезінде – $U_{\text{стаб}} 10$ ретке жоғарылағанда, мысалы, КС147А–4,7 В; $U_{\text{стаб}}$ кезінде 10–99 В реттік– $U_{\text{стаб}}$ номиналды, мысалы, КС213Б–13 В.

4. Бұл типті аспаптың түрлерін көрсететін әріп (стабилитрондар үшін құрастыру реті).

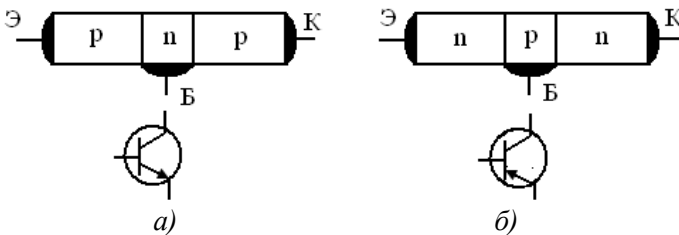
3. ТРАНЗИСТОРЛАР

3.1. Биполярлы транзисторларда болатын физикалық процестер

Биполярлы транзистор деп екі әсер етуші және түзеткіш электронды-кемтіктік өткелі бар, негізгі емес заряд тасымалдаушыларының инжекция және экстракция процестеріне негізделген күшейткіш қасиетінің үш және одан да көп шығысы бар жартылай өткізгішті аспапты айтамыз.

Биполярлы транзисторда бір мезетте заряд тасымалдаушылардың екі типі – электрон және кемтік қолданылады, сол себепті ол – биполярлы деп аталады.

Жартылай өткізгіш кристалында үш облыстың орналасуына байланысты транзисторлар pnp және npn – типті болады (3.1-сурет).



3.1-сурет. pnp (а) және npn (б) – транзисторларының шартты-графикалық белгіленуі және құрылымы

Қоспа концентрациясы көп облыс эмиттердің (Э), ал екіншісі коллектордың (К) қызметін атқарады. Олардың арасын жұқа база (Б) бөліп тұр. Эмиттер мен базаның (ЭӨ) және коллектор мен базаның (КӨ) арасында өткелдер пайда болады – pn өткелдер. Сондықтан биполярлы транзистордың жұмыс істеу принципі екі әсерлесуші pn өткелдеріне байланысты.

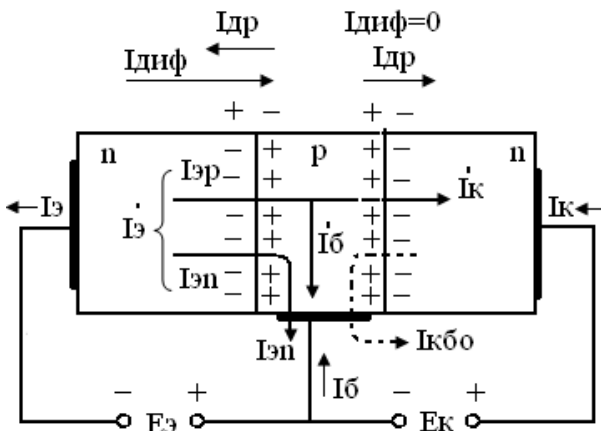
Транзистор күшейткіш режимде жұмыс істегенде ЭӨ тура, ал КӨ кері кернеу әсер етеді.

Биполярлы транзистордың жұмыс істеу принципін (p -облыстың n -облысқа қарағанда заряд тасымалдаушылардың

концентрациясы жоғары, яғни $N_n \ll P_p$) *pnp*-типті транзисторды мысалға ала отырып түсіндіреміз.

Берілген құрылымға (3.2-сурет):

- эмиттерден (*n*-облыс) көршілес *p*-облысқа, яғни база облысына кемтіктерді инжекциялаймыз;
- коллекторға (*n*-облыс) *p*-облысының кемтіктерін экстракциялаймыз.



3.2-сурет. Көрек көзіне қосылған транзистордағы ток бағыты

Көршілес облыстарға ауысқан негізгі заряд тасымалдаушылар қарапайым заряд тасымалдаушыларға айналады, бұл процесс инжекция деп аталады. Егер негізгі заряд тасымалдаушылар көршілес облыстарға ауысқан кезде өз қасиетін сақтап қалса, яғни негізгі болса, онда бұл процесс экстракция деп аталады.

Жартылай өткізгішті облыстарға пісіріп жалғанған металл шығыстар *эмиттерлік*, *коллекторлық* және *базалық* шығыстар деп аталады.

Сонымен эмиттерлік ток бұл – біршама кемтіктерден және аздаған электрондардан тұратын диффузиялық ток: $I_3 = I_{3p} + I_{3n}$.

Диффузия әсерінен бос электрондардың базадан эмиттерге ауысуы нәтижесінде база оң зарядталады. Бұл база потенциалының оған жалғанған өткізгіш потенциалынан едәуір

жоғарылайтынын көрсетеді. Потенциалдардың әртүрлілігінен базаға жалғанған өткізгіш арылы электрондар өтеді. Сондықтан эмиттерлік токтың I_{en} электрондары базалық шығыста тұйықталады және базалық токтың құраушысы болады. прп-типті транзистордағы эмиттерлік токтың кемтіктері жарамсыз, себебі ол коллектордағы басқарушы токты жасауға қатыспайды. Кемтіктер қаншалықты аз болса, эмиттердің тиімділігі артады, бұл инжекциялық коэффициент деп аталады:

$$\gamma = \frac{I_{ep}}{I_{ep} + I_{en}} = \frac{I_{ep}}{I_n}. \quad (3.1)$$

База облысындағы инжекцияланған электрондардың бір бөлігін осы облыстағы негізгі тасымалдаушылармен рекомбинациялау арқылы I_6' базалық тогын аламыз.

$U_{кб}$ кернеуінен пайда болған электр өрісі арқылы коллекторлық өткелге жететін инжекцияланған кемтіктер екінші n -облыста, яғни коллекторда экстракцияланып, өткелде I_k' коллекторлық ток тудырады.

Коллектор өткелінен ағып өтетін электрондар ағымының, яғни коллекторлық токтын азаюын эмиттер өткелінен өтетін кемтіктермен мына катынас арқылы көрсетуге болады :

$$I_k' = \alpha I_3, \quad (3.1)$$

мұндағы $\alpha = 0,95 - 0,99$ – *эмиттерлік токтың дифференциалды коэффициенті*. α коэффициенті – коллекторлық ΔI_k және эмиттер ΔI_3 токтарының сәйкес ауытқулары, ол – *эмиттерлік токтың динамикалық коэффициенті*.

Жабық коллектор өткелінде n -облыстан p -облысқа өтетін негізгі емес заряд тасымалдаушылары, кемтіктер, I_k' тогымен бірігіп $I_{кб}$ кері. ($I_{кбк}$) кері ток пайда болады

$$I_k = I_k' + I_{кбк}. \quad (3.2)$$

Ал база шығысындағы ток:

$$I_6 = I_6' - I_{кбк}. \quad (3.3)$$

(3.1) формуланы ескере отырып, коллекторлық токты аламыз:

$$I_k = \alpha I_3 + I_{kбo}. \quad (3.4)$$

$I_3 \gg I_{kбк}$ салыстыра отырып:

$$I_k \approx \alpha I_3. \quad (3.5)$$

Транзистор тогы үшін негізі теңдеулер Кирхгофтың бірінші заңын ескере отырып жазылады:

$$I_3 = I_k + I_6. \quad (3.6)$$

(3.5) формуладағы I_3 алмастыру арқылы:

$$I_6 = I_k / \alpha - I_k \text{ немесе } I_6 = [(1 - \alpha) / \alpha] \cdot I_k, \quad (3.7)$$

$$I_6 / I_k = \alpha / (1 - \alpha) = \beta \text{ немесе } I_k = \beta \cdot I_6. \quad (3.8)$$

Сонымен, $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ – база тогы берілуінің дифференциалды коэффициенті.

Екі pn – өткелінің әрекеттесуі және I_3 мен I_6 токтарының нәтижесі I_k тогының мәніне әсер етеді.

База облысына рекомбинацияланатын инжекцияланған заряд тасымалдаушылар, яғни екі pn – өткелінің әрекеттесуі жоғарылауына, сондай-ақ, база облысында негізгі заряд тасымалдаушылардың эмиттер облысымен салыстырғанда аз болуы да әсер етеді.

Транзистордың қасиеті базадағы процестерге тікелей байланысты:

– егер қоспа концентрациясы база облысының барлық аумағында бірдей болса, яғни база біркелкі болса, онда ондағы заряд тасымалдаушыларының қозғалысы *диффузиялық сипатта* болады. Мұндай транзистор *диффузиялық* деп аталады;

– егер база біркелкі болмаса, онда базадағы электр өрісінің заряд тасымалдаушылар қозғалысы комбинациялық болады: диффузия өріс заряд тасымалдаушыларымен бірігеді.

Мұндай транзисторларды *дрейфтік (ағындық)* деп аталады. Олар жоғары жиілікті қасиетке ие, сондықтан көп таралған;

– кері аралас коллекторлы өткелдің кедергісі ($U_{\text{кері}}$ кернеуін қосқан кезде) бірнеше Мом өседі, сондықтан коллектор тізбегіне тогын өзгертпей, едәуір жоғары кедергілі $R_{\text{жүк}}$ резисторын қосуға болады. Бұл кезде жүк тізбегі сәйкес қуат шығарады.

– тура аралас эмиттерлі өткел кедергісі ($U_{\text{тура}}$ кернеуін қосқан кезде) ондаған Ом төмендейді, сондықтан эмиттер мен коллектор токтарының бірдей мәні кезінде, эмиттер тізбегінде қолданылатын қуат жүк тізбегінде шығарылатын қуаттан аз болады. Бұл тарнистордың қуатты арттыратын жартылай өткізгішті аспап екенін көрсетеді.

Бір жағынан кіріс кернеуінің аз мәні (вольттың оныншы бөлігін құрайтын эмиттерлік өткелдің тура ауысуы) және шығыс кернеудің жоғарғы мәні (ондық вольт құрайтын коллекторлы өткелдің кері ауысуы) берілген сызықты емес басқарылатын элементті кернеуді арттыру үшін қолдануға болады.

3.2. Ортақ базамен қосылу сұлбасының статикалық сипаттамалары

Берілген биполяр транзистордың қорек көзіне қосылу сұлбасында базалық шығыс эмиттерлі тізбек пен қорек көзінің байланысын және коллекторлы тізбек пен коллекторлы бастаудың байланысы ретінде қызмет етеді. Сондықтан берілген схеманы *жалпы базамен қосылу сұлбасы* деп атайды. Тәжірбие кезінде ортақ нүктені жерлендіру әдісі қолданылады, сондықтан бұл сұлбаны *жерлендірілген база мен қосылу сұлбасы* деп те атайды.

Транзистордың электродына қорек көзінің кернеуі ғана әсер ететін *статикалық режимі* және аталған кернеуден басқа транзистордың кернеуіне күшейткіш сигнал әсер етіп, шығыс электрод тізбегіне $R_{\text{ж}}$ қосылған *динамикалық режимі* бар.

Транзистордың *статикалық сипаттамаларына*: қоректік қуаттың бір электрод тізбегінің тогы немесе соңғы электрод тізбегіндегі ток жатады.

ЖБ схемасы келесі сипаттамаларға ие:

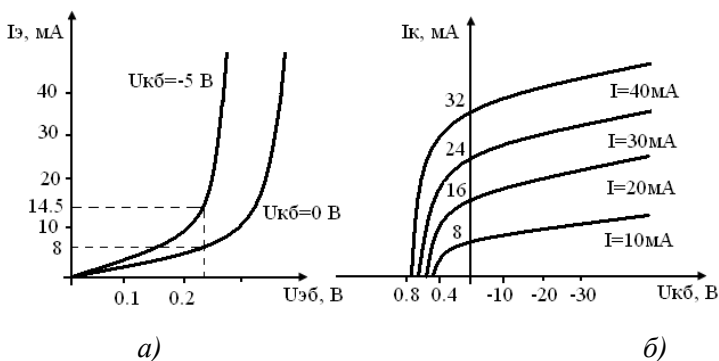
– *кіріс сипаттамалары*: эмиттерлі сипаттамалар – бұл I_3 тогының U_{36} кернеуіне коллектордың өзгеріссіз кернеуі кезіндегі тәуелділігі: $I_3=f(U_{36})$, $U_{кб}=const$;

– *шығыс сипаттамалары*: коллекторлы сипаттамалар – бұл $I_к$ тогының $U_{кб}$ кернеуіне эмиттердің өзгеріссіз кернеуі кезіндегі тәуелділігі: $I_к=f(U_{кб})$, $I_3=const$.

Бірнеше аттас статистикалық сипаттамалар, ортақ координат жүйесінде құрылған тұрақты үшінші шама *статикалық сипаттамалар жиынтығы* деп аталады.

Әдетте анықтамаларда кернеу үшін екі шығыс статикалық сипаттамалар келтіріледі: $U_{кб}=-5$ В және $U_{кб} = 0$ В.

$U_{кб} = 0$ В кернеуі кезіндегі эмиттердің сипаттамасы тура қосудағы диодтың ВАСкөрсетеді. $U_{кб}>0$ В кезінде эмиттердің сипаттамасы сол жаққа ауысады. Бұл кернеудің $U_{б3}=const$ кезінде $U_{кб}$ кернеуінің артуы I_3 тогының едәуір артуына әсер етеді.



3.3-сурет. Ортақ базамен қосылған кіріс және шығыстардың статикалық ВАС

3.3, а-суреттен $U_{36}=0,25$ В тұрақты кернеуінде $U_{кб}$ кернеуінің 5 В өсуі, I_3 тогының 8-ден 14,5 мА дейін, яғни екі есеге дейін өскенін көрсетеді. Коллекторлы кернеу $I_б$ база тогына да әсер етеді.

Коллекторлы өткел кері кернеуге тәуелді. Кері кернеудің өсуі коллекторлы өткелдің кеңеюіне әкеліп соғады. Бұл эмиттерлік өткелге жақындауды және базаның әдеттегі

(жұмысшы) қалыңдығын азайтады. Бұл құбылысты *база қалыңдығының модуляциясы* деп атайды (*Эрли эффектiсi*).

Базаның жұмысшы қалыңдығының азаюы: біріншіден, I_3 эмиттерлі токтың, яғни ток диффузиясының базаға инжекцияланған кемтіктер концентрациясының градиентінің артуынтудырады; екіншіден, $I_{3,рек}$ эмиттерлі токтың рекомбинациялық бөлігінің азаюын тудырады, себебі кемтіктердің санының азаюы эмиттерлік токтың артуынан тезірек жүреді.

$|U_{кб}| > 0$ В коллекторлы кернеуін бергенде, база тогын азайтатын $I_{кбк}$ кері ток пайда болады. База тогының азаюы эмиттер тогының тағы да артуына себеп болады, себебі базаның көлемді кедергісінде кернеудің төмендеуі азаяды және эмиттерлі өткелге жалғанған тура кернеу артады.

3.3, *a*-суретте келтірілген сипаттамалардан, $U_{3б}$ кернеуіндегі аздаған өзгерулер I_3 тогының арттыратынын көреміз.

Бұл ортақ база схемасымен қосылған транзистордың аздаған дифференциалды кіріс кедергісі бар екенін көрсетеді:

$$R_{кпр.б} = \Delta U_{3б} / \Delta I_3 \text{ бұл кезде } U_{кб} = \text{const.} \quad (3.9)$$

Аз қуатты транзистор үшін $R_{кпр.б}$ кедергісі бірліктерді құрайды – ондаған Ом.

3.3, *б*-суретте берілген *коллекторлы сипаттамалар* жиынтығында $I_3 = 0$ тогына сәйкес келетін сипаттама жоқ.

$I_3 = 0$ тогы кезінде эмиттерден базаға кемтіктер өтпейді және коллектор тізбегінде тек кері $I_{кб0}$ тогы болады. Ол бөлме температурасында германийлік транзисторларда да өте аз шамада, себебі $I_3 > 0$ және $I_3 = 0$ сипаттамаларын бір масштабта бейнелеу мүмкін емес және ол горизонталь осьпен бірігіп кетер еді.

Коллекторлы сипаттамалар горизонталь оське параллель жүреді, яғни $I_к$ тогы $U_{кб}$ кернеуіне тәуелді емес.

Бұл $I_3 = \text{const}$ тогы кезінде, $I_к$ тогының және $U_{кб}$ кернеуінің артуы $I_{3,рек}$ рекомбинациялық тогының азаюынан пайда болады.

$I_к$ тогының $U_{кб}$ кернеуіне тәуелділігінің төмендігі ортақ база (ОБ) мен транзистордың өте жоғары кедергісін сипаттайды:

$$R_{\text{шығ.б}} = \Delta U_{\text{кб}} / \Delta I_{\text{к}}, \text{ бұл кезде } I_{\text{б}} = \text{const.} \quad (3.10)$$

Аз қуатты транзисторлар үшін $R_{\text{шығ.б}}$ кедергісі жүз КОм дейін жетуі мүмкін, ал кейбір транзисторларда 1 МОм асуы мүмкін.

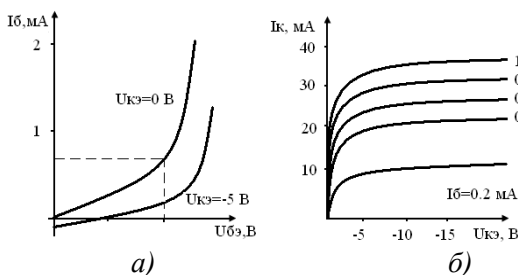
Транзистордың ортақ базамен қосылу схемасында бірқатар кемшіліктер бар: ОБ схемасында токтың артуына жол жоқ. Сонымен қатар $R_{\text{вх.б}}$ кедергісінің аздығынан ОБ мен транзистор сигнал көзінен көп ток шамасын алады. Өте үлкен $R_{\text{шығ.б}}$ көп жағдайда қажет емес, себебі жүкпен келісімді ауырлатады.

Берілген кемшіліктерден қоректік эмиттер кернеуін эмиттерлі емес базалық өткізгішке жалғап құтылуға болады. Бұл жағдайда транзистордың кіріс және шығыс тізбектерінің ортақ қосылу нүктелері ретінде эмиттердің шығысы қызмет атқарады.

3.3. Ортақ эмиттермен қосылу сұлбасының статикалық сипаттамасы

Кіріс сипаттамалары – бұл $I_{\text{б}}$ тогының $U_{\text{бэ}}$ кернеуіне коллектордың тұрақты кернеуі кезіндегі тәуелділігі: $U_{\text{кэ}} = \text{const}$ болғанда $I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}})$.

$U_{\text{бэ}}$ базасындағы токтың кернеуге тәуелділігін қарастыра отырып, кернеудің базалық токқа тікелей емес эмиттерлік ток арқылы әсер ететіні ескеру қажет (3.4, а-сурет).



3.4-сурет. Ортақ эмиттермен (ОЭ) қосылған транзистордың статикалық сипаттамалар жиынтығы:

а – кіріс сипаттамалары; б – шығыс сипаттамалары

$U_{бэ}$ кернеуінің артуы I_b эмиттер тогының артуын тудырады, сондықтан $I_{эп}$ және $I_{рек}$ және база тогы да артады.

ОЭ мен транзистордың схемасындағы кірісінің статикалық сипаттамаларын аттас сипаттамалармен салыстыра келе олардың арасындағы айырмашылықты байқауға болады:

– біріншіден, ОЭ схемасында $U_{кэ}$ кернеуі I_b кіріс тогын кемітеді. Кернеу 0-ден $U_{кэ}$ кернеуіне дейін E_b база кернеуіне шамалас болып ондаған шақты вольтке өзгереді, оның база тогына әсері аз;

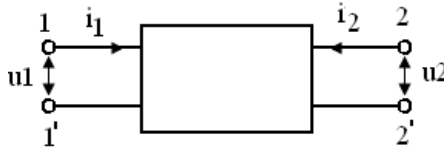
– екіншіден, ОЭ мен кіріс сипаттамалар схемасы $U_{кэ}$ кернеуі кезінде кері аумаққа ие.

Қорытынды: ОБ схемасымен салыстырғанда ОЭ схемасы кернеудің артуымен қоса токтың артуын да тудырады. ОЭ схемасымен қосылған транзистор, база тогының айналысын (ток амплитудасын) ондаған есе арттырады. Берілген схемадағы кернеудің артуы сол күйі ОБ схемасындағыдай қалады. ОЭ мен схемадағы қуаттың артуы ОБ схемасына қарағанда өседі. ОЭ схемасымен қосылған транзистордың кіріс және шығыс кедергілерілер шамасы ОБ схемасына қарағанда жоғары. Аталған артықшылықтарға байланысты ОЭ схемасы тәжірибеде көп қолданылады.

3.4. Транзистордың h-параметрлері

Транзистордың физикалық параметрлер жүйесінің кемшілігі оны барлық жағдайда қолдана алмайды, сондықтан екі шығыс қысқышты, активті сызықтық төртполюс (электр жүйесі) ретінде транзистордың сыртқы параметрлері қолданылады.

Активті деп қуат сигналдарын корек көзі энергиясы есебінен арттыратын төртполюсті атайды. Транзисторды *сызықтық* (3.5-сурет) төртполюс деп санау үшін айнаымалы кернеу амплитудалары аз шамада болуы керек.



3.5-сурет. Сызықтық төрт полюс

Сызықтық төрт полюстің төрт бір-бірімен байлынысты кернеу шамалары мен токтарының екі кіріс және шығыс шамаларын тәуелсіз айнymалы ретінде алуға болады. Сонда қалған екі шама тәуелді болады. Сонымен қатар көрсетілген төрт полюстің сәйкес алты параметрлер жүйесі бар.

Тәжірибеде көп қолданылатын h -параметрлердің оңай өлшенетін және әртүрлі өлшемдегі аралас жүйесі. h -параметрлер жүйесінде тәуелсіз айнymалылар i_1 және u_2 ретінде қолданылады: $u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2$; $i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2$.

Бірінші жағдайда $u_2 = 0$ (қысқа тұйықталу режимі), алатынымыз:

$-h_{11} = u_1 / i_1, u_2 = 0$ – транзистордың шығысындағы қысқа тұйықталу кезіндегі (КЗ) кіріс кедергісі; $-h_{21} = i_2 / i_1, u_2 = 0$ – ток шығысындағы қысқа тұйықталу кезіндегі (КТ) беріліс коэффициенті.

Екінші жағдайда $i_1 = 0$ (бос жүріс режимі), алатынымыз:

$-h_{12} = u_1 / u_2, i_1 = 0$ – кірістегі босжүріс режиміндегі (ХХ) кері байланыс коэффициенті $h_{22} = i_2 / u_2, i_1 = 0$ – кірістегі ХХ режиміндегі шығыс өткізгіштік.

Қрытынды: h -параметрлердің тәжірибеде көп қолданылатын жүйесі: транзистордың параметрлері активті сызықты төртполюс параметрлері. Барлық h -параметрлерді оңай өлшеуге болады, себебі олар ОБ және ОЭ мен транзистордың қосылу схемасының әртүрлі мәніне ие.

3.5. Транзистордың электрлік параметрлері

Биполярлы транзистор келесі режимдері және қасиеттеріне сәйкес параметрлермен сипатталады:

- тұрақты ток режимі;
- жиіліктік сипаттамалар;
- төменгі сигнал режимі;
- жоғарғы сигнал режимі;
- шектік режим.

Тұрақты ток параметрлері, түзетілмейтін тоқты транзистордың *pn*- өткелімен және келесі жолдармен анықтайды:

– коллектордың кері тогы $I_{кб0}$ – КБ өткелі арқылы ток эмиттердің тұйықталған тізбегі және берілген $U_{кб}$ кернеуде ОБ мен биполярлы транзистордың қосылу схемасы;

– эмиттердің кері тогы $I_{эб0}$ – ЭБ өткелі арқылы ток коллектордың тұйықталған тізбегі және берілген $U_{эб}$ кернеуде ОБ мен биполярлы транзистордың қосылу схемасы;

– коллектор-эмиттер кері тогы $I_{кэ0}$ (бастапқы коллектор тогының белгіленуі $I_{к.н}$) – коллектор тізбегіндегі ток тұйықталған эмиттер-база тізбекте ток және берілген коллектордағы $U_{кэ}$ кернеу ОЭ мен биполярлы транзистордың қосылу схемасы.

Төменгі сигнал режиміндегі параметрлер (сигнал кернеуі VT алмасу кернеуінен аз), ток өзгерулерімен транзистордың кіріс және шығыс кернеулерінің байланысы. Транзистор сипаттамалары сызықтық емес, сондықтан төменгі сигнал кезіндегі параметрлер таңдалынатын режимге байланысты болады. Төменгі сигнал режимінде транзисторды активті сызықты төртполюс ретінде қарастырамыз (электрлік схема, екі кіріс және шығыс қысқыштары бар).

h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} параметрлері транзистордың аз сигналдарға қатысты көрсетілген жұмыс нүктесіндегі электрлі сипаттамаларын білдіреді. Параметрлердің физикалық мағынасын анықтаймыз:

$h_{11} = \Delta U_1 / \Delta I_1$ – биполяр транзистордың кіріс кедергісі (ҚТ шығысындағы айнымалы ток бойынша, яғни $\Delta U_2 = 0$).

$h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2$ – кері байланыс коэффициенті (кіріс тізбектегі бос жүрісте, яғни $\Delta I_1 = 0$).

Кернеу бойынша кері байланыс коэффициенті транзистордың шығыс қысқыштарындағы ΔU_2 сигнал кернеуінің қай бөлігінде кіріс тізбекке қайта берілетінін көрсетеді.

$h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1$ – токтың беріліс коэффициенті (шығыстағы айнымалы токқа қысқа тұйықталу, яғни $\Delta U_2 = 0$).

Токтың беріліс коэффициенті транзистордың шығыс тогы ΔI_2 кіріс тогы ΔI_1 өзгергенде қаншаға өзгередінін көрсетеді. Токтың беріліс коэффициентін төменгі (50–1000 Гц) жиілікте,

транзистордың кіріс және шығыс кернеу және тогының фазалық алмасуын ескермей анықтайды.

$h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2$ – шығыс тогы өзгерісінің оны тудырған шығыс кернеуге қатысы – биполяр транзистордың шығыс өткізгіштігі (кірісіндегі бос жүріс кезінде, $\Delta I_1 = 0$).

Коллекторлы өткелдің C_k ауданы К және Б шығыстарының арасындағы Э өшірулі және коллектордың кері ауысуы кезінде анықталады.

Эмиттерлі өткелдің C_3 ауданы Э және Б шығыстарының арасындағы К өшірулі және эмиттердің кері ауысуы кезінде анықталады.

Жоғары жиілік (ЖЖ) $\tau = \tau_6 \cdot C_k$ кезіндегі кері байланыс уақытының тұрақтысы, мұндағы τ_6 – базаның омдық кедергісі.

Жиілікті қасиеттер келесі параметрлермен сипатталады:

Ток берілісі коэффициентінің шектік жиілігі – бұл ток берілісінің коэффициент модулі $\sqrt{2}$ дейін төмендейтін жиілік (ТЖ кезіндегі мәнінен 0,707 дейін):

– $f_{h_{21\beta}} f_\alpha$ – ортақ база схемасы үшін (ОБ);

– $f_{h_{21\beta}} f_\beta$ – ортақ эмиттер схемасы үшін (ОЭ).

Шектік жиілік транзистордың жиілік шегін анықтамайды, параметрлердің жиіліктік тәуелділігін ескермеуге болатын жиілік ауданымен шектейді (жоғарғы жиілікте I_k тогының айнымалыларының I_3 тогы айнымалысынан фаза бойынша қалуы тіркеледі).

Токтың беріліс коэффициентінің шекаралық жиілігі $f_{гр}$ – бұл $|f_{21\beta}| = 1$ тең болатын жиілік.

Шектік және шекаралық жиіліктер мына түрде байланысады:

$$f_{гр} \approx 0,8 \cdot f_{h_{21\beta}}. \quad (3.11)$$

Генерацияның максималды жиілігі $f_{max}(MГц)$ – автогенератор схемасындағы оптималды кері байланыс кезіндегі транзисторды генерациялайтын ең көп жиілігінің формуласы:

$$f_{\max} = f_{h_{216}}, \quad (3.12)$$

мұндағы $f_{h_{216}}$ – ток берілісінің коэффициентінің шекті жиілігі, Гц; $\tau = \tau_6 \cdot C_k$, пс; $f_{\max}$, МГц.

Үлкен сигнал режимінің параметрлері транзистор шығысындағы ток пен кернеуінің кең шегінде, транзистор режимдерінің жұмыстарын сипаттайды. Бұл параметрлер автогенератор және импульсті схемаларда қуатты каскадты күшейткіштерде транзистордың жұмысын бағалау үшін қолданылады.

Үлкен сигнал режимдерінің параметрлеріне мыналарды жатқызады:

– ток берілісінің статистикалық коэффициентін (схема үшін ОЭ-мен): $h_{21э}$ – тұрақты ток коллекторының база тогына қатынасымен анықталады;

– қанығу кернеуі $U_{бэ,қан}$, $U_{кэ,қан}$.

Қанығу режимінде $p\text{--}n$ -өткелдерінің екеуі де ашық күйде болады. Өткелдердегі кернеу: ЭП – тура кернеу, КП – тура кернеу. $R_{ж}$ -кедергісінің таңдалған мәнінде тізбектің шығысындағы ток максималды мәнде болады. Қанығу режимі сигнал берілісінің тұйықталған тізбегінде қолданылады.

Режимдердің шекті параметрлерін асыруға ұсынылмайды, бірақ кейбір мәндерінде берілген параметрлер сақталады:

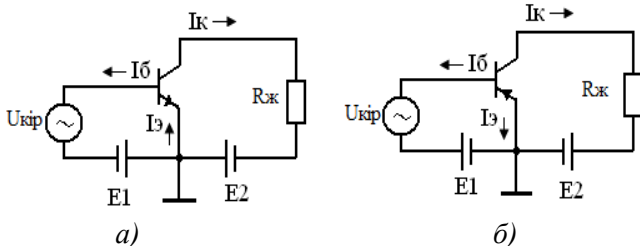
- $U_{кб,маx}$ – коллектор-базасының тұрақты кері кернеуі;
- $U_{кэ,маx}$ – база-эмиттерінің тұрақты кернеуі;
- $U_{кэ,маx}$ – коллектор-эмиттерінің тұрақты кернеуі;
- $P_{к,маx}$ – коллектормен төмендетілетін қуат;
- $I_{к,маx}$ – коллектордың тұрақты тогы (сонымен қатар $I_{б,маx}$, $I_{э,маx}$);
- $t_{к,маx}$ – коллектор ауысымының температурасы.

3.6. Биполярлы транзистордың негізгі параметрлері мен жұмыс істеу режимдері және қосылу сұлбасы

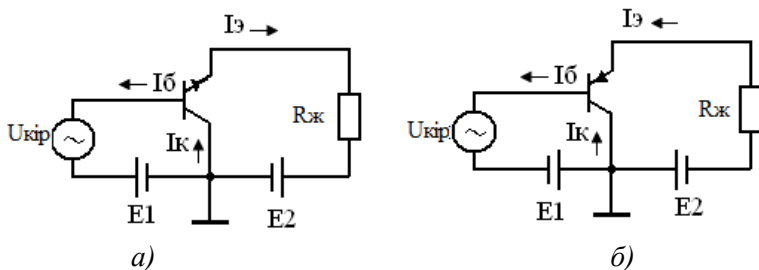
Биполярлы транзистор күшейткіш құрылғы ретінде төртполюс түрінде болады.

Биполярлы транзистор шығыстарының төрт полюстің кірісі мен шығысының қайсысының ортақтығына тәуелді, транзистордың қосылу схемасын ортақ базамен (ОБ), ортақ эмиттермен (ОЭ), ортақ коллектормен (ОК) деп бөлеміз.

3.6-суретте көрсетілген сұлбалар транзистордың ОЭ-мен қосылған схемалары келтірілген және осы схема көп қолданылады. Қосылған ішкі қорек көзінің полярлығы транзистордың типіне тәуелді: *pnp* (3.6, а-сурет) немесе *npr* (3.6, б-сурет). Биполярлы транзистордың ОЭ-мен қосылуы кезінде кіріс тогы база тогына сәйкес, ал шығысы тогы коллектордың тогына сәйкес келеді.



3.6-сурет. ОЭ арқылы қосылған транзистордың қосылу сұлбасы:
а – *pnp*-транзистор түрі; б – *npr*-транзистор түрі



3.7-сурет. ОК арқылы қосылған транзистордың қосылу сұлбасы:
а – *pnp*-транзистор түрі; б – *npr*-транзистор түрі

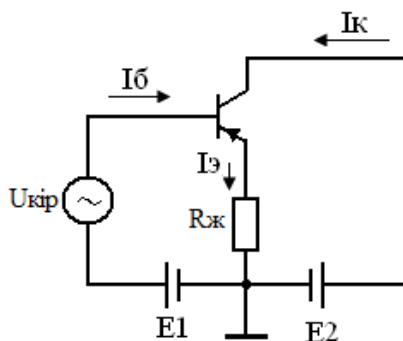
Биполярлы транзистордың ОБ-мен қосылуы кезінде *кіріс тогы эмиттер тогына сәйкес келеді, ал шығыс тогы коллектор тогына сәйкес болады.*

Барлық биполярлы транзисторлардың ішінде үлкен маңызға ие болғаны ОК-мен болған схемасы, мұнда кіріс тогы база тогына сәйкес келеді, ал шығыс тогы эмиттер тогына сәйкес келеді (3.7-сурет).

Бірақ қорек көзінің E_1 және E_2 мұндай жалғануы биполярлы транзистордың шығысында инверсті режим жұмыс пайда болдыртады, яғни *эмиттердің ток берілісінің дифференциалды коэффициентінің* мәнінің төмендеуіне әкеліп соғады, ал ол төмендесе база тогы берілісінің *β -дифференциалды коэффициентінің* төмендеуіне әкеледі.

Сондықтан тәжірибеде көбіне биполярлы транзистордың ОК-мен қосылу схемасы қолданылады, 3.8-суретте келтірілгендей және ол транзистордың дұрыс жұмыс істеуін қамтамасыз етеді, сонымен қатар I_b тогына сәйкес келетін $I_{к\text{ірі}}$ тогының және I_c тогына сәйкес $I_{\text{шығ}}$ тогының сақталуын қамтамасыз етеді.

ОК-мен болған схемада жүктеменің кедергісі $R_{\text{ж}}$ эмиттерлі тізбекке қосылғандықтан, бұл сұлбаны көп жағдайда *эмиттерлі қайталағыш сұлбасы* деп атайды.



3.8-сурет. ОК биполярлы транзистордың қосылу сұлбасы (эмиттерлі қайталағыш)

3.7. Биполярлы транзистордың жұмыс істеу режимдері

3.1-кесте

Бирполярлы транзисторлардың жұмыс істеу режимдері

Жұмыс режимі	Өткелдегі кернеу	Қасиеті
Қалыпты режимі (активті)	ЭП – тура КП – кері	Әлсіз сигналдардың күшейтілуі; $\max \alpha$; Күшейтілетін сигналдардың минималды ақауы
Терістеу режимі	ЭП – кері КП – тура	α -ның тұрақты режимдерімен салыстырғандағы айтарлықтай азаюы. Бірақ бұл режим сирек қолданысқа ие болады
Қанығу режимі	ЭП – тура КП – тура (транзистор толық ашық)	$R_{ж}$ таңдалған мәнінде шығысындағы ток максималды болады, және $I_{кпр}$ -мен басқарылмайды; сигнал берілісінің тізбегін тұйықтауға қолданылады
Қиылу режимі	ЭП – кері КП – кері	$I_{шығ} \approx 0$; сигнал берілісінің тізбегін тұйықтауға қолданылады

2-бөлімнің қорытындысы. Транзистор жоғары жиілікті токтарды жақсы күшейту үшін, ол өте жінішке базалы, коллектор ауысымдарының кішкене көлемді болуы және база кедергісіне ие болуы қажет. Тек диффузия есебінен база арқылы өзгеретін заряд тасымалдаушыларға ие транзисторлар – бездрейфолық транзисторлар деп аталады. Дрейфолық транзисторлар жақсы жиілік құрамына ие, яғни базалары бірдей емес примес концентрациясына ие: көбі шамамен эмиттерлі және азы шамамен коллекторлы.

Бұл жағдайда базада пайда болатын электр өрісі коллекторлы ауысымдардағы инжектрлі заряд тасымалдаушыларының жылдамдығын арттырады, осының есебінен транзистордың жиілік құрамы жақсарады. Эмиттер

жанындағы база қабатының төмен болуы кедергісінің айтарықтай көбеюіне әкеліп соғады. Бұл бізге транзистордың өте жіңішке базасын аз кедергі кезде алуға және коллектор ауысымдарының аз көлемінде алуға мүмкіндік береді.

Осының арқасында сонымен қатар электр өрісінің жылдамдығының артуына байланысты, дрейфолық транзисторларда грандық жиілік 2000 МГц-ке дейін жетеді. Эмиттерлі ауысымға салынған тура кернеу арқасында потенциалды барьер төмендейді, базаға электрондар инжектрленеді. Базаға инжектрленген электрондар коллектор ауысымдарына қарай ауысады. Базамыз өте жіңішке болғандықтан және негізгі заряд тасымалдау концентрациясындағы тесіктер өте төмен орналасқандықтан, базаға инжектрленген барлық электрондар коллекторлы ауысымға жетеді және ауысым полясымен коллекторға қарай өте отырып, басқарылатын ток коллекторын түзеді.

Базада қайта қалпына келген инжектрленген электрондардың бір бөлігі эмиттер тогының $I_{э,рек}$ қайта қалпына келтірілген бөлігін түзеді, яғни ол база тізбегі арқылы тұйықталады. База тізбегі арқылы тұйықталған $I_{э,рек}$ тогының бір бөлігі, яғни диффузия тесіктері арқылы түзілген және кері ток коллектор ауысымдарының $I_{КБ0}$ өзгеруіне әкеледі. Соңғысы құрама токтарға $I_{э,д}$ және $I_{э,рек}$ бағытталған.

4. ӨРІСТІК ТРАНЗИСТОРЛАР

Тәжірибелік сұлбаларда электрондық құрылғылар көмегімен шешілетін барлық есептер, нақты мәнінде, заряд тасымалдаушылардың ағынын басқаруға тіреледі. Қандай да бір құрылғыда, барлық шарттары бірдей болса, басқару қуаты және тізбек тогы үнемдісі таңдалады.

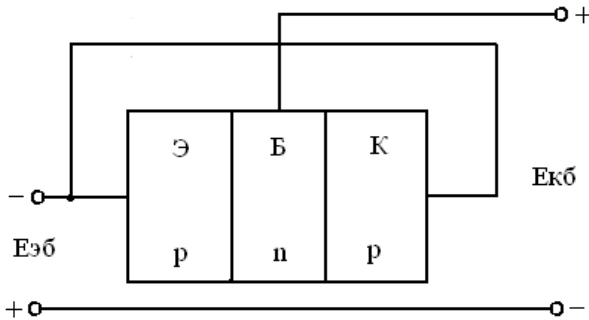
ОЭ сұлбасы бойынша қосылған биполярлы транзисторларда салыстырмалы түрде кіріс кедергісі аз, сондықтан басқару тізбегінде үлкен токтар ағады және заряд тасымалдаушыларды басқаруға елеулі түрдегі қуат қажет. Бұл қасиет әсіресе қатты ОБ сұлбаларында байқалады. Сондықтан келесідей мәселе туады: үлкен кіріс кедергісі және заряд тасымалдаушылар ағынын басқару үшін кірісінде аз ток пен қуат пайдаланатын жартылай өткізгіш құрылғы жасап шығару.

Мұндай мәселені қалай шешуге болады, яғни үлкен кіріс кедергісі бар жартылай өткізгіш құрылғы ойлап табуды? Биполярлы транзисторда қалыпты жағдайда:

- эмиттерлік кірісі ашық (тура кернеу қойылған);
- потенциалды тосқауыл компенсацияланады;
- кіріс кедергісі азаяды.

Кіріс кедергісін үлкейту үшін кіріс $p\bar{n}$ -өткелі жабық болуы тиіс, демек кері кернеуге ие болуы қажет. Бұл мәселе – кері кернеуі бар кірісі $p\bar{n}$ -өткелді құрылғыны жасаутек *өрістік транзистор* көмегімен шешілуі мүмкін.

Өрістік транзистордың жұмыс жасау қағидасын жақсырақ түсіну үшін биполярлы транзисторды қарастырайық, мысалы базадағы көлденең қимасының екі шығысына қорек көзі орналастырылған *pnp-minni*, ал коллектор және эмиттермен бірге жалғанған және базаға негізделген $p\bar{n}$ -өткеліне кері кенеу беріледі (4.1-сурет).



4.1-сурет. Биполярлы транзистор негізіндегі n -арнасы бар өрістік транзисторды жасауды сұлбасы

Базадағы қоспалардың шоғырлануы эмиттер мен коллекторға қарағанда әлдеқайда төмен, сондықтан кері кернеу берілген кезде pn -өткелі негізінен базада орналасады. Кері кернеу берген кезде қоспаның концентрациясы әртүрлі болса, pn -өткелі қоспа концентрациясы аз аумаққа қарай кеңейеді. Өткелмен толтырылмаған базадағы аймақ ток өткізгіш арна болып табылады.

pn -өткеліне берілетін кері кернеу ұлғайған сайын:

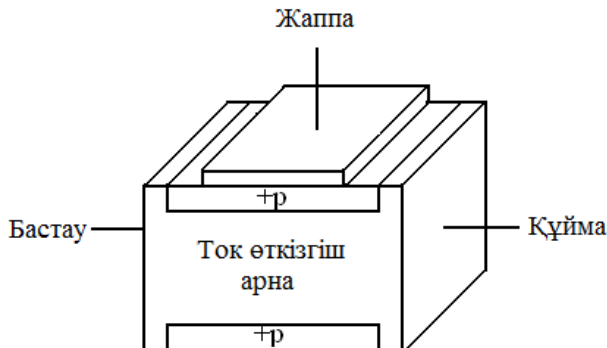
- pn -өткелінің ені артады;
- ток өткізгіш арнаның қимасы кемиді, ол кедергінің үлкеюіне әкеледі.

Осылайша, берілген құрылғыны басқару pn -өткеліне берілетін кері кернеудің өзгерісіне әкеледі және ток өткізгіш арнаның кедергісі және ол арқылы ағатын ток өзгеріске ұшырайды.

Кіріс pn -өткелі кері кернеумен қосылған – оның кедергісі үнемі үлкен болып қалады, яғни басқару үшін ток пен қуаттың қажеті шамалы (егер pn -өткелінің негізгі емес тасымалдаушыларының елеусіз кері тогын есептемесек).

Жоғарыда айтылған ойдың тәжірибелік түрде жүзеге асуын қарастырайық.

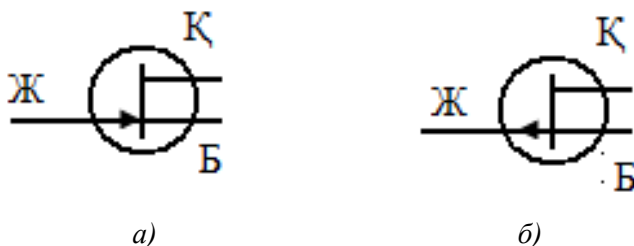
Басқарушы pn -өткеліне берілетін, кері кернеудің өзгерісі арқылы жүзеге асатын өрістік транзистор n -типті ток өткізгіш арнадан және екі шығыстан тұрады. Олар *құйма және бастау* деп аталады (4.2, 4.3-суреттер).



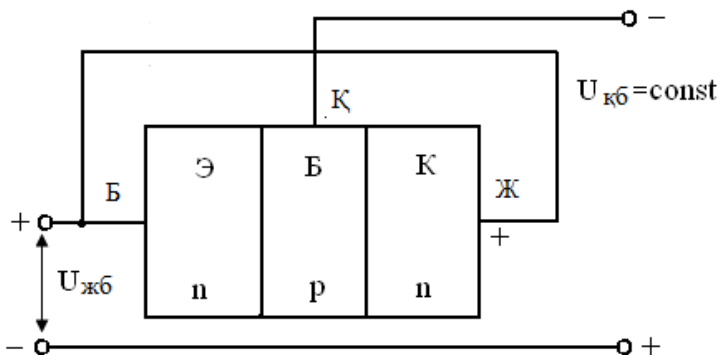
4.2-сурет. Басқарушы pn -өткелі бар өрістік транзистор құрылғысы

Ток өткізгіш арна p -типті, екі pn -өткел түзетін бірдей өткізгіштік түрдің екі аймағының арасында орналасады. Бұл аймақтар өз арасында жалғанады және бір шығысқа – *жаппа* ие болады.

Ток өткізгіш p -арнасы бар өрістік транзисторлар (4.4-сурет) n -типті екі аймақ арасында орналасқан. Осылайша, ток өткізгіш арна және оны қоршайтын бірдей өткізгіш аймақтар екі pn -өткел түзеді. «Бастау» және «құйма» электродтарына құятын арнаның аймақтарында олардың кедергісін төмендету үшін, сәйкесінше кернеудің түсуін кеміту үшін қоспалардың жоғарылатылған шоғыры пайда болады.



4.3-сурет. Басқарушы pn -өткелі бар өрістік транзистордың шартты белгіленуі а) n -арнамен; б) p -арнамен



4.4-сурет. Биполярлы транзистор негізіндегі n-арнасы бар өрістік транзистор құрылғысы

$U_{жб}$ кері кернеуін жаппа-бастау нүктелерінде тұрақты $U_{кб}$ кернеуі арқылы өзгертеміз.

$U_{жб}$ кернеуі арнаның қалыңдығын басқарады, демек кедергісін де.

$U_{жб}$ кернеуінің ұлғаюымен арнамыз жұқара береді, ал оның кедергісі үлкейеді және тұрақты $U_{кб}$ кернеуде $U_{кб}$ жаппаның (кіріс) тогы $I_{скішірейеді}$. $U_{жб}$ кернеуінің мәндерінің кейбір өзгерісінде арна жабылады. Бұл кернеу *қиылу кернеуі* $U_{кб.қиылу}$ деп аталады.

Осылайша, құйма тогы – арнадағы электр өрісі әсерінен ағатын негізгі заряд тасымалдаушылардың тогы, демек дрейфтік ток.

Жаппа тогы тек бір белгілі заряд тасымалдаушылармен негізделетіндіктен, өрістік транзистор *униполярлы* жартылай өткізгіш құрылғы болып табылады.

4.1. $U_{БК}$ кернеуінің арна қимасына әсері

$U_{жб}=0$ және $U_{кб}=0$ кернеуі кезінде *pn-өткелдердің* электр өрісі біртекті және арна қалыңдығы барлық ұзындықта бірдей.

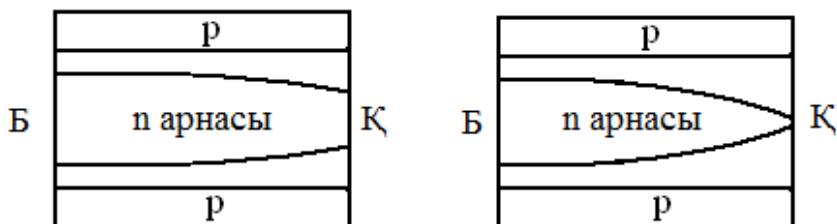
Егер санақ басы деп бастауды алсақ, арнаның кедергісі әрбір нүктеде, сол нүктеден бастауға дейінгі арақашықтыққа байланысты әртүрлі болып келеді. Жаппаға неғұрлым жақын

болған сайын, кедергісі соғұрлым жоғары, максимал кедергіге арна жаппаның маңайында ие болады.

Жаппаның тогы, арна бойымен бастаудан жаппаға дейін аға отырып, арнаның ұзындығы бойымен бастауда 0-ге және жаппада максимал мәнге дейін өзгертін кернеудің төмендеуін туғызады.

$U_{кб}$ кернеуі «+» қосылған арнаның n -аймағына қойылған (немесе «-», егер арна p -типті), сәйкесінше $U_{си}$ кернеу жаппа-арна pn -өткелінде кері болады. $U_{жб} > 1$ кернеуімен қосыла отырып, $U_{си}$ кернеуі pn -өткелінің қалыңдығының үлкеюіне және арнаның қимасын кемітуге себепші болады. Кері кернеудің үлкен мәнге ие нүктелерінде pn -өткелі кеңірек, ал арнамыз тар болады. Демек, арнаның ұзындығы бойынша бастаудан жаппаға қарай қимасы өзгеріп отырады.

$U_{кб}$ кернеуінің, тұрақты кернеу $U_{жб}$ кезінде, үлкеюі арнаның ең тар нүктесіндегі қима кернеуінің мәніне жетуі мүмкін және арна жабылады (4.5-сурет). Осылайша, $U_{кб}$ кернеуінің өзгерісі ток өткізгіш арна қимасының өлшеміне әсерін тигізеді. $U_{кб}$ кернеудің үлкеюімен арнаның қимасы кеми түседі, себебі ол кернеу pn -өткелі үшін кері болып табылады.

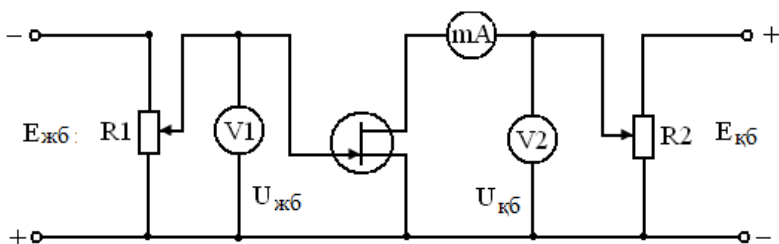


4.5-сурет. $U_{кб}$ және $U_{жб} = \text{const}$ кернеулерінің әсерінен арна қалыңдығының өзгеруі

4.2. Басқарушы *pn*-өткелі бар өрістік транзистордың статикалық сипаттамалары

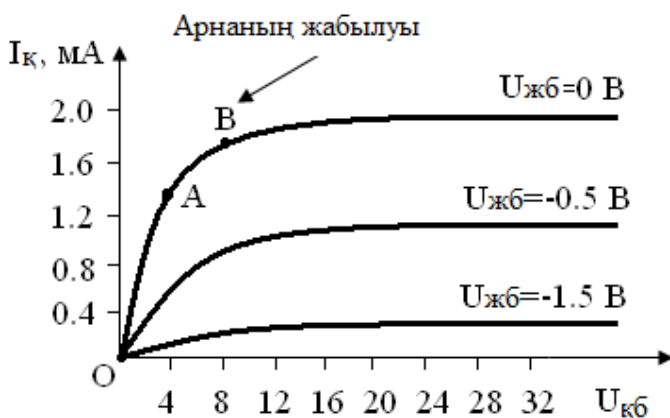
Өрістік транзистордың қосылуының үш сұлбасы бар: ОБ (ортақ бастаумен), ОҚ (ортақ күйма) және ОЖ (ортақ жаппамен).

ОБ сұлбасының сипаттамаларын қарастырайық (4.6-сурет).



4.6-сурет. Басқарушы *pn*-өткелі бар өрістік транзистордың статикалық сипаттамаларын алуға арналған сұлба

Шығыс сипаттама $-U_{жб} = \text{const}$ кезіндегі $I_k = f(U_{кб})$ графикалық кескінделген тәуелділік (4.7-сурет).



4.7-сурет. Басқарушы *pn*-өткелі бар өрістік транзисторлардың шығыс сипаттамалары

Жаппалық сипаттамаларды алу үшін кернеуді $U_{кб}$ өзгертеміз, басқарушы кернеу $U_{жб}$ тұрақты болады және әрбір кернеудің мәніне сәйкес кіріс тогын орнатамыз.

$U_{жб}=0$ кезіндегі сипаттаманы қарастырайық.

ОА аймағында токтың $U_{кб}$ кернеуге сызықтық тәуелділігі байқалады. Кернеудің ұлғаюымен бастаудан жаппаға дейінгі заряд тасымалдаушылар қозғалуының жылдамдығы өседі, арнаның тарылуы кернеудің өсуі әсерінен елеусіз болады, жаппа тогы аз.

АВ аймағында жаппа тогы ұлғаяды, ал арнадағы кернеу қатты төмендейді, сәйкесінше ол жаппа жаққа қарай тарылып, арнаның кедергісі өседі, ток жылдамдығы төмендейді, сипаттамасы жазық бола бастайды. Осылайша, жаппа тогының үлкеюі жылдамдығының төмендеуінің негізгі себепшісі болып табылады.

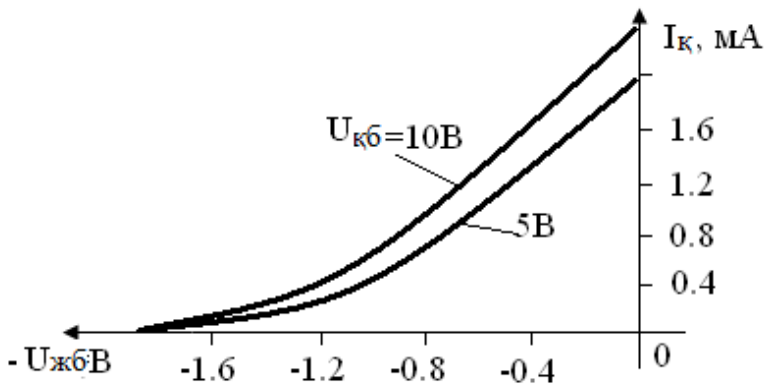
$U_{си}$ кернеудің өсуіне қарамастан, В нүктесінен аймақта жаппа тогының өсуі тоқтайды. В нүктесінде арнаның максималды тарылуы болады, оны шартты түрде *арнаның жабылуы* деп атайды.

Бастау мен жаппа арасындағы арнаның жабылуы кезіндегі кернеу – *қанығу кернеуі* деп аталады, ал жаппа тогы $U_{кб} > U_{кб.кан}$ кернеу кезінде $U_{кб}$ кернеуінен тәуелсіз және жаппа тогын *қанығу тогы* деп атайды.

Әр транзистор үшін *pn*-өткелдің электрлік сынуы және кенет бастау тогы ұлғаятын $U_{кб}$ кернеуі болады. Ескеру керек, *pn*-өткелге кері $U_{кб} + U_{жб}$ кернеуі беріледі, сондықтан $U_{жб}$ кернеуі үлкен болса, $U_{кб}$ кернеуі сынуға әкелмейді.

Кіріске $U_{жб}$ кері кернеу берілген кезде, $U_{кб}=0$ кернеу жағдайында арна қимасы азаяды, ал арна кедергісі ұлғаяды. Сондықтан сипаттаманың бастапқы аймағы қуысты болады.

$U_{зи}$ кернеуі үлкен болса, қанығу $U_{кб}$ кернеуінің аз мәнінде болады. Кері кернеу үлкен болса, шығыс сипаттама төменірек орналасады, себебі арна кедергісі ұлғаяды және бастау тогы төмендейді. Өрістік транзистордың беріліс сипаттамасы $-U_{кб} = \text{const}$ кезіндегі $I_k = f(U_{жб})$ тәуелділігі (4.8-сурет).



4.8-сурет. Басқарылатын np -өткелді өрістік транзистордың беріліс сипаттамасы

$U_{жб}=0$ кернеуі кезінде құйма тогы максималды болады, демек арнаның кедергісі минималды.

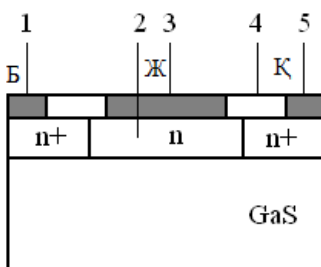
$U_{жб}$ ($U_{кб}=\text{const}$) кернеуінің үлкеюі кезінде құйма тогы кемиді. $U_{жб}=U_{жб.кан}$ кернеуінде арна жабылады, құйма тогы нөлге тең. Негізгі емес заряд тасымалдаушылардың елеусіз тогы ағады. Осылайша, беріліс сипаттамасы кіріс кернеуін өзгерту арқылы құйма тогын басқарудың тиімділігін анықтайды.

Қорытынды. Өрістік транзистор – электрлік өріспен басқарылатын және өткізгіш арна арқылы өтетін негізгі тасымалдаушылардың ағынына күшейткіштері негізделген жартылай өткізгіш құрылғы. Биполярлы транзистормен салыстырғанда, өрістік транзисторды кейде униполярлы деп атайды, себебі оның жұмысы тек негізгі заряд тасымалдаушыларға негізделген – электрон немесе кемтік. Сондықтан өрістік транзисторда көлемді негізгі емес заряд тасымалдаушылардың шоғырлануы мен сорып алуы болмайды. Өрістік транзистордың тогын құратын заряд тасымалдаушыларды қозғалысқа келтірудің негізгі әдісі электрлік өрістегі дрейф. Өрістік транзистордың жұмыс тогы

туындайтын өткізгіш қабат арна деп аталады. Өрістік транзистор – ток (биполяры транзистор) емес, кернеу (электрлік өріс) басқаратын күшейткіш құрылғы, осыдан да аты – өрістік деп аталады, ол өткізгіш арнаның көлденең қимасының ауданын өзгертеді, нәтижесінде өрістік транзистордың шығыс тогы өзгереді. Электрлік өрісті басқару статикалық кіріс тогының болмауына әкеледі, ол транзисторды басқаруға қажетті қуатты азайтуға мүмкіндік береді.

4.3. Шоттки өткелі бар өрістік транзисторлар

Басқарушы өткелден бөлек өрістік транзисторларда Шоттки өткелі де қолданылады (4.9-сурет).



4.9-сурет. Шоттки өткелі бар өрістік транзистор

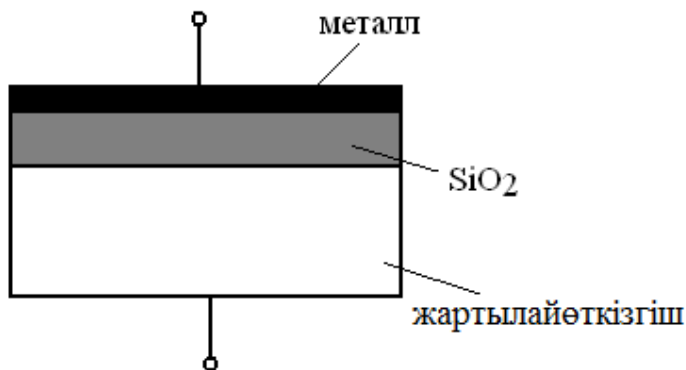
Бұл транзисторлар әдетте галий арсениді негізінде жасалынады. Астында галий арсенидінен арнаның (2) рөлін атқаратын n -өткізгішті қабат орналасқан. Бұл қабаттан 1 бастау мен 5 құйма шығыстары жасалынған. Арнаның беткейі диэлектрикпен (4) жабылған. Олардың арасында металл жаппа (3) орналасқан.

Металл жаппа n -өткізгішке қарағанда үлкенірек шығыс жұмысына ие, нәтижесінде түзеткіш қасиеттері бар өткел түзіледі. Бұл транзистордың жұмыс істеу принципі pn -өткелді басқарушы транзисторға ұқсас. Кері кернеудің өзгерісі кезінде арна мен жаппа арасында арнаның кеңдігі өзгереді, оның

өтімділігі мен құйма тогы I_k . Металл жаппаны қолдану арнаның ұзындығын 0,5–1 мкм-ге дейін төмендегенде мүмкіндік береді, демек электрондардың құймадан бастауға қарай жүрісінің уақытын да береді. Электрондардың галий арсенидіндегі қозғалғыштығы кремний кристалындағыға қарағанда 3–4 есе көп. Осы екі жағдай берілген транзистордың шекаралық жиілігін 50–80 ГГц-ке дейін көтеруге мүмкіндік берді.

4.4. Индукцияланатын арнасы бар МДЖ-транзистор құрылғысы

Басқарушы *pn*-өткелі бар өрістік транзисторлардың $R_{\text{кпр}}$ шығыс кедергісі өте жоғары. Алайда бұл кедергіні одан әрі үлкейтуге мүмкіндік бар, ол жаппаны арнадан диэлектрикпен бөлу қажет. Изоляцияланған жаппасы бар өрістік транзисторларда *металл–диэлектрик–жартылайөткізгіш* құрылымы қолданылады (МДЖ). Басқаша айтқанда, берілген құрылымды екі пластинасы металл мен жартылайөткізгіш болатын конденсатор ретінде қарастыруға болады (4.10-сурет).

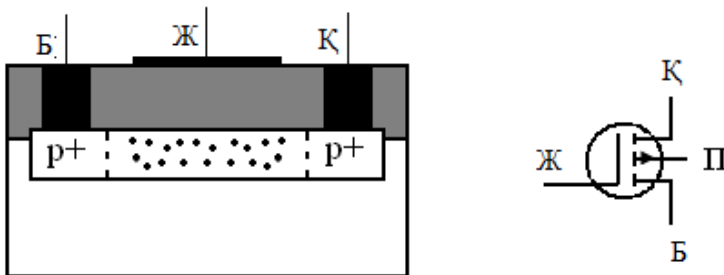


4.10-сурет. Металл–диэлектрик–жартылайөткізгіш құрылымы

Жартылайөткізгіш ретінде кремнийді қолданамыз, сондықтан диэлектрик рөлін SiO_2 кремнийдің екі валентті қышқылы атқарады, ол кремний кристалының беткейінде жоғары

температуралы қышқылдану арқасында пайда болады. Диэлектриктің бұл қабатына металл қабықша – жаппа қойылады.

Мұндай құрылымда тағы да МҚЖ (*металл–қышқыл–жартылайөткізгіш*) деп атайды. Мұндай транзисторлардың жұмыс істеу принципі келесі құбылысқа негізделген (4.11-сурет).



4.11-сурет.МҚЖ транзистрларының индукцияланған арнасы бар құрылымы және оның сызбалық белгіленуі

Егер электрлік кернеу көзінің «+» берсек, онда теріс зарядпен компенсацияланған оң заряд пайда болу керек, ол жартылай өткізгіштегі конденсатордың қарама-қарсы қабатында электростатикалық индукция арқылы берілген. Егер *n*-типті жартылай өткізгішті алсақ, онда теріс заряд диэлектрикпен шекарадағы жартылай өткізгіш бетіне тартылатын электронды құрады. Жаппада оң потенциал жоғары болған сайын, *n*-жартылай өткізгіштің бетінде көбірек электрон шоғырланады. Заряд тасымалдаушылардың өсуі жартылай өткізгіштің бетіндегі қабаттың электрөткізгіштігінің ұлғаюына әкеледі.

Егер жаппаға электр кернеуінің көзінің «-» берсек, жаппада жартылайөткізгіш бетінің диэлектрикпен шекарасында сондай оң зарядпен өтетін теріс заряд пайда болады.

Ол электрондардың беткейден тебілуінің есебінен болады, демек заряд тасымалдаушыларының диэлетрикпен шекарасындағы жартылай өткізгіш бетінен кетуі және онда оң ион-атомдардың қабатының түзілуіне әкеліп соғады.

Осылайша, жартылайөткізгішпен диэлектрик арасындағы шекарада заряд тасымалдаушылардың *кедейленген қабаты* пайда болады. Бұл қабаттың электр өтімділігі төмендейді, ал кедергісі

үлкейеді. Басқарушы кернеудің мәні мен полярлығын өзгерте отырып, қабаттың кедергісі мен электр өтімділігін өзгертуге болады. Изоляцияланған жаппасы бар өрістік транзисторлардың екі түрі бар *индукцияланатын арнасы бар және орнатылған арнасы бар*.

4.4.1. Индукцияланған арнасы бар МДЖ-транзисторларының жұмыс істеу принципі

Индукцирленген арнасы бар МДЖ-транзистордың негізі n -өткізгішті кремнийдің монокристалы болып табылады. Мұнда екі жоғары ($P+$)– концентрациялы бастау және ағын пайда болады. Жаппа диэлектрик-кремний қышқылы ($0,1-0,2$ мкм) бетіне бүрку әдісі арқылы жасалатын металдың (алюминий) жіңішке үлдірінен тұрады.

$U_{жб}$ кернеуі жоқ болса, ток өткізгіш арна болмайды. Бастау мен құйма арасына кернеу берейік, « $\rightarrow$ »-ты құймаға береміз.

1. Егер кернеу $U_{жб}=0$ болса, онда құйма мен бастау арасында құйманың p -аймағы мен n -астардың арасында туындаған және кері кернеуге қосылған pn -өткелдің негізгі емес заряд тасымалдаушылардың мәнсіз кері тогы өтеді.

2. Егер құйма мен бастау арасына « $\rightarrow$ » таңбалы $U_{жб}$ кернеуді жаппаға жіберсек, онда n -аумақтың (электрондар) негізгі заряд тасымалдаушылар жартылай өткізгіштің түбіне тартылады және жаппадағы теріс зарядтың компенсациясы оң ионның заряды арқылы орындалады, нәтижесінде диэлектрикпен шектескен жартылай өткізгіштің бетінде заряд тасымалдаушылардың қозғалысты кедейленген қабаты туындайды. Теріс зарядты компенсациядағы жаппада потенциалды ұлғайтсақ, онда тек оң иондар ғана емес, кемтіктер де, n -аумақтағы негізгі емес зарядтар және құйма мен бастаудың p -аумақтағы кемтіктері қатысады.

Осылайша, диэлектрикпен n -типті монокристалдың шекарасында p -типті ток өткізгіш арна пайда болады.

Инверсия – жартылай өткізгіштің беткейлік қабаты өткізгіштік типін қарама-қарсыға ауыстыратын құбылыс.

Инверсті қабат – n -аймақта пайда болатын диэлектрикпен шекарада түзілетін p -типті қабат.

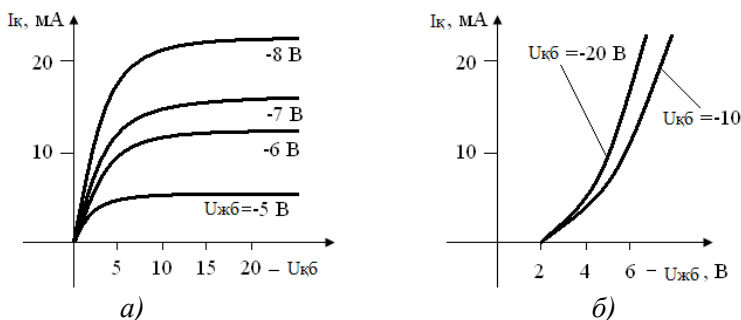
Осылайша бастау (p -өткізгіштік) пен құйма (p -өткізгіштік) арасында p -өткізгішті ток өткізгіш арна пайда болды. Бұл арна электростатикалық индукция нәтижесінде түзілгендіктен, ол арна *индуцирленген арна* деп аталады.

Салдары: жаппадағы теріс потенциал абсолют шамасы бойынша неғұрлым көп болса, арнада соғұрлым көп заряд тасымалдаушылар пайда болады.

Байыту – арнадағы заряд тасымалдаушылар санының өсу процесі.

Кедейлену – арнадағы заряд тасымалдаушылардың санының кему процесін айтамыз.

Осылайша, окшауланған жаппасы бар және индуцирленген арнасы бар өрістік транзисторлар тек қана байыту режимінде ғана жұмыс істей алады (4.12-сурет).



4.12-сурет. Индуцирленген арнасы бар МДЖ-транзистор:

а – шығыс сипаттамалары; б – беріліс сипаттамалары

Негізгі сипаттамалары– ең алдымен шығыс сипаттамалары $I_k = f(U_{кб})$ кезінде $U_{жб} = \text{const}$ (4.12, *а*-сурет) және беріліс сипаттамалары $I_k = f(U_{жб})$ кезінде $U_{кб} = \text{const}$ (4.12, *б*-сурет).

$I_k = f(U_{кб})$ шығыс сипаттамалары басқарылатын pn -өткелдің транзисторы секілді түрге ие. Салыстырмалы кіші $U_{кб}$ кернеу мен оның ұлғаюы кезінде және бастаудан құймаға заряд тасымалдаушылардың орын ауыстыру жылдамдығы ұлғайған кезде I_k тоғы ұлғаяды. Бір уақытта бастаудан құймаға дейін индуцирленген арнаның сығылу үрдісі жүреді (арнаның $R_{жалпы}$

кедергісі ұлғаяды, ал токтың өзгеру жылдамдығы азаяды, сипаттамасы сызықты емес болады).

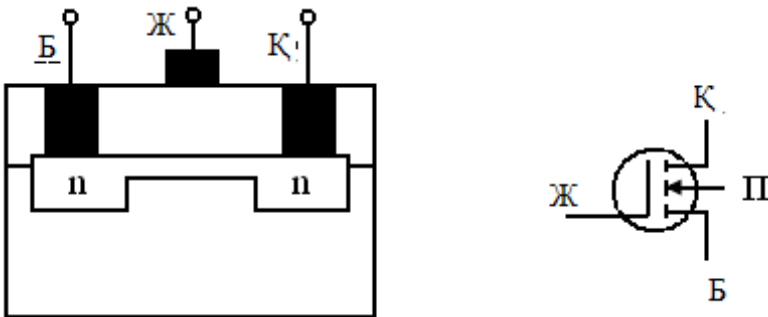
$U_{кб}$ кернеуі кезінде қанығу режимі орын алады, себебі арна толықтай жабылады және үлкен кедергімен кішкене ғана қашықтық қалады, I_k кезінде $U_{кб}$ өсуін қамтамасыз етеді. $U_{жб}$ аз мәндерінде кемтік тасымалдаушылардың саны кемиді және қанығу $U_{жб}$ кернеудің аз ғана мәнінде болады.

$U_{жб}=0$ кернеуінде алынған кернеу жойылады, себебі инверсия орын алады, сәйкесінше арна кернеудің белгілі бір $U_{жб}<0$ мәнінде индуцирленеді. $|U_{кб}| + |U_{жб}| > U_{кб,тесілу}$ кезінде pn -өткелінің тесілуі орын алады және I_k ток тез өседі.

Беріліс сипаттамасы аналогты басқарушы pn -өткелі бар өрістік транзисторлардан айырмашылық жасайды.

4.5. Орнатылған арнасы бар МДЖ-транзистор

Берілген типтегі өрістік транзисторда бастау мен құйма арасында қосапының аз ғана концентрациясы бар жіңішке арна(көбінесе n -типте) бар (4.13-сурет). Қабат асты ретінде p -типтің кремний монокристалы болады. Арна металдық жаппадан диэлектрлік үлдір арқылы бөлінген. Заряд тасымалдаушылардың тығыздығы мен арнаның көлденең қимасының өзгеруін басқару қағидасы индуцирленген арналы транзисторлардағы секілді электростатикалық индукция құбылысымен байланысты.



4.13-сурет. Орнатылған арнасы бар МДЖ-транзистордың құрылғысы мен оның сызбалық белгіленуі

Кернеу $U_{кб}=0$ -ге тең. N -арнасы үшін $U_{жб}$ кернеуінің мәні мен полярлығын өзгертетін боламыз.

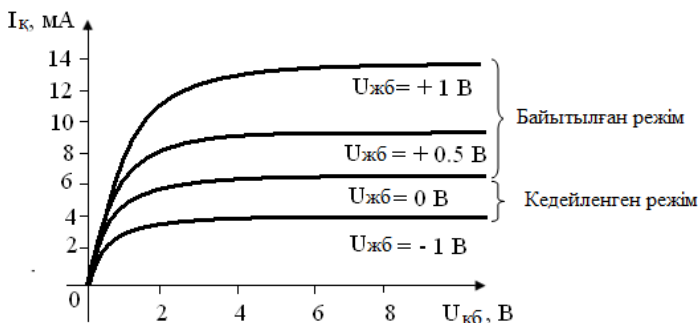
Жаппадағы оң потенциал үшін электрондар арнаға (құйма мен бастаудың қабатынан, қабат астынан негізгі емес тасымалдаушылар) тартылатын болады. Негізгі заряд тасымалдаушылармен арнаның байытылуы жүреді, электр өтімділігі үлкейеді және кедергісі кемиді.

Жаппадағы теріс потенциалда элеткростатикалық индукция арқасында электрондар арнадан тебілетін болады және астыңғы қабаттан бір мезетте кемтіктер тартылатын болады. Кейбір кернеу мәнінде сипаттама өзгертін болады, n -арнаның орнына p -арнасы пайда болады.

$U_{кб}$ кернеуін берейік. Құйма тогы I_k оң таңбалы жаппадағы мәнімен ағады, демек бұл режимде арнаның байытылуы болады. Осылайша, оқшауланған жаппасы бар және орнатылған арнасы бар өрістік транзисторларда байыту және қанығу режимінде де жұмыс жасай алады, яғни кіріс кернеудің әртүрлі полярлығы кезінде орындалады.

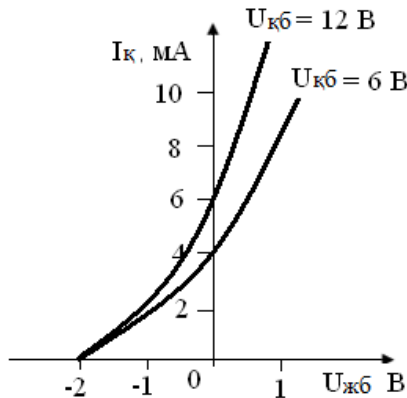
4.5.1. Орнатылған арнасы бар МДЖ-транзисторларының статикалық сипаттамалары

Шығыс сипаттамалары. Жаппа тогының I_k өзгеруінің жалпы сипаттамасы өзгертін $U_{кб}$ кернеуі және тұрақты $U_{жб}$ кернеуде басқа өрістік транзисторлардың типімен ұқсас (4.14-сурет).



4.14-сурет. Орнатылған арнасы бар МДЖ-транзисторларының шығыс сипаттамалары

Беріліс сипаттамалары. Байыту режимінде $U_{кб}$ тұрақты кернеуі мен $U_{жб}$ кернеуі ұлғайған сайын құйма тогы I_k өседі (4.15-сурет), себебі арнаның электр өткізгіштігі өседі. Кедейлену режимінде кері процесс жүреді. Кернеудің шектік мәніне жеткен кезде құйма тогы I_k 0-ге тең болады.



4.15-сурет. Орнатылған арнасы бар МДЖ-транзисторларының беріліс сипаттамалары

4.6. Оқшауланған жаппасы бар өрістік транзисторлардың негізгі параметрлері

Құйма I_k тогына екі $U_{жб}$ және $U_{кб}$ кернеудің өзгеруі әсерін тигізеді. Олардың тұрақты болуы немесе ұлғаюы құйма тогының азаюына әкеледі.

Тікмігі – $U_{кб} = \text{const}$ кезінде және $U_{жб}$ кернеуі 1В-қа өзгергенде, құйма тогының қандай мәнге өзгергенін көрсететін сан. Ол келесі формуламен анықталады.

$$S = \partial I_k / \partial U_{жб} \text{ болған кезде } U_{кб} = \text{const (mA/V)}. \quad (4.1)$$

Сонымен қатар, МДЖ-транзистордағы тұнықтыққа диэлектриктің қабат қалыңдығы әсер етеді: диэлектрик қабаты азайса, $U_{жб}$ кернеуінің мәні өзгермеген кезде өрістің шиеленісі арта түседі және құйма тогының I_k қадамы артады.

Күшейту коэффициенті (μ): кернеуді қаншаға өзгерту керектігін көрсететін санмен белгіленеді, $U_{жб}$ -ді $1В$, ол кезде құйма тогы I_k өзгеріссіз қалуы керек. Әдетте күшейту коэффициенті $10 - 100$ бірлікті құрайды.

Шығыс кедергі: $U_{жб} = \text{const}$ кезінде $U_{си}$ кернеуінің өзгерісі I_k токқа әсерін көрсетеді және ондаған $k\Omega$ -ды құрайды.

$$R_{шығ} = \partial U_{жб} / \partial I_k \text{ немесе } R_{шығ} = \Delta U_{жб} / \Delta I_k U_{жб} = \text{const.} \quad (4.2)$$

Кіріс кедергі: $U_{жб} = \text{const}$ кезінде $U_{жб}$ -дің өзгеруінің $I_{ж}$ -ге әсерін көрсетеді. Ол келесі формуламен анықталады:

$$R_{кір} = \partial U_{жб} / \partial I_{ж} \text{ немесе } R_{кір} = \Delta U_{жб} / \Delta I_{ж} U_{жб} = \text{const.} \quad (4.3)$$

$U_{жб}$ кернеуінің үлкен өзгерулері кезінде жаппаның тогының өзгерісі $I_{ж} \approx 0$, яғни $R_{кір}$ үлкен ондаған $M\Omega$.

Өрістік транзистордың сипаттамалары келесі теңдікпен байланысқан

$$\mu = R_{шығ} \cdot S, \quad (4.4)$$

$R_{шығ}$ және S параметрлерін шығыс сипаттамалары арқылы анықтауға болады.

4.7. Өрістік транзисторлардың жиіліктік қасиеттері

Биполярлы транзистормен салыстырғанда, өрістік транзисторларда негізгі тасушылардың инжекциясы болмайды және осы үрдіспен байланысқан зарядтардың жинақталуы мен инерциялығы және олардың сорып алуы болмайды.

Жоғарыда электрод аралық сыйымдылықтардың ЖЖ кезінде транзистордың жұмысына әсері көрсетілген. Бұл сыйымдылықтан басқа, ЖЖ-ке басқарылатын $p\text{-}n$ -арналы өрістік транзистордағы жаппа-арна $p\text{-}n$ -арнасының тосқауыл сыйымдылығы әсер етеді.

$U_{жб}$ кернеуінің өзгеруі кезінде осы сыйымдылықтардың арна кедергісі арқылы қайта зарядталуы жүреді. Осы қайта зарядтау тізбегінің тұрақты уақытына $\tau = C_{зк} \cdot R_{кан}$ өрістік транзистордың инерттілігі және шапшаңдығы тәуелді болады.

Өрістік транзистордың шекаралық жиілігі:

$$f=1/2\pi\tau K=1/2\pi\cdot C_{жб}\cdot R_{арна}. \quad (4.5)$$

Осылайша жаппа-арна сыйымдылығы және арна кедергісі неғұрлым аз болса, шекаралық жиілік соғұрлым көп. Өрістік транзистордың жиіліктік қасиеті арнадағы негізгі заряд тасымалдаушылардың қозғалысына байланысты және ол құйма мен бастауға осы тасымалдаушылардың орын ауыстыру уақытымен байланысты. Сондықтан өрістік транзисторлардың жиіліктік қасиеттері *p*-арналыға қарағанда *n*-арналыда көп.

4.8. Өрістік транзисторлардың таңбалануы

Транзисторлардың таңбалануы 6 әріптік-сандық белгіленуді көздейді:

- бірінші символ – әріп немесе сан – шығыс материал;
- екінші символ – әріп құрылғының класын анықтайды (П–өрістік, Т– биполярлық);
- үшінші символ – 1-ден 9-ға дейінгі сан – энергетикалық немесе жиіліктік тәуелділікті анықтайды.
- төртінші және бесінші символдар – 01-ден 99-ға дейінгі сан – жобалаудың реттік нөмірін анықтайды;
- алтыншы символ– құрылғының белгілі бір параметрлері бойынша топтарға бөлу.

4-бөлім бойынша қорытынды: оқшауланған жаппасы бар өрістік транзисторлар басқарушы электроды токөткізгіш арнадан диэлектрик қабатымен ажыратылған жартылай өткізгіш құрылғы болып табылады. Әрине, қандай да бір құрылғыны тандағанда басым талғам барлығында бірдей жағдайларда басқаруға қуатты жұмсауы төмендеу және басқару тізбегіндегі тогы төмендеу болатынына беріледі. Индуцирленген арнасы бар өрістік транзисторлар тек байыту режимінде ғана жұмыс жасайды. Өрістік транзисторлардың негізгі артықшылықтары болып оның үлкен кіріс кедергілері және жоғары технологиялылығы жатады.

5.ТИРИСТОРЛАР ЖӘНЕ КҮШТІК ТРАНЗИСТОРЛАР

Тиристор дегеніміз екі тұрақты күйі бар, яғни жабық күйден ашық күйге немесе керісінше ауыса алатын жартылай өткізгішті аспап («тира» грекше – есік). Тиристор есік сияқты, электр тоғын өткізу үшін ашылады, ал электр тоғының жолын бөгеттеу үшін жабылады.

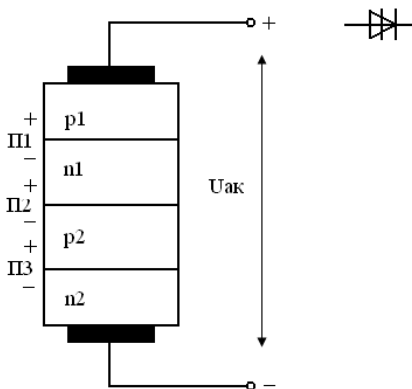
Қолданыс аясында тирситор деп – жартылай өткізгішті кілтті айтады, яғни негізгі міндеті сыртқы сигналдарды басқарған кезде жүктеме тізбегін тұйықтау және ажырату болып табылатын аспап. Тиристорлар байланыс және энергетика құрылғыларының электр қоректендіру тізбектерінде, әртүрлі автономды басқарылатын құрылғыларда жарықтандыруды реттеу мақсатында қолданылады.

Динистор – үш рп-өткелі бар диод типті электродты аспап.

Құрылымы бойынша динисторлар төрт және одан да көп жартылай өткізгіштен тұрады, биполярлы транзистор сияқты екі өткелдің орнына үш және одан да көп өткел құрайды. Шеткі р-аймақ *анод* деп аталса, ал шеткі n-аймақ – *катод* деп аталады.

5.1. Динистордың жұмыс істеу принципі

Динистор анодына «+», ал катодына «-» зарядты сыртқы кернеу берейік (5.1-сурет). Мұндай полярлықта сыртқы кернеуді қосу келесі түрде жүзеге асады.



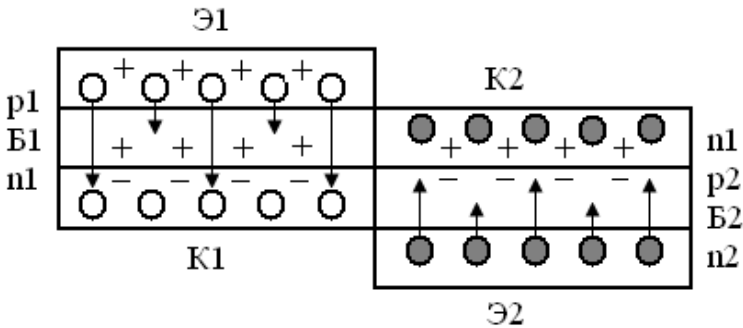
5.1-сурет. Динистордың құрылымы және шартты белгісі

Олай болса, шеткі өткелдер ашық, ал ортаңғы өткел жабық. Демек, динистор ортаңғы өткелдің үлкен кедергісіне байланысты жабық күйде болады.

Бұл жағдайда сыртқы кернеудің көп бөлігі үлкен кедергісі бар ортаңғы өткелге беріледі, ал кернеудің арзымайтын бөлігі кедергілері аз шеткі өткелдерге беріледі.

Динисторды pnp - және pnp -құрылымды екі биполярлы транзисторлар ретінде қарастырайық.

5.2-суретте көріп тұрғанымыздай, екі транзистор активті режимде жұмыс істеп тұр (тура жалғану). p_1 n_1 және p_2 n_2 эмиттерлі өткелдеріне тура кернеу, ал екі транзисторға да ортақ p_2n_1 -коллекторлы өткелге теріс кернеу беріледі. Эмиттерлі өткелдерге берілген тура кернеудің әсерінен p_1 және n_2 негізгі заряд тасымалдаушылары сәйкес p_1 және p_2 базаларына инжекцияланады.



5.2-сурет. Тиристордың құрылымы

pnp -транзисторындағы электрондар n_2 эмиттерінен p_2 базасына өткен кезде негізгі емес тасымалдаушыларға айналады. Осы электрондардың кейбір бөлігі базаға рекомбинацияланады, ал қалғаны тура кернеудің әсерінен n_1 коллекторына өтеді. Осының нәтижесінде n_1 аймағында артық теріс заряд пайда болады. Дәл осындай құбылыс pnp – транзисторында да жүреді, яғни p_2 коллекторында артық оң заряд пайда болады.

Бірақ бастапқыда теріс кернеудің есебінен n_1 және p_2 өткеліндегі шекара n_1 аймағындағы компенсацияланбаған оң заряд пен p_2 аймағындағы теріс заряды бар қос электрлік қабаттан

тұрады, олар өз кезегінде потенциалдық кедергі тудырады (сыртқы кернеу әсері жоқ рп-өткелінің қасиеттері).

Алайда p_1 -аймағындағы артық электрондар мен p_2 -аймағындағы кемтіктер (тура кернеудің әсерінен) тола отырып, p_2 p_1 өткелінің шекарасындағы потенциалды кедергіні төмендететін өзінің электрлік өріс (заряд) тудырады.

Анод пен катод арасындағы сыртқы кернеуді арттырғанда сәйкес транзистор коллекторына өтетін қозғалмалы заряд тасымалдаушылары да артады. Бұл p_2 және p_1 аймақтарындағы негізгі тасымалдаушылардағы артық зарядтардың артуына әкеп соғады, ол өз кезегінде p_2 өткеліндегі потенциалдық кедергінің толық компенсациясына дейін төмендетеді.

Коллекторлы өткелдегі теріс кедергі толық компенсациялағанда ол ашылады және оның кедергісі екі эмиттерлі өткелдегідей аз болып қалады. Динистр тогы күрт артады.

5.1.1. Динистор жұмысының математикалық анализі

рп-транзисторының эмиттерлік тогын I_{32} деп белгілесек, онда коллекторлы ток $I_{k2} = \alpha_2 I_{32}$ тең болады.

рп-транзисторының I_{31} болса, онда коллекторлы ток $I_{k1} = \alpha_1 I_{31}$ тең болады, мұндағы α_1 және α_2 – рп және рп транзисторларындағы токтың беріліс коэффициенті.

Алайда P_2 өткелі арқылы I_{k1} және I_{k2} басқа коллектордың I_{k60} кері тогы өтеді, олай болса коллекторлы өткелдегі жалпы ток мынаған тең:

$$I_{п2} = I_{k1} + I_{k2} + I_{k60} = \alpha_1 I_{31} + \alpha_2 I_{32} + I_{k60}. \quad (5.1)$$

Динистордың өткелдегі тізбектей жалғанғандықтан және динистордың екі шығысы болғандықтан қорытындылайтын ток және I_{31} және I_{32} токтары мынаған тең:

$$I = I_{31} = I_{32}. \quad (5.2)$$

(5.2) теңдеуін (5.1)-ке қоя отырып, келесі теңдеуді аламыз:

$$I = \alpha_1 I_{31} + \alpha_2 I_{32} + I_{k60}.$$

Математикалық өңдеулер жүргізе отырып, келесі теңдеуді аламыз:

$$I_{к60}=I-(I_{\alpha 1}+I_{\alpha 2})=I[1-(\alpha_1+\alpha_2)].$$

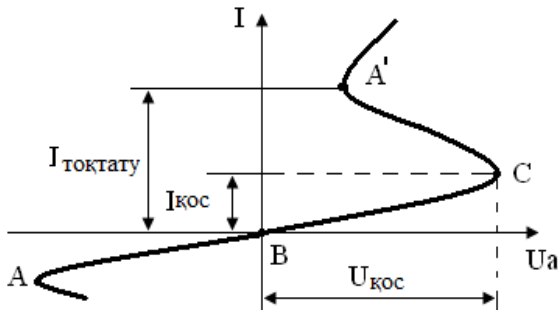
Соңында қорытындылайтын токтың теңдеуін аламыз:

$$I=I_{к60}[1-(\alpha_1+\alpha_2)]. \quad (5.3)$$

Қорытынды: Динистордың жабық күйнен ашық күйіне өтудің негізгі шарты эмиттерлік өтетін токтың артуынан α_1 және α_2 мәндерінің артуы болып табылады.

5.1.2. Динистордың вольт-амперлік сипаттамасы

Бұл сипаттама қорытындылайтын токтың анод пен катод арасындағы кернеудің өзгерісіне байланысты екендігін көрсетеді: $I=f(U_A)$ (5.3-сурет).



5.3-сурет. Динистордың вольт-амперлік сипаттамасы

BC аймағында Π_2 өткелінде кері кернеу және жабық күйде болғандықтан, қорытындылайтын ток аз.

C нүктесінде Π_2 өткеліндегі кері кернеудің компенсациясы жүреді, сондықтан динистор тогы артады. Π_2 өткелі ашылады. Транзисторлар қанығу режиміне өтеді де ток күрт артады, ал кернеу төмендейді.

A' нүктесінде төмен кернеу кезде (5.3-сурет) үш өткел ашық болады.

CA' аймағына теріс кедергі сәйкес келеді. Мұндай құбылыс туннельді диодтарда жүреді.

Сөйтіп, кернеудің U_a берілу аймақтарында екі майысу нүктелері бар:

C – бұл нүктедегі кернеу қосылу кернеуіне $U_{вкл}$ сәйкес келеді;

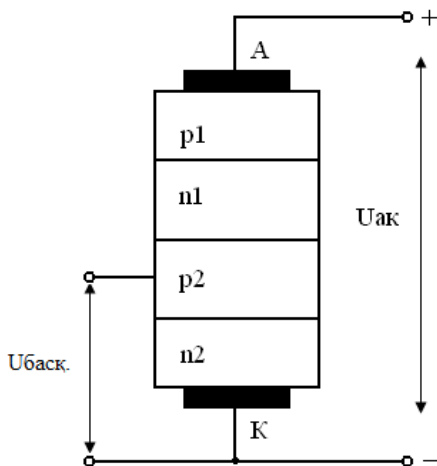
A – ұстап тұру тогына $I_{удерж}$ сәйкес келеді.

Кернеуді кері қосқанда жартылайөткізгішті диодтың кері қосылғандағы вольт-амперлік сипаттамасы байқалады.

5.2. Тринистордың жұмыс істеу принципі және құрылғысы

Тринистор – құрылымы төрт қабаттан тұратын, базалық аймағының бірінде басқарылатын кернеуді бере алатын басқарылатын электроды бар жартылай өткізгішті аспап.

5.4-суретте р₂шығыс аймағы жоқ динисторға ұқсас тринистордың құрылымы көрсетілген.



5.4-сурет. Тринистор құрылымы

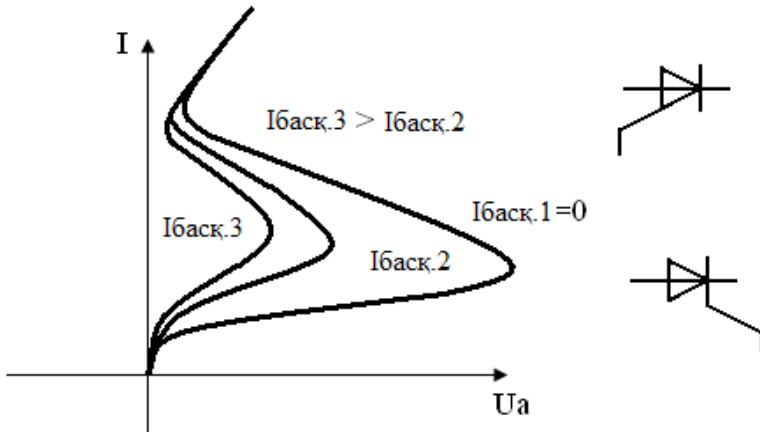
Динисторларда қосылу анодты кернеудің артуы $U_a > U_{a.вкл}$ көрсеткішіне жеткенше дейін артады, бұдан аспап арқылы өтетін ток күрт артады. Бұл оның кемшілігі болып табылады, себебі қосылу тізбегі үлкен токтар аққанда үлкен кернеу арқылы жүзеге асады, олай болса аспаптың тиімділігінің төмендігін және аз таралуын көре аламыз. Сол себептен жоғарыда айтылып кеткен кемшіліктері жоқ жартылайөткізгішті аспапты құрастыруды қажет етеді.

Шартты транзистордың ($p_1n_1p_2$ немесе $n_2p_2n_1$) қай базасы басқарылатын база екендігін білу үшін *анодты* немесе *катодты* басқарылатын тиристордың көмегімен ажыратамыз.

Қорыта келгенде, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ шарты басқарылатын кернеудің өзгерісінен $U_a < U_{a.вкл}$ кернеуі кезінде орындалады.

Қорытынды: қосылуды басқару үшін арзымайтын ток пен кернеу қажет, яғни басқару аса көп емес қуат шығынымен жүргізіледі, бірақ та кернеу мың вольт кезінде анодты тізбекте ондаған және жүздеген ампер ток аға алады.

Тринистордың вольт-амперлік сипаттамасы, динистордың сипаттамасына ұқсас болып келеді (5.5-сурет).

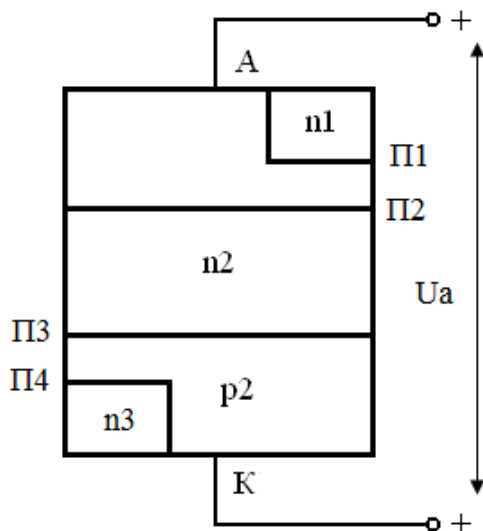


5.5-сурет. Тринистордың вольт-амперлік сипаттамасы

5.3. Симметриялық тиристорлар

Кейбір айнымалы тоқты реттеу сұлбаларда тура бағытта да, кері бағытта да қоса алатын тиристорларды қажет етеді. Бұл талаптарға *симметриялық* деп аталатын тиристорлар жауап береді. Бұл тиристорлардың вольт-амперлік сипаттамалары кернеудің полярлығы әртүрлі болған кезде де бірдей болады.

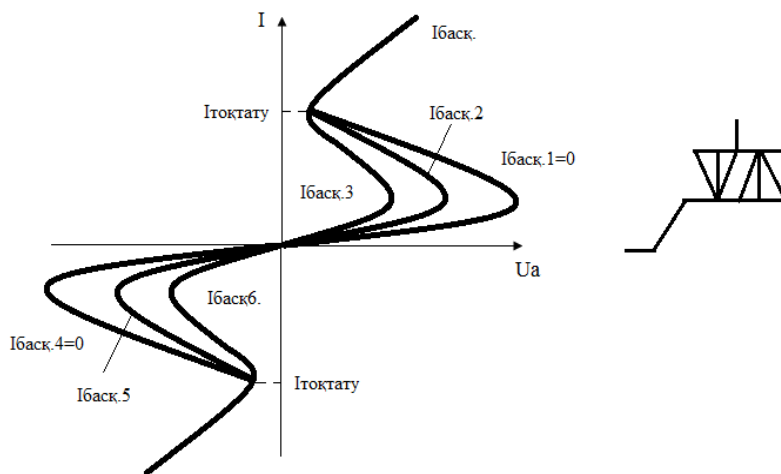
Симметриялық тиристорларда (5.6-сурет) бес аймақ пен төрт рп-өткелі болады. n_3 және p_1 аймақтары катодқа, ал n_1 және p_1 аймақтары анодқа жалғанған.



5.6-сурет. Симметриялық тиристордың құрылымы

5.7-суретте көрсетілгендей, p_1 -де «+» және n_3 -те «-» кернеу полярлығы кезінде $П_2$ және $П_4$ өткелдері тура кернеулі болады, ал $П_3$ – теріс кернеулі, $П_1$ рп – өткелі де теріс кернеулі, бірақ ол p_1 аймағындағы кедергі арқылы шунтталған.

Басқарылатын симметриялық тиристор *триак* деген есімге ие болды. Оның вольт-амперлік сипаттамасы және шартты белгісі 5.7-суретте көрсетілген.

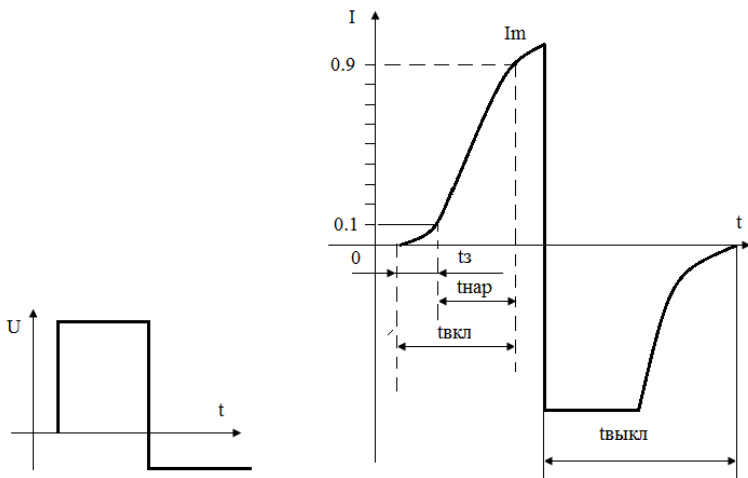


5.7-сурет. Триактың вольт-амперлік сипаттамасы және шартты белгісі

Нәтижесінде тізбекте p_1 аймағында «+» және n_3 аймағында «-» кернеуі қосылған қарапайым $p_1n_2p_2n_3$ құрылымды төрт қабатты тиристор қосылған. Дәл осындай құрылымда жоғарыда айтылып кеткен процестер бақыланады.

5.4. Тиристорлардың жұмыс істеу ерекшеліктері және параметрлері

Тиристорлар импульстік режимде жұмыс істейтін ауыстырып-қосқыш құрылғы ретінде кең қолданыс табады. Сондықтан тиристорлардың параметрлері оның қосылу және сөндірілу, импульстік жұмыс және шекті режимге байланысты болып келеді (5.8-сурет).



5.8-сурет. Тиристордың ток импульсі

Қосылу уақыты $t_{\text{кoc}} = t_3 + t_{\text{өcy}}$. Мұндағы t_3 – *тоқтап тұру уақыты*, $t_{\text{нар}}$ – *өсу уақыты*:

– $t_{\text{кoc}}$ – басқарылатын импульстің берілу моменті мен тиристор тогының $t_{\text{нар}} = 0,9/T$ мәніне жеті моменті арасындағы аралық уақыт ретінде анықталады;

– t_3 – басқарылатын импульстің берілу моменті мен тиристор тогының $I = 0,1 I_m$ мәніне жету моменті арасындағы аралық уақыт;

– $t_{\text{өшіру}}$ – тиристор тогының нөлдік деңгейге жету моментінен тиристордың жабылу қасиеті қалпына қайта келу моментіне дейінгі аралық уақыт;

– $t_{\text{өшіру}} > t_{\text{кocy}}$ – қосылу және өшу уақыты тиристордың жиіліктік қасиеттерін анықтайды. Қазіргі уақытта $t_{\text{вкл}}$ – *жүздеген наносекунд*, $t_{\text{выкл}}$ – *микросекунд бірліктерін* қамтамасыз ететін жоғары жиілікті тиристорлар пайда болған.

Тиристорлар келесі параметрлермен сипатталады:

$U_{\text{а.кocy}}$ – қосылу кернеуі;

$I_{\text{ұстап тұру}}$ – ұстап тұру тогы;

$I_{\text{кocy.баскару}}$ – негізгі тізбекте белгілі бір режимде тиристордың жабық күйінен ашық күйіне өтуін қамтамасыз ететін басқарылатын электрод тұрақты тогының минималды мәні;

$I_{\text{кocy.баскару}} U_{\text{кocy.баскару}}$ – ке сәйкес келеді.

5.5. Күштік транзисторлар

Күштік транзисторлар үлкен токтар (ондаған ампер және одан жоғары) мен үлкен кернеулерді (ондаған вольт және одан жоғары) басқару үшін арналған. Күштік транзисторларды 1948 ж. биполярлы транзмсторларды ойлап тапқаннан кейін шығарды. Қазіргі күштік биполярлы транзисторларды әдетте кремнийден жасайды.

Өрекет ету принципіне, сипаттамасына және параметрлеріне байланысты қуатты транзисторларда әлсіз транзисторлар секілді белгілі бір ерекшеліктері бар. Күштік құрылғыларды және олардың басқару жүйелерін жобалаған кезде осы ерекшеліктерді ескеру керек.

5.5.1. Күштік модульдер

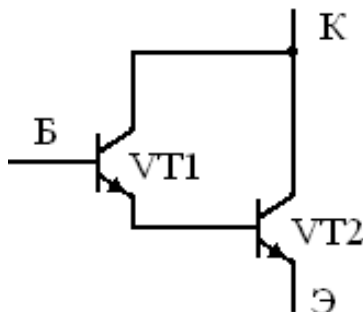
Күштік электроника сұлбаларында белшілі бір ретпен жалғанған қуатты аспаптардың қосындысынан тұратын типтік түйіндер қолданылады.

Мысалы, көбінесе транзистор мен диодтан тұратын түйінді пайдаланады. Мұндай түйіндерді бір тұрқыға орналастыру оңай болып шықты. Тиісті құрылғыны күштік модуль деп атайды. Күштік модульдерді пайдалану көбінесе күштік электрониканың құрылысын жеңілдетеді және құрылғылардың көптеген параметрлерін жақсартады.

Күштік транзисторды қосудың негізгі сұлбасы – ортақ эмиттері бар сұлба. Бұл сұлба үшін, жоғарыда айтылып кеткендей, кіруші (басқарушы) ток) база тогы) де, кіруші (басқарушы) кернеу (эмиттер мен база арасындағы кернеу) де өте аз. Сондықтан керекті басқарылатын сигналды жасау салыстырмалы түрде оңай болып табылады.

Құрама транзистор (Дарлингтон сұлбасы). Көбінесе бір жартылай өткізгіш пластинада Дарлингтон сұлбасы (5.9-сурет) арқылы қосылған екі транзистор құрылымы жасалады. Осы екі транзисторды құрама транзистор деп атайды. Жалпы айтқанда құрама транзистор кәдімгі транзистор сияқты, бірақ өзінің ерекшеліктері бар. Құрама транзисторы үшін R базасының токтың дифференциалды беріліс коэффициенті

$\beta \approx \beta_1 \beta_2$ теңдеуімен анықталады, мұндағы β_1 және β_2 – сәйкес транзисторлардың база тогының дифференциалды беріліс коэффициенттері. Құрама транзистор коэффициенті шамасы аз коэффициенттермен салыстырғанда мыңға тең болады. Олай болса, құрама транзистор үшін басқарылатын ток мәні жүктеме тогынан (коллектор тогынан) мың есе аз болуы мүмкін. Бұл құрама транзисторды басқаруды жеңілдетеді.



5.9-сурет. Дарлингтон сұлбасы бойынша қосылған құрама транзистор

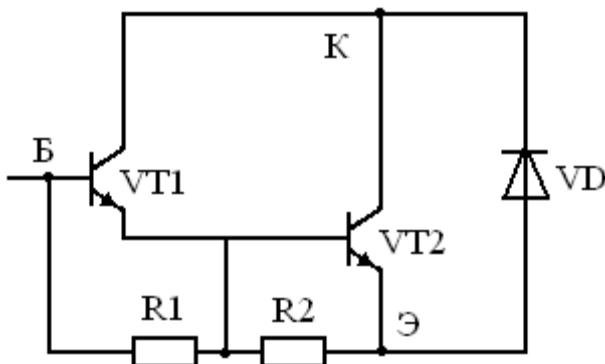
Құрама транзистор үшін VT_2 транзисторы ғана күштік болып келеді, себебі оның коллектор тогы VT_1 транзисторының коллектор тогына қарағанда өте жоғары (бұл токтардың қатынасы β_1 коэффициенті арқылы анықталады).

Құрама транзистордың қосылу күйін (қанығу режимі) қамтамасыз етіп тұратын шығыс кернеуі кәдімгі транзистор кернеуінен жоғары, себебі екі транзистордың кіріс кернеулерінің суммасына тең (бірнеше вольттан көп емес).

Құрама транзистордың қанығу режиміндегі коллектор мен эмиттер арасындағы кернеу кәдімгі транзистор кернеуінен жоғары болады. Себебі, қанығу режимінде тек бір ғана VT_1 транзисторы жұмыс істейді, ал VT_2 транзисторы активті режимде қалады. VT_2 транзисторында база және коллектор арасындағы кернеу (VT_1 транзисторында коллектор және эмиттер арасындағы кернеу) VT_1 транзисторының қанығу режимінде детура болып қала береді. Бірақ құрама транзистор үшін де коллектор мен эмиттер арасындағы кернеу көп емес (әдетте 2 В-тан көп емес).

Күштік интегралды сұлбалар. Құрама транзисторды қарастыра отырып қазіргі күштік интегралды сұлбалар түсінігін меңгеру оңай.

Бір жартылайөткізгішті пластинадағы транзистордан басқа қосымша элементтер жасалады (5.10-сурет).



5.10-сурет. Күштік интегралды сұлба

R_1 және R_2 резисторлары коллектор мен эмиттер арасындағы рұқсат етілген максималды кернеуді арттырады, өшу уақытын төмендетеді.

VD диоды VT_1 және VT_2 транзисторлары жабық кездегі құрама транзисторда эмиттерден коллекторға өтетін токтың ағыын қамтамасыз етеді. Ол көптеген электрониканың күштік сұлбаларына қажет. Күштік электроникада тұрқы құрамында күштік те әлсіз де элементтері бар ұқсас құрылғыларды күштік интегралдық сұлба деп атайды.

Интеллектуалды күштік интегралды сұлбалар. Әлсіз элементтер күрделі интегралды сұлбалар сияқты электрондық жүйелерді құрай алады.

Бұл жүйелер күштік интегралды сұлбаларды басқару, қорғау және диагностикалау секілді көптеген функцияларды орындайды. Мұндай құрылғылар үлкен токтар мен кернеулерді басқару емес, кейбір ақпараттары бар электрлік сигналдарды жіберетін және түрлендіретін ақпаратты электроника құрылғылары болып табылады.

Ақпараттық электроника электрондық жүйелермен жабдықталған күштік интегралды сұлбаларды *интеллектуалды* (Smart Power Integrated Circuit) деп атайды.

Интеллектуалды аспаптар. Егер бір тұрқыда ақпаратты электроника жүйесімен толықтырылған күштік аспап (транзистор) болса, онда ол интеллектуалды аспап болып саналады.

Интеллектуалды аспап қарапайым аспаптармен салыстырғанда өте маңызды артықшылықтарға ие. Мысалы, егер интеллектуалды аспап өзінің қызып жатқанын байқайтын болса, істен шықпас үшін өзін өшіру "шешімін қабылдай" алады.

Интеллектуалды күштік модульдер. Ақпаратты электроника жүйелері, әрине, күштік модульдерде де орналаса алады. Мұндай модульдерді *интеллектуалды* (Intelligent Power Modulus) деп атайды.

Күштік транзисторлардың жұмыс режимінің ерекшеліктері. Күштік транзисторларды, әдетте, шекті режимдерге жақын қатаң режимдерде қолдануымыз мәжбүр. Ал басқа жағдайда күштік құрылғылардың бағасы, салмағы және габариттік өлшемдері өте жоғары болуы мүмкін. Транзистордың негізгі құраушысы, яғни кремнийлік кристалл температурасы 200 °C және одан жоғары температураға жетуі мүмкін. Қуаттың негізгі үлесі коллекторлық өткелде бөлінеді және оның температурасы өте жоғары. Коллекторлы өткелдің рұқсат етілген максималды температурасы анықтамада көрсетіледі және жылулық есептуелерде қолданылады.

Күштік электрониканың кейбір құрылғыларында транзистор активті режимде жұмыс істейді (мысалы, қуат күшейткіштерінде). Алайда, бұл режимде коллектор тогы I_k да коллектор мен эмиттер арасындағы кернеу де жоғары, сондықтан коллекторлық өткелде пайда болатын қуат P_k та жоғары болады. Бұл, біріншіден, құрылғының пайдалы әсер коэффициентін төмендетеді және екіншіден, транзисторды салқындату қиындықтарын туғызады.

Қуатты P_k төмендетудің ең тиімді тәсілі транзистордың кілттік жұмыс істеу режимі болып табылады. Бұл ретте транзистор уақыттың басым бөлігінде жабық немесе толығымен ашық.

Екі жағдайда да коллекторлы өткелде пайда болатын қуат мәні аз. Тек қана ауысуға кететін уақыт үзінділерінде көрсетілген ток пен кернеу бір уақытта үлкен шамада және қуат жеткілікті. Бірақ қуаттың орташа мәні аз болып қалады және ол аз болған сайын транзистор тезәрекететуші болады, ауысу жиілігі аз болады.

Кесіп алу режиміндегі қуат әдетте қанығу режиміндегі қуаттан айтарлықтай төмен. Сондықтан есептеулер жүргізген кезде кесіп алу режимдеріндегі қуатты есептемейді. Күштік транзисторлар, әдеттегідей, кілттік режимде жұмыс істеу үшін арналған.

5.5.2. Күштік (қуатты) өрістік транзисторлар

Өрістік транзисторлар ұзақ уақыт бойы аз қуатты болып қала берді. Ең алғашқы күштік өрістік транзисторлардың өнеркәсіптік үлгілері 1970 жылдары пайда болды.

Қазіргі уақытта өрістік транзисторлар электрониканың өте маңызды және перспективті күштік аспаптардың бірі болып табылады. Әдеттегідей, күштік өрістік транзисторлар кремнийден жасалған. Арсенид Галий негізінде жасалған транзистор перспективті болып табылады.

Қазіргі уақытта өрістік транзисторларды интеллектуалды күштік интегралды сұлбалар, интеллектуалды аспап және интеллектуалды күштік модульдердің негізі ретінде қолданады.

Күштік электроникада транзистордың көптеген түрлерінен оқшауланған бекітпесі бар және индукцияланған каналды өрістік транзисторларды кең қолданады. n-типті каналды, p-типті каналды өрістік транзистор қолданыла береді.

Күштік өрістік транзисторлар биполярлы транзисторлар сияқты кілттік режимде жұмыс істейді. Сондықтан, олар үшін биполярлы транзисторларға сияқты маңызды шамалар ашық күйдегі кернеу, қосылу және өшу уақыттары болып табылады. Ашық күйдегі транзистордың жұмыс орны сызықты аймақта жатады және де кернеу $U_{кб}$ транзистордағы бастау-құйма тізбегіндегі кедергі $R_{кб}$ арқылы анықталады. Сондықтан бұл кедергі өрістік транзистордың маңызды параметрі болып табылады. Анықтамаларда бұл кедергі бекітпе

мен бастау арасындағы берілген кернеуге $U_{жб}$ көрсетіледі. Құйманың тогын $I_{к_1}$ кернеуін $U_{кб}$ біле отырып Ом заңы $U_{кб} = I_{к_1} R_{кб}$ арқылы оңай есептеуге болады.

Көбінесе бастау-құйма тізбегіндегі кедергіні емес, токөткізгіш канал кедергісі туралы көп айтылады, себебі ол кедергінің $R_{кб}$ маңызды бөлігін құрайды.

Әрдайым кедергі мәні аз күштік өрістік транзисторлардың жаңа типтері пайда болады.

Токөткізгіш канал кедергісінің төмендетуінің бір жолы оның ұзындығының қысқартуы болып табылады. Сондықтан күштік транзисторлардың каналдары қысқа болады.

Күштік транзисторлардың көпканалдылығы. Күштік транзисторларда бастау-құйма тізбегіндегі кедергіні төмендету үшін және құймадағы рұқсат етілген максималды токты арттыру үшін көпканалды құрылымды пайдаланады және каналдарды параллельді жалғайды.

Көп каналды параллельді жалғауға болады, себебі рұқсат етілген диапазонда температураны жоғарылатқан кезде токөткізгіш канал кедергісі де жоғарылайды. Егер белгілі бір себептермен токөткізгіш каналдың тогы артып кетсе, онда оның температурасы артады. Соның салдарынан канал кедергісі артып, өтетін ток төмендейді.

Күштік өрістік транзисторлардың жоғары жылу тұрақтылығы. Температураны жоғартылатқан сайын ток өткізгіш каналдың кедергісін арттыру өрістік транзистордың маңызды қасиеті болып табылады. Бұл қасиет транзистордың қызып кетуінен және ойылуынан сақтайды. Сондай-ақ осы қасиет күштік транзисторларға қосымша элементтерді қосуға мүмкіндік береді.

Күштік өрістік транзистордың вертикальды құрылымы. Аз қуатты өрістік транзистордың құрылымын жартылай өткізгіш пластинаның бір жағына орналастырады. Ал екінші жағында бастау, бекітпе және құйма орналасады. Мұндай құрылымды горизонтальды деп атайды. Оны 5.11-суреттегі индукцияланған каналды МДЖ-транзистор құрылымын схематикалық бейнесінен көруімізге болады.

Сонымен қатар шығыс сыйымдылықтағы $C_{жб}$ кернеу уақыт тұрақтысымен $\tau = R_{кор} \cdot C_{жб}$ экспонциал заңымен артып тұрады.

Кіріс сыйымдылық $C_{зи}$ жоғары болған сайын транзистор баяу ашылатын болады. Шығыс сыйымдылықтың кернеу полярлығы 5.12-суретте көрсетілген.

Ал енді Миллер эффектісін және өтпелі сыйымдылықтың $C_{сз}$ заряд сыйымдылығы $C_{зи}$ процессіне әсерін қарастырайық.

Ток жүктемесінің артуы $U_{кб}$ (яғни $U_{кб} = E_k - I_{ж} R_{ж}$) мен $U_{сз}$ кернеулерінің төмендеуіне алып келеді. Өтпелі сыйымдылық $C_{сз}$ разрядтала бастайды. 5.12-суретте осы сыйымдылық үшін токтың I_k бағыты ток разрядының оң мәніне сәйкес көрсетілген.

Құйма тогы I_k кернеудің артуына $U_{жб}$ кедергі жасайтынын байқау оңай. Нәтижесінде кернеу $C_{кб}$ идеалданған жағдайға қарағанда баяу артады.

Сонымен қатар транзисторды жапқан кезде кіріс сыйымдылық транзистордың өшу процессін баяулатады.

Өтпелі сыйымдылықтың әсер ету дәрежесін сандық бағалау үшін эквивалентті кіріс сыйымдылығын $C_{жб\ экв}$ есептейді. Идеалдық жағдайдағы эквиваленттік сыйымдылықты $C_{жб\ экв} = C_{жб} + C_{сз}(K_u + 1)$ деп көрсетуге болады, мұндағы K_u – сұлба кернеуі бойынша күшею коэффициенті.

Егер жүктеме кедергісі $R_{жкөп}$ емес болса, онда $K_u = SR_{жк}$, мұндағы S – құйма-бекітпе сипаттамасының құлдылығы (өрістік транзисторды оқыған кезде айтылған).

Эквивалентті сыйымдылық кіріс сыйымдылықтан $C_{жб}$ бірнеше есе артуы мүмкін.

Миллер эффектісі кіріс эквивалентті сыйымдылықтың өтпелі сыйымдылық әсерінен ұлғаюын көрсетеді. Бір жағынан, ол транзистордың ауысуын баяулатады, ал екінші жағынан, кіріс сигналының қоректенетін токты арттырады. Кейбір кезде, осы токтың күрт артуынан кіріс сигнал қорек көзінің жұмысы бұзылады.

5.5.3. Оқшауланған бекітпесі бар IGBT транзисторы

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) – гибриді жартылай өткізгішті аспап. IGBT-дәлектр тогын басқарудың екі әдісі бар, біріншісі – өрістік транзистор үшін, екіншісі – биполярлы транзистор үшін.

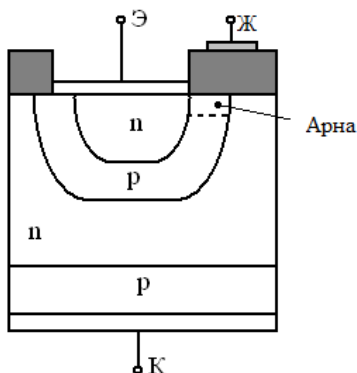
Кезінде бір жартылайөткізгішті пластинада өрістік және биполярлы транзистор құрылымдарын механикалық түрде қосу әрекеті жүзден асады.

Нәтижесінде комбинацияланған деп аталатын транзисторлар пайда болды. Тек бұл құрылымдардың IGBT-да жүзеге асқан органикалық қосындысы ғана елеулі өнегелі әсерін тигізді. IGBT транзисторының пайда болуы электроника саласында шағармашылықтың өнегелі мысалы ретінде көруімізге болады.

IGBT құрылғысы. Әдетте IGBT-да индукцияланған р-типті каналды МДЖ-транзисторының құрылымы пайдаланылады.

Бұл транзистордың құрылымы қосымша р-типті жартылайөткізгішті қабаты бар ДМДП-транзисторынан ерекшеленеді (5.13-сурет).

IGBT-транзисторының электродтарын белгілеу үшін «эмиттер», «коллектор» және «бекітпе» терминдерін қолданатынымызға назар аударайық.



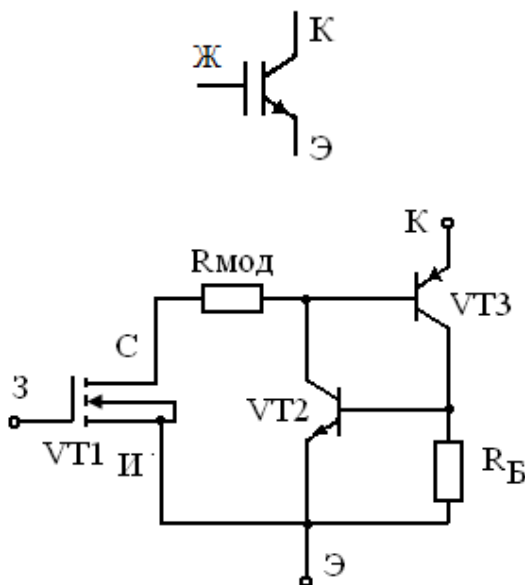
5.13-сурет. IGBT күштік ДМДП-транзисторының құрылымы

р-типті қабатты қосу екінші биполярлы транзистор (рпр-типті) құрылымының пайда болуына әкеп соғады. Сол себепті, IGBT-да екі биполярлы құрылым бар: рпр және рпр-типті. IGBT-ның эквивалентті сұлбасын қарастырайық (5.14-сурет).

IGBT қорытындылары атаулары кішкене ыңғайсыз болып көрінеді. Бірақ та бұл атауларды көпшілігі мақұлдаған.

$R_{\text{мод}}$ арқылы рnp-типті транзистордың базалық қабаты болып келетін n-типтің төменгі қабатының кедергісі белгіленеді. Осы арқылы өтетін токтың өзгеруіне байланысты $R_{\text{мод}}$ кедергісі де өзгереді.

IGBT шартты-графикалық белгісі:



5.14-сурет. n-типті каналы бар IGBT эквивалентті сұлбасы

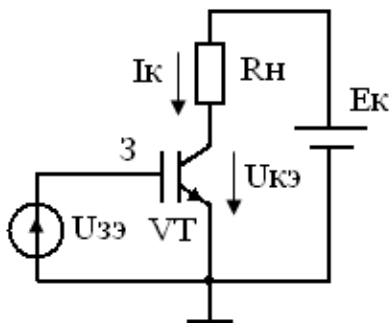
5.15-суретте IGBT-ның қосылу сұлбасы көрсетілген. Бұл ортақ эмиттерлі сұлба, дәл осы тәжірибеде көп қолданылады.

Негізгі физикалық процесстер. Қалыпты жұмыс жағдайында VT_2 рnp-типті транзистор жабық және IGBT жұмысына әсерін тигізбейді. Негізінен VT_2 транзисторы паразитті деп қарастырылады. Ең маңызды рөлді VT_1 және VT_3 транзисторлары атқарады. Қосымша рп-өткелінің негізгі міндеті n-типті төменгі қабатына кемтік инжекциясы болып табылады.

Инжекция осы қабаттың кедергісін едәуір төмендетеді. Нәтижесінде ашық күйде IGBT эмиттері мен коллекторы

арасындағы кернеу $U_{кэ}$ сәйкес өрістік транзисторымен салыстырғанда төмендейді.

Ашық күйдегі нақ осы аз мөлшердегі кернеу өрістік транзистормен салыстырғанда IGBT-ның ең маңызды артықшылығы болып табылады. Кернеудің төмендеуі пропорционалды түрде транзистормен таратылатын қуаттың төмендеуіне әкеп соғады.



5.15-сурет. IGBT қосылу сұлбасы

Алайда кемтік инжекциясы рnp-типті транзистор базасында компенсацияланбаған иондардың көлемді зарядының пайда болуына әкеп соғады. Бұл оқиға шалаөткізгішті диодтарды өткен кезде қаралған. Зарядтың жиналуы өрістік транзистор мен салыстырғанда IGBT-ның тезәрекеттілігін төмендетеді. Ашық күйдегі кернеудің жағдайы осындай.

VT_2 және VT_3 биполярлы транзисторлары жоғарыда айтылып кеткен тиристордың эквиваленттік сұлбасын құрайтынын байқауға оңай. Бұл сұлба екі тұрақты күйде бола алады: қосылулы және өшірулі. IGBT апаттық жұмыс режимде VT_2 и VT_3 транзисторлары қосыла алады және IGBT басқарылмайтын күйге өтіп істен шығуы мүмкін. VT_2 и VT_3 транзисторларының қосылуын *триггерлік әсер* деп атайды. Әдетте ол әсер IGBT өшіргенде байқалады. Қазіргі IGBT триггерлік әсерден жақсы қорғалғандықтан рnp-типті паразитті транзисторы жоқ эквивалентті сұлбаны қолдана отырып модельдеуге болады (5.16-сурет).

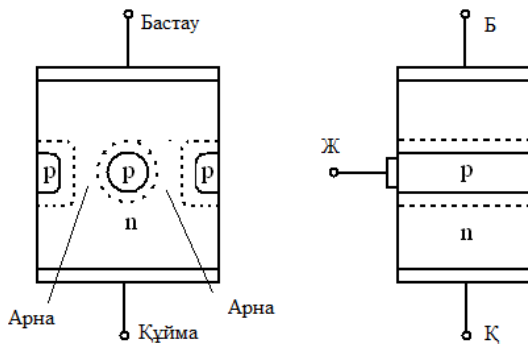
5.5.4. Статикалық индукциясы бар SIT-транзисторы

Негізінде, SIT (Static Induction Transistor) деп – басқарылатын pn-өткелі бар биполярлы транзисторды айтады. Алайда оның өзіне тән құрылғысы бар. SIT n-типті және p-типті каналды болып шағарылады. SIT үшін басқарылатын өткелі бар өрістік өрістік транзисторлардың шартты графикалық белгілері қолданылады. Күштік МДЖ-транзисторы сияқты, SIT көпканалды болып келеді және оның құрылымы вертикальды.

SIT құрылғысы. n-типті каналды SIT құрылымына сурет қарастырайық. 5.17-суретте алдыңғы және шеткі көрінісі берілген. Жартылайөткізгіш аймақтары цилиндр пішінді және диаметрі микрометр бірліктері және одан да үлкен болып келеді. Бұл цилиндрлер жүйесі бекітпенің рөлін атқарады. Әрбір цилиндр бекітпе электродына жалғанған (суретте бекітпе электроды көрсетілмеген). pn-өткелдерінің аймақтары пунктирмен көрсетілген. Каналдар саны мыңға дейін жетуі мүмкін.

Әдетте сұлбада SIT-ті ортақ бастаумен қолданады (5.18-сурет). SIT-тің басты ерекшелігі канал ұзындықтарының қысқалығы болып табылады.

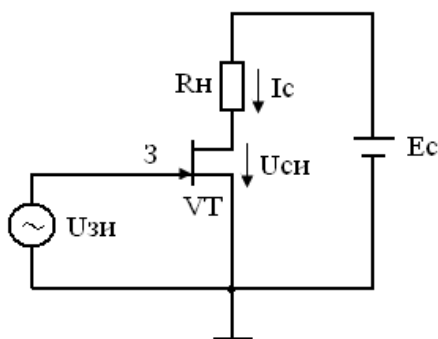
SIT-тегі физикалық процестер. Олар айтарлықтай қиын және басқарылатын pn-өткелі бар өрістік транзистордың физикалық қасиеттерімен пара-пар.



5.17-сурет. SIT-транзисторының құрылымдық сұлбасы

Жапқыш кернеуді $U_{жб}$ арттырған сайын рп-өткелінің аймағы кеңейеді. Олай болса SIT-те «кәдімгі» өрістік транзистормен ортақ қасиеттері бар. «Кәдімгі» арнаны транзистор үшін кернеудің артуы құйма аймағындағы арнаның жабылуына әсерін тигізеді. Содан кейін алдағы кернеудің $U_{кб}$ артуы құйманың тогын $U_{си}$ айтарлықтай өзгерпейді.

Құйма тогының ағып өтуінің әсерінен SIT әр арнаның кернеуінің төмендеуі канал ұзындықтарының қысқа болғандығынан аз болып келеді. Ол рп-өткелдерінің аймақтарының кеңеюіне онша әсер етпейді. Сондықтан $U_{кб}$ кернеудің артуынан құйма тогының I_k өсуі төмендейді.



5.18-сурет. SIT-тің қосылу сұлбасы

Тіпті кернеуді $U_{си}$ арттырғанда бастамадан құймаға қозғалған электрондарды тежейтін бастау мен құйма аймақтарындағы электр өрісінің кернеулігі төмендейді. Бұдан кернеудің $U_{си}$ артуынан құйма тогының I_c өсу жылдамдығының өсетінін байқаймыз.

SIT-тің құймалы-бекітпелі сипаттамалары созылған сызықтық аймақтарымен ерекшеленеді. Сондықтан SIT-ті осы күшейткіштерде кең қолданады.

SIT-тің биполярлы режимі. Егер кернеу $U_{жб}$ теріс зарядка айналатын болса, онда басқарылатын рп-өткелі ашылады және SIT биполярлы транзистордың жұмыс режиміне ұқсас режимге

өтеді. Бұл режимде бекітпе базаның рөлін атқарады. Биполярлы режимнің артықшылығы ашық күйдегі бастау мен құйма арасындағы кернеу мәнінің аздығы болып табылады. Бірақ бекітпе тогы $I_{ж}$ мәнді. Одан басқа бұл режимде әртүрлі заряд тасымалдаушылардың сорылу мен жиналуынан транзистордың тезәрекеттілігі төмендейді.

6. ИНТЕГРАЛДЫ МИКРОСҰЛБА ЖӘНЕ ОПТОЭЛЕКТРОНДЫ АСПАПТАР

6.1. Интегралды микросұлба және оптоэлектронды аспаптар туралы жалпы мағлұмат

Электрониканың шамдық даму кезеңінде габаритті өлшемдерін кішірейту, массасы, тұтынылатын электр энергиясы, электрондық аспаптардың сенімділігін арттыруға үлкен көңіл аударылды.

1948 ж. электрониканың даму жолында электрондық аппараттарға транзисторларды, кейін кең және әртүрлі жартылай өткізгіш аспаптарды ендіру алға үлкен қадам жасалғанын білдірді.

Бірақ аппараттар күрделене түсті, мыңдаған электрондық жартылай өткізгіш элементтері бар құрылғылар пайда болды, сол себепті габаритті өлшемдері, массасы, тұтынылатын қуаты ұлғайды, ал сенімділігі кеміді. Құрылымды-технологиялық, сұлбатеchnикалық, физикалық мәселелерді шешу қажет болды.

Бұл шешімдер жаңа электрондық аспаптарды – интегралды микросұлбаларды (ИМС) шығару мен пайдалану мәселелері, электроника-микроэлектроника саласының құрылуына себепші болды.

Осылайша, микроэлектроника – бұл электроника облысы, функционалды электронды түйіндерді құрумен айналысатын блоктар және микроминиатюралық интегралды орындалудағы құрылғылар. Электрониканың даму жүрісі алдын ала шұғыл функциялардың, РЭА орындалатын және талап, сенімділіктің ұлғаюы.

ИМС техника байланысында элементтік база, космостық электроникада және ЭЕМ-нің негізі болуда.

Интегралды микросұлба – бұл функцияның анықталған түрлендіруін орындайтын микроэлектронды бұйымдар, сигналдарды өңдеу және (немесе) ақпарат жинақтауы, электрлік байланысқан элементтер орауының жоғарғы тығыздығы (элементтер мен компоненттер) және (немесе) талаптың сынауға деген көзқарасы, қабылдау, жеткізілім және пайдаланылуы бір кристалдар (МЕСТ 17021-88).

Осылайша, анықтама нәтижесі ИМС келесі ерекшеліктерге ие:

- 1) көптеген элементтерден тұрады және анықталған функцияны орындайды: күшейту, генерациялау, түзету, жекелей логикалық операцияларды орындау немесе бірнеше функциялар;
- 2) ИМС элементтері дискретті емес: диодтар, транзисторлар, конденсаторлар, резисторлар және байланысы бір элементтер;
- 3) ИМС-тің барлық элементтері сыртқы шығысы бір герметикалық корпусқа біріккен.

ИМС құру кезінде негізгі жаңалығы элементтік (транзисторлар, диодтар, резисторлар, конденсаторлар, т.б. база емес) элементтердің құру принципі мен байланысы.

6.2. Интегралды микросұлбалардың классификациясы

ИМС бірнеше белгілері бойынша классификацияланады:

- 1) *құрылымды-технологиялық*, яғни дайындау кезіндегі технология мен материалға байланысты: жартылай өткізгіштер, таспалы, гибриді;
- 2) *интеграция дәрежесі бойынша*: кіші (КИС), орташа (ОИС), үлкен (ҮИС), аса үлкен (АҮИС);
- 3) *функционалды принципі бойынша*, яғни функциясына, орындалатын сұлба, генерациялауға, күшейтуге, логикалық операцияларға, аналогты ИС, сандық ИС байланысты;
- 4) *физикалық принципі бойынша* жартылай өткізгішті ИС екі класы бойынша ажыратады, биполярлы ИС, МДЖ ИС.

Жартылай өткізгішті микросұлба – бұл микросұлбада барлық элементтер мен элемент аралық байланыстар, жартылай өткізгішті материалдың бетінде үлкен көлемде орындалады.

Жартылай өткізгішті материалдың денесінде тапсырылған электрондық функцияда орындалатын резисторлар қабаты, транзисторлар құрылымы құрастырылады.

Жартылай өткізгіштер ИС (ЖИС) практикада кең тараған және перспективті, сол себепті сенімді және жеткілікті құрастыруы қиын функционалды қатынастағы электрондық құрылғының өлшемі кіші, бағасы төмен мүмкіндік береді.

ЖИС сипаттамалық ерекшелігі элемент ортасында индуктивтілік катушкасы мен трансформаторлары жоқ. Бұл қандай да бір физикалық құбылыстың эквивалентті электромагнитті индукцияда, қатты денеде қолданылмайды. ИС өңдеу кезеңінде қажетті функцияны индуктивті элементтерді қолданбай немесе элементтерді «іліп қояды» іске асыруға тырысады.

ЖИС резистор мен конденсатор ретінде қарсыласу және заряд көлемі $C_{зар}$ рп-өткелінде қолданылады, ол транзистор құрылымын дайындау, жартылай өткізгіштерді өндіруде диод пен конденсатор бірлік технологиялық циклмен дайындалуын қамтамасыз етеді.

Көбінде жартылай өткізгіш ИС элементтері жіңішке (қалыңдығы 0,5–10 мкм) жартылай өткізгіштің сыртқы бетінде орналасады. Жартылай өткізгіштің үлесті қарсыласуы көп емес (1–10 Ом), ал элементтері бір-бірінен шеттетілу және арнайы облыстарда оңашаландыруды қажетсінеді.

Биполярлы ИС негізгі элементі – ррп-транзистор, ал МДЖ-да индукцияланған каналды ИС– МДЖ–транзистор.

Басқа элементтік сұлбалары (диодтар, резистор мен конденсаторлар) негізгі элемент базасында дайындайды.

Таспалы микросұлба – бұл барлық элементтер мен элемент аралық байланыстар тек өткізгіш таспа және диэлектрлік материалдарда орындалатын микросұлба.

Қазіргі уақытта таспалы микросұлбалардың екі класы бар:

- жіңішке таспалы;
- қалың таспалы.

ИС барлық элементтері тапсырылған пассивті элементтердің функциясын орындауда, (активтіден басқа) диэлектрлік пластинаға (тілімше) поликристалдық немесе аморфты қабат түрінде (таспа) түсіреді. Алынған ИС қажет болған жағдайда сыртқы шығыстарын корпусқа орналастырады.

Жіңішке таспалы мен қалың таспалы микросұлбалардың айырмашылығы сандық және сапалы болуы мүмкін. *Жіңішке таспалы* (шартты) ИМС қалыңдығы 1 мкм-ден аз, қалың таспаға 1 мкм-ден аса таспа жатқызады.

Таспалы микросұлбаларды бөлу айтулы таспа қалыңдығына ғана емес пассивті элементтерді құру процесіндегі ендіру әдісіне

байланысты. Жіңішке таспалы сұлбаларда пассивті элементтерде термовакуумды тозандандыру және катодты тұндыру қолданылады, қалың таспалы пассивті элементте сұлбаларды, өткізгіш, резистивті пастпен түсіру.

Активті элементтер (диод пен транзистор) таспалы сұлбаға «іліп қою», нәтижесінде *гибридті* деп аталатын *аралас (таспалы-дискретті)* ИС алады.

Жеке жағдайда гибриді ИС көпкристалды ИС болып келеді, ол бірнеше компонентте корпуссыз бір тілімшеде орындалатын жартылай өткізгіш сұлба. Көбінесе, қазіргі уақытта кең тараған жартылай өткізгіш және гибриді ИС.

ИС элемент саны оның интеграция дәрежесіне байланысты.

Интеграция дәрежесі – бұл ИС функционалды күрделілігі, яғни элементтер саны, көбіне интегралды сұлбаның құрамына кіретін транзисторлар.

Барлық интегралды сұлбалар интеграция дәрежесіне сәйкес бөлінеді:

- кіші (КИС), элементтің 10^2 кристалға дейін;
- орташа (ОИС), элементтің 10^3 кристалға дейін;
- үлкен (ҮИС), элементтің 10^4 кристалға дейін;
- аса үлкен (АҮИС), элементтің 10^6 кристалға дейін;
- ультраүлкен (УҮИС), элементтің 10^9 кристалға дейін;
- гигаүлкен (ГҮИС), элементтің 10^9 кристалға дейін;

Кейде интеграция дәрежесі көлеммен анықталады

$$K = \lg N, \quad (6.1)$$

мұндағы N – ИС кіретін, элемент саны.

K мәні көлем жағына бүтін санға жақындауымен анықталады. Мысалы, ИС бірінші дәрежелі интеграциясы ($K=1$) 10 элементке дейін қамтиды, екінші дәрежелі интеграция ($K=2$) – 10-нан 100-ге дейін, үшінші дәрежелі интеграция $K=3$ – 100-ден 1000-ға дейін, т.б.

Электроникада ҮИС құру жаңа қадам болып саналды. ҮИС 1000 элементтен аса және күрделі функционалды құрылғыдан тұрады.

Интегралды микросұлбалар функционалды тағайындалуы бойынша аналогты және сандық болып ажыратылады.

Сандық интегралды микросұлба (СИМ) – бұл сигналдарды түрлендіруге және өңдеуге арналған, дискреттілік функция заңымен өзгеретін микросұлба (мысалы, екілік немесе басқа сандық кодта көрсетілген).

Сандық ИС екі тұрақты күйге (сирету және бекіту) ие, өзіндік көптеген транзисторлық кілттерді көрсетеді.

Жеке жағдайда СИМ операцияны екілік кодта орындайтын және логикалық алгебрамен сипатталып ЖӘНЕ, НЕМЕСЕ, НЕ, т.б. функцияны жүзеге асыратын логикалық микросұлба.

Аналогты интегралды микросұлба (АИМ) – бұл үзіліссіздік функция заңымен өзгеретін, сигналдарды түрлендіруге және өңдеуге арналған микросұлба.

Жоғарыда ИС интеграция дәрежесінің классификациясында көрсетілгендей, ИС типіне байланысты (аналогты және сандық) және транзисторлар класы (биполярлы және өрістік), яғни микроминиатюризациялы электрондық құралдар мәселесінде, ақпаратты өңдеудің сандық әдістерін қолдану тиімді шешімге келуге мүмкіндік туғызады.

Бірақ сандық әдістерді әр кезде қолдану мүмкін емес. Осылайша, нақты электрондық құрылғыны өңдеу талаптарын электрониканың сандық әдістері арқылы орындау оңтайлы емес, мысалы, баға немесе басқа да көрсеткіштер жағынан қарағанда қол жетімсіз. Бірінші кезекте бұл талап етілген тез әсер етуші және дәл электрондық құрылғыға қатысты.

Сондықтан тиімді шешім іздеу үшін электрондық құрылғыда бар барлық жинақтары қолданылуы қажет; аналогты, сандық және импульстік электроникада.

ҮИС ұғыммен бір уақытта МЕСТ 17021-88 екі термин қатысуда: *ҮИС және ҮИС базалық комплекті*. Бұл жағдай радиоэлектронды аппараттардың түйіндері мен блоктарын көрсететін, бірегей комплекстік өңдеу мен ҮИС қолдану қажеттілігі.

Үлкен интегралды микросұлба (ҮИС) әртүрлі функция орындайтын, бірақ құрылымды орындау мен электрлік параметрлерден тұратын комплект. Олар микроэлектронды аппарат тұрғызуда жалпы «архитектурада» қолдануға мүмкіндік береді.

ҮИС базалық комплекті – бұл аппаратуралық тапсырмалар айналасында шешуге қажетті ҮИС комплекттің минималды құрамы.

Қазіргі уақытта, жалпы тағайындаудағы микросұлбаларды өңдеу өндіруге қатысатын кәсіпорын-тапсырыс беруші, кәсіпорын-өндіруші өнеркәсіптерге жүктеледі.

Осылайша, ИМС жалпы тағайындалған микросұлбаларды жартылай тапсырыс беруші және тапсырыс беруші деп бөлінеді.

Тапсырыс беруші ИМС – бұл стандарт негізінде жасалған; және (немесе) тапсырыс беруші мен кәсіпорынның функционалды сұлба бойынша арнайы құрылған элементтер мен түйіндер үшін радиоэлектрондық аппараттарды анықтайтын микросұлба.

Жартылай тапсырыс беруші ИМС – бұл кристалдардың базалық негізінде (қалыптамалық) және анықталған радиоэлектронды аппарат үшін арналған микросұлба.

Жалпы тағайындалған ИМС – бұл радиоэлектронды аппараттың сан түрлері үшін анықталған функционалды тағайындалған микросұлба.

2,5 сигнал таратудың тоқтап қалу уақыты бар немесе тактілік жиіліктің жұмыс диапазонында төменгі шекарасы 300 МГц-тен аз микросұлба тым шапшаң ИМС (ТИМС) деп аталады.

6.3. Микросұлбаның құрылымдық элементтері

Микросұлба құрылымының сипаттамасында кездесетін кейбір жалпы немесе арнайы терминдерді қарастырайық.

Корпус – ИМС-тің шығыс арқылы электрлік тізбектің сыртқы әсері мен сыртқы байланыстардан қорғау үшін арналған интегралды микросұлбаның құрылымды бөлігі.

Шығыс саны мен орналасуы стандартталған ИМС корпусының типі мен өлшемі.

Төсеніш – ИМС таспалы және гибриді элементтеріне, элемент аралық және (немесе) компонент аралық, сондай-ақ контактілі аумаққа қондыруға арналған диэлектрлік материалдан дайындалған.

Плата – бетіне микросұлбаның таспалы элементтері, элемент аралық, компонент аралық және контактілі аумаққа түсірілген гибриді интегралды сұлбаның төсеніш бөлігі (немесе барлық төсеніш).

Жартылай өткізгішті пластина – жартылай өткізгішті материалдан дайындалған, жартылай өткізгішті интегралды микросұлба дайындау үшін арналған.

Кристалл – элемент аралық пластина және контактілі аумақ, жартылай өткізгішті микросұлба элементтері қалыптастырылған пластина бөлігі.

Контактілі төсеніш – компонент пен кристалдың шығыстарын байланыстыруға қызмет ететін, сондай-ақ электрлік параметрлер мен режимдерін бақылайтын ИМС корпусында немесе кристалда немесе платадағы металдандырылған аумақ.

Корпуссыз интегралды микросұлба – гибриді интегралды микросұлбаны монтаждауға арналған кристалл микросұлбасы.

Егер қарапайым микросұлба корпусы сыртқы әсерден қорғау үшін арналса, онда корпуссыз ИМС жеке меншік қорғанышы (механикалық әсерлерден) жоқ.

Корпуссыз интегралды микросұлбаның шығысы – бұл кристалдың электрлік контактілі аумағы немесе механикалық беті байланысқан өткізгіш.

6.4. Интегралды микросұлбаның белгілену жүйесі

Бірінші элемент – конструктивті-технологиялық топқа сәйкес сан:

Жартылай өткізгіштер – 1, 5, 6, 7 – корпуссыз; 2, 4, 8 – гибриді; 3 – басқа да (таспалы, вакуумды, керамикалық).

Екінші элемент – берілген өндеудегі микросұлба сериясының реттік саны, екі-үш сан.

Серияның нөмірін бірінші және екінші элемент құрайды.

Үшінші элемент – екі әріп функционалды классификациясын білдіреді, осыған байланысты 19 топ бар:

- бірінші әріп – микросұлба жүйе асты;
- екінші әріп – микросұлба түрі.

Төртінші элемент – берілген сериядағы функционалды белгісі бойынша микросұлба өңдеуінің реттік нөмірі (бірнеше сан болуы мүмкін).

Дискреттік элементтердің орнына РЭА базасы ретінде ИС пайдалану сенімділігі, габариті, бағасы және басқа да көрсеткіштері бойынша маңызды артықшылығын айқындайды.

6.5. Жартылай өткізгішті оптоэлектронды аспаптар

Заманауи микрэлектроника жалпы микро миниатюризациялы электрондық аппараттардың мәселесін шешпеді. Дәстүрлі элементтер секілді трансформаторлар, алмалы-салмалы контактілер, үлкен көлемді конденсаторлар және үлкен габариттері үшін интегралды компоненттер мен нашар қиыстырылады. Ерекше қиындықтары электрлік оңашаландыруды екі жүйелік байланыста қамтамасыз етеді: жоғары вольтты және төменгі вольтты. Бұл жерде оптоэлектроника көмекке келеді.

Оптоэлектроника – бұл ұрпақтану, өңделу, ақпаратты есте сақтау мен сақтап беру, электрлік және оптикалық құбылыстары бірге қолданылатын зерттелетін ғылым мен техниканың бөлімі. Жартылай өткізгішті оптоэлектронды аспап – бұл электромагнитті сәуле шығаратын немесе түрлендіруші (электромагнитті толқын), сезімталдық сәуле шығаруы көрінетін, инфрақызылды және ультра күлгін спектрлік облысындағы немесе осындай сәуле шығаруы элементтердің ішкі әрекеттесуі үшін жартылай өткізгіш аспап.

Когерентті емес электромагнитті толқындар – бұл фазалары бейберекет өзгертін және түрлі поляризацияланатын, әртүрлі жиіліктегі электромагнитті толқындар. Когерентті электромагнитті толқындар – бұл бірдей жиілік пен фазалары тұрақты жылжитын, электромагнитті толқын.

Оптоэлектронды жартылай өткізгіш аспаптардың классификациясы.

1. Жартылай өткізгіш сәуле шығарғыштар:

– сәуле когерентті емес жартылай өткізуші сәуле шығарғыштар (инфрақызылды сәуле шығарғыш диодтар; жартылай өткізгіш белгі индикаторлары; жартылай өткізгіш

шкаласы; жартылай өткізгіш экрандар; электролюминесцентті ұнтақты және таспалы сәуле шығарғыштар);

– жартылай өткізгіш шығарғыштар келесі түрлерге бөлінеді: әртүрлі қоздырушы жартылай өткізгіш лазер.

2. Жартылай өткізгіш сәуле шығарушы қабылдағыштар: фоторезисторлар; фотодиодтар; фотоэлементтер; фототиристорлар; зарядтық байланысқан аспаптар.

3. Оптрондар: резистрлі оптрондар; диодты оптрондар; транзисторлы оптрондар; тиристорлы оптрондар.

Оптикалық каналдың байланысын қолдануға рұқсат береді:

– кез келген сенімді электрлік оңашаландыруды қамтамасыз ету;

– қолайсыз, реактивті және контактілі компоненттерді шығару;

– құрылғының жұмысын сенімді жоғарылату.

Заманауи техникада аппараттарға байланысты, оптоэлектронды аспаптарға кең қолданыс тапты, аспаптар – оптикалық сәуле шығарғыштың энергиясы электрлікке түрленеді және керісінше.

Осылайша, оптоэлектроника – бұл оптика мен электрониканың синтезі. Ол оптикалық және электрлік өңдеу әдістерін заманауи қолданудың сұрақтарымен айналысады, ақпаратты сақтау және беру.

Когерентті емес жарық көзін қолдану: лампалық қыздыру, газзарядты лампамен, электролюминесцентті элементпен, инъекциялы жарық диодымен (лазер – оптикалық кванттық генераторлық өнертабыс) индукцияланған сәуле шығару көмегімен жарықтың күшеюі – когерентті оптиканың дәуірі келді. Қазіргі уақытта, лазерді қолдану кең таралған: әскери өндірістен денсаулық сақтау саласына дейін. Техникада лазер талшықты-оптикалық беру жүйесі өзіндік қолданысын тапты.

Оптоэлектроника – бұл оптикалық диапазонның электромагнитті толқыны ақпарат тасымалдаушы ретінде қолданылатын электрониканың бөлімі. Оптикалық сәуле шығарғыштың толқын ұзындығы 10 нм-ден 1 мм-ге дейінгі диапазонда жатыр. Толқынның оптикалық диапазоны қасиеті жағынан біртекті емес, осыған байланысты диапазон астыға

бөлінеді және олардың қасиеті біртекті: ультра күлгін сәуле шығарғыш – $\lambda=0,002-0,4$ мкм, көрінетін сәуле шығарғыш – $\lambda=0,38-0,78$ мкм, инфрақызыл сәуле шығарғыш – $\lambda=0,78-1000$ мкм.

Толқынның ұзындығының беріліс дәрежесі және әртүрлі жарық өткізгіш ортада сәуле сіңіруін анықтайды.

Оптоэлектроникада жарық сәулесі басқарудағы секілді функцияларды, электрлік сигналды электрлік тізбекке түрлендіруді және басқа да байланыстарды орындайды.

Оптикалық тізбектерде сигнал тасымалдаушылары ретінде электрлік бейтарап фотондар, олар жарық ағынында өзара әрекеттеспейді, араласпайды және әлсіздендірмейді. Оптикалық тізбектерге электрлік және магниттік өрістері әсерге ұшырамайды. Ақпарат тасымалдаушы ретінде электрлік бейтарап фотондарды қолдану қамтамасыз етеді:

- оптоэлектронды байланыс элементтері идеалды электрлік кіріс және шығыс тізбектерін шешеді;

- беріліс бірбағыттылығы және қабылдағыштың таратқышқа әсерінің жоқ болуы;

- оптикалық каналдың байланыс кедергісінің қорғанысы жоғары болғандықтан фотондардың электрлік және магниттік өрістерге зердесіздігі ықпал етеді.

- байланыс каналындағы паразиттік көлемнің процестің өтетін ұзындығына әсерсіздігі, паразиттік байланыс каналдарының жоқ болуы;

- әртүрлі кіріс және шығыс кедергілердің тізбекпен жақсы келісуі.

Электрлік тізбектерде заряд тасымалдаушы ретінде электрондар болып табылады, олар сыртқы электрлік және магниттік өрістермен әрекеттеседі және өз кезегінде экрандау мен қорғауды талап етеді. Электрлік тізбектерде гальваникалық шешімдер тұрақты ток пен төменгі жиіліктерде іске асыру үшін қиындық туғызады.

Оптикалық сәуле шығару әртүрлі сыртқы әсерлерге зердесіздігі және фотонның электрбейтараптылығы абыройы ғана емес, бірақ кемшілігі де, яғни интенсивтілікпен басқарылған жарық ағынының таратылуы қиындық туғызады.

Оптоэлектроника мен электрониканың компоненттері бар, бір-біріне қарама-қайшы емес, мақсатты және басқа да облыстарда қолданылады.

Оптоэлектроникада ақпарат беру құрылғылары жарық көзінде (фотосәуле шығарғыш) басқарылатын фотоқабылдағышқа жарық өткізгіш ортада (ауа, вакуум) жарық диодтарымен іске асырылады, оптикалық сәуле шығаратын өткізу рөлін орындайды. Жарық сызығы электрлік өткізгіш эквиваленттері және үлкен өту қабілеттілігімен сипатталады, секундына бірнеше гигабитке жететін ақпаратты береді, жылдамдығы жоғары жарық саны көп байланыс каналында қиыстыру мүмкіндігі бар. Оптикалық сәуле шығару толқын ұзындығына жеңіл бөлінеді, сондықтан бір жарық өткізгіш бірнеше ақпарат каналын байланыстыруға болады.

Жарық өткізгіште электрлік өрісінің жоқ болуы жоғарғы өрт және жарылыс қауіпсіздігін қамтамасыз етеді. Бұл қасиеттері байланыс сызықтарын төсеуде және автоматика құралдарын қауіпті ғимараттарда орнату кезінде маңызды. Оптоэлектронды құрылғылар интегралды технология бойынша дайындалады. Оптикалық интегралды сұлбалар кең жолақты өткізуге ие, дірілге төзімді емес, жоғары сенімділік, өндірістегі сериялық үнемділік, кіші өлшем мен масса.

Сәуле шығару аспаптары электрлік энергияны оптикалық сәуле шығару энергиясына толқын ұзындығы немесе еңсіз толқын ұзындығының анықталған диапазонында түрлендіреді.

Басқарылатын оптикалық сәуле шығару көзінің жұмыс негізінде келесі физикалық құбылыстар жатады:

- температуралық сәуле тарату;
- газзарядты сәуле шығару;
- электролюминесценциялы;
- индукцияланған сәуле шығару.

Жартылай өткізгіш сәуле шығарғыш аспаптардың жұмыс істеу принципінің негізі электролюминесценция құбылысы. Бұл сәуле шығару электрлік өріс әсерінен болатын жарық денелері. Электролюминесценция люминесценцияның жеке жағдайдағы құбылысы. Оптоэлектронды жартылай өткізгіш аспаптарда люминесценция кристаллдық жартылай өткізгіш қоспа ені рұқсат етілмеген аймақта қолданылады. Қатты, сұйық және газ текті денелер люминесценция болуы мүмкін.

6.5.1. Фотооткізгіш және фотоэффект заңдары

Фотоэффектінің негізгі заңы (фотоэффект – электромагниттік сәуле шығару зат әсерінен электрондық сәуле шығару, 1887 ж. неміс физигі Г. Герц ашты) 1888 ж. белгілі орыс физигі Г. Столетов анықтаған.

Фотоэффект заңы:

1. Электрондар саны I_c ішінде катодты тастап кететін интенсивті жарыққа тура пропорционалды.

2. Бірлік уақыттағы фотоэлектрондар саны сәуле шығару ағынының тығыздығына пропорционал, ал фотоэлектрондардың бастапқы максималды жылдамдығы жиіліктік сәуле шығару арқылы анықталады және интенсивті сәуле шығару ағынына байланысты емес.

3. Әрбір зат үшін электромагниттік толқынның шектік ұзындығы болады, ал фотоэффектіге (*фотоэффектінің қызыл шекарасы*) мүмкіндік беріледі.

4. Фотоэффекті практика жүзінде инерцияланбаған.

Жарық электромагниттік энергия ағынын көрсетеді (адамның көзі электромагниттік толқын ұзындығы $\lambda=0,7-0,4$ мкм шағылысады, қызыл және күлгін түстерге сәйкес). Толқындық, корпускулярлық табиғатына ие жарық сәуле шығарады немесе затпен қамтылып дискреттік энергия саны – фотондар немесе кванттартүрінде жүреді.

Кванттық энергия E электромагниттік толқынның сәуле шығару жиілігіне пропорционал, сәйкесінше, $E=hf$, мұндағы h – Планк тұрақтысы. Көрінетін диапазон жұмысы сәуле шығару үшін жартылай өткізгіш рұқсат етілмеген аймақ ені $1,5-3,0$ эВ болып табылады. Сондықтан, кванттық энергия – рекомбинациядан босатылған фотондар, көрінетін жарық квантының сәйкесінше кіріс жартылай өткізгіштің рұқсат етілмеген аймақ еніне қатысты. Кіші рұқсат етілмеген аймақ енінде кіріс жарылай өткізгіштің кванттық энергиясы инфрақызыл сәуле шығару облысына сәйкес келеді.

Бұл технологиясы жақсы өңделген германий мен кремний емес, арсенид галлий, фосфид галлий, нитрид галлий және кремний карбиді материалдары қолданылады.

Жартылай өткізгіштерде оптикалық сәуле шығару генерациясы инжекциялы электролюминесценцияны қамтамасыз етеді. Генерациялық оптикалық сәуле шығару *pn*-өткелінде екі процесті біріктіреді: инжекция тасымалдағышы және электролюминесценция.

Жарық ағынының әсерінен жартылай өткізгіш электрондары валенттік аймақта қосымша энергияға ие болады. Егер бұл электронның валенттік аймақтан өткізгіштік аймаққа ауыстыруы үшін энергия жеткілікті болса, «*электрон өткізгіштігі – кемтік өткізгіштігі*» жұптары пайда болады, нәтижесінде жартылай өткізгіштің өткізгіштігі ұлғая түседі.

Жарық ағынының әсерінен пайда болатын электрлік өткізгіштік *фотоөткізгіштік* деп аталады.

Қазіргі қарастырылған құбылыстар негізінде оптоэлектронды жартылай өткізгіш аспаптар құрастырылды. Басқаша айтқанда, бұл аспаптар жарық энергиясын электр энергиясына түрлендіреді және керісінше.

7. ЭЛЕКТРОНДЫ КҮШЕЙТКІШТЕР

Кейбір электронды аспаптардың маңызды функцияларының бірі – электр сигналдарын күшейту болып табылады. Электр сигналын күшейту бұл оның қуатын күшейту дегенді білдіреді. Электр сигналын күшейтуді қажет ететін бірнеше тәжірибелік жағдайларды қарастырамыз.

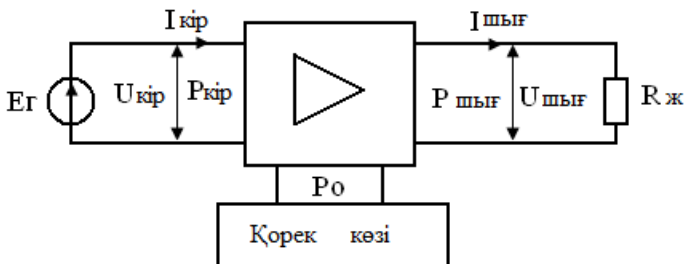
Ірі қалаларды радиомен қамтамасыз ету желілеріне мыңдаған дауысұлғайтқыштар қосады. Бағдарламаларды беру дыбыс толқындарын электрлік сигналға түрлендіретін микрофон арқылы жүзеге асырылады. Микрофон шығысындағы қуат микроваттарды құрайды. Бұл өте әлсіз электр сигналдары арнайы күшейткіштерге беріледі. Ал күшейткіштер сигналдарды барлық дауысұлғайтқыштар қоректене алатын қажетті қуатқа дейін күшейтеді. Бұл қуат бірліктер мен ондаған киловатты құрайды.

Телефон сөйлесулерін қалааралық кабельді байланыс желілері арқылы беру кезінде де осыған ұқсас жағдай орын алады. Сөйлесу кезінде берілетін дауыс электр сигналына түрленеді, ал қабылданатын дауыс кезінде электр сигналдары дыбыс толқынына айналады.

Электрлік тербелістерді кабель бойынша беру процесінде қуат жоғалады. Қалааралық телефон байланыстарының қалыпты жұмысы үшін бұл электр сигналдары күшейтіледі.

Телевизионды беру түтігінде кескіндер электр сигналдарына түрленеді. Кинескоп экранынан сәйкес кескінді алу үшін осы сигналдарды көп рет күшейту керек. Осыған байланысты, электр сигналдарын күшейту вещание, телекөрсетілім және байланыс аппаратураларының маңызды функцияларының бірі болып табылады.

Электр сигналдарын күшейткіште активті төрт полюс болады, яғни оның кірісіне ЭҚК E_r келетін күшейткіш сигнал көзі қосылады, ал шығысына R_n күшейткіш элементінің жүктемесі деп аталатын күшейтілген сигналды тұтынушы қосылады.



7.1-сурет. Күшейткіштің құрылымдық сұлбасы

Күшейткіш элементі (КЭ) ретінде биполярлы және өрістік транзисторлар қолданылады, ал жүктемеде өте үлкен қуат алу үшін электронды шамдар (лампалар) қолданылады.

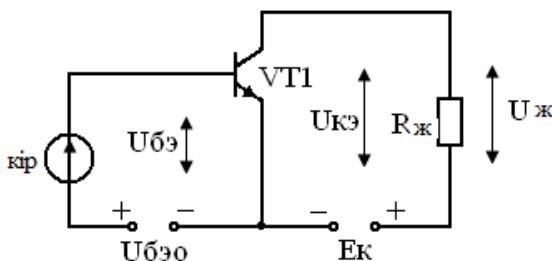
КЭ тізбегінде қорек көзі болады, ол КЭ электродтарын тұрақты кернеумен қамтамасыз етеді.

7.1. Электр сигналдарын күшейту

Күшейткіш – бұл сигналдың ақпараттық қасиеттерін сақтай отырып, кіріске берілген қуатқа қарағанда жүктемеден өте үлкен қуат алуға мүмкіндік беретін аспап.

Жүктемеден максималды қуат алу шарты – жүктеме кедергісінің $R_ж$ күшейткіш элементтің шығыс кедергісімен үйлесуі болып табылады.

Егер күшейткіш элементтің шығыс кедергісі жоғары болса, онда жүктеме кедергісі $R_ж$ де жоғары болатыны белгілі. Сұлбадағы КЭ – активті режимде жұмыс істейтін ОЭ (ортақ эмитерлі) биполярлы транзистор болсын (7.2-сурет).



7.2-сурет. ОЭ биполярлы транзистор негізіндегі күшейткіш сұлбасы

Транзистор кірісіне, яғни түзу бағытта қосылған оның эмиттерлі өткеліне электр сигналын $u_{к\text{ірі}}$ берейік. Осыған байланысты кіріс кернеудің $\Delta U_{к\text{ірі}}$ өзгерісі кіріс токтың $\Delta I_б$ елеулі өзгерісіне әкеледі. Ал сәйкесінше коллектор тогы $\Delta I_к = \Delta I_б h_{21э}$. Бұл ток жүктеме кедергісіндегі кернеудің өсуіне әкеледі:

$$\Delta U_{\text{шығ}} = \Delta I_к R_н = \Delta I_б h_{21э} R_ж. \quad (7.1)$$

$U_{\text{шығ}}$ кернеу $U_{к\text{ірі}} = I_б R_{к\text{ірі}}$ жоғары, өйткені $R_ж > R_{к\text{ірі}}$ ал ток $I_к > I_б$.

Осы арқылы сұлба кернеу және ток бойынша күшейтуді қамтамасыз етеді. Кірістегі кернеу $P_{к\text{ірі}} = I_б^2 R_{к\text{ірі}}$, ал шығыстағы кернеу $P_{\text{шығ}} = I_к^2 R_ж$, ал ток $I_к > I_б$ және $R_ж > R_{к\text{ірі}}$ болғандықтан, сұлба қуаттың да күшейтілуін қамтамасыз етеді.

Электронды лампалар мен өрістік транзисторлардың күшейту принципін осыған сәйкес түсіндіруге болады. Осыған байланысты кіріс тоғынсыз жұмыс істейтін кірістік транзисторлар мен лампалардағы басқару жұмысы тиімді атқарылады, себебі оларда $R_{к\text{ірі}}$ жоғары және кіріс сигналы берілуі кезінде шығыстағы ток өзгерісі орын алады.

7.1.1. Күшейткіш каскадтардың негізгі техникалық көрсеткіштері мен сипаттамалары

Күшейткіш каскадтардың техникалық көрсеткіштері олардың жұмысының сандық бағасын көрсетеді. Олар: күшейту коэффициенті (кернеу, ток және қуат бойынша), кіріс және шығыс кедергі, пайдалы әсер коэффициенті, сезімталдылық (номиналды кіріс кернеу), күшейтілетін жиіліктер диапазоны, сызықтық және сызықтық емес бұрмалану, динамикалық диапазон, жиіліктік, фазожиіліктік, өтпелі сипаттамалар.

Күшейту коэффициенті немесе *беру коэффициенті* деп шығыс сигналдың кіріс сигналға қатынасын айтады. Ол әдетте гармоникалық (синусойдалық) кіріс сигналы кезінде орнатылған режимде анықталады.

Кіріс және шығыс өлшемдердің түріне байланысты келесідей болып ажыратылады: кернеу бойынша күшейту коэффициенті $K_U = U_{\text{шығ}}/U_{к\text{ірі}}$; ток бойынша күшейту коэффициенті $K_I = I_{\text{шығ}}/I_{к\text{ірі}}$; қуат бойынша күшейту коэффициенті $K_P = P_{\text{шығ}}/P_{к\text{ірі}}$.

Көп каскадты күшейткіштер үшін жалпы күшейту коэффициенті жеке каскадтардың күшейту коэффициенттерінің көбейтіндісіне тең және ол келесі түрге ие:

$$K_U = K_{U1} K_{U2} \dots K_{Un}. \quad (7.2)$$

Дыбыстық сигналды есту арқылы қабылдау оның интенсивтілігінің (қарқындылық) логарифміне пропорционал. Екі тербелістің қуатын салыстыру кезінде логарифмдік бірлік енгізіледі – Бел немесе оның оннан бір бөлігі – децибел. Онда логарифмдік бірлік арқылы берілген күшейту коэффициенті мынаған тең:

$$\begin{aligned} K_U(\text{дБ}) &= 20 \lg(U_{\text{шығ}}/U_{\text{кір}}); & K_I(\text{дБ}) &= 20 \lg(I_{\text{шығ}}/I_{\text{кір}}); \\ K_P(\text{дБ}) &= 10 \lg(P_{\text{шығ}}/P_{\text{кір}}). \end{aligned} \quad (7.3)$$

Децибел бойынша берілген көп каскадты күшейткіштің күшейту коэффициенті осы бірлікте берілген күшейткіштің жеке каскадтарының күшейту коэффициенттерінің соммасына (қосу) тең:

$$K_U(\text{дБ}) = K_{U1} + K_{U2} + \dots + K_{Un}. \quad (7.4)$$

Кернеу және ток бойынша күшейту коэффициенті модульмен және фазамен сипатталатын кешенді өлшем болып табылады. Активті элементтер-транзисторлардың жиіліктік қасиеттері мен схеманың реактивті элементтерінен сигнал спектрінің жеке құраушыларының әртүрлі күшейтілуімен байланысты. Қуат бойынша күшейту коэффициенті әрқашан нақты сан болады, өйткені ол жүктеме активті болған кезде ғана саналады.

Кіріс және шығыс кедергі. Күшейткішті активті төрт полюс ретінде қарастыруға болады.

Шығыс қуат жүктемеде күшейтілетін номиналды қуатпен сипатталады.

Берілген гармоник коэффициенті немесе сызықты емес бұрмалану және есептелетін жүктеменің жұмысы кезінде күшейткіштің шығысындағы қуат:

$$P_{\text{шығ}} = \frac{U_{\text{шығ.м}}^2}{2R_{\text{н}}} . \quad (7.5)$$

Пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) күшейткіш арқылы берілетін (жүктемеге, қорек көзінен тұтынатын жалпы қуатқа) шығыс қуатының қатынасымен анықталады:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{шығ}}}{P_0} \right) \cdot 100 \%, \quad (7.6)$$

мұндағы P_0 – қорек көзінен тұтынатын қуат.

Сезімталдылық (номиналды кіріс кернеу) деп шығыста қажетті қуатты алу үшін күшейткіш кірісіне берілетін кернеуді атайды. Ол аз болған сайын, күшейткіш сезімталдылығы жоғары болады. Рұқсат етілетін минималды кернеу пайдалы сигналды бөлуге болмайтын фонда күшейткіш шуының деңгейімен шектеледі.

Күшейткіштің рұқсат етілетін максималды кіріс кернеуі ВАХ транзисторлардың сызықты емес бөліктеріндегі күшейткіш жұмысының есебінен сигнал формасының бұрмалануымен шектелген.

Кіріс кернеуінің рұқсат етілген үлкен мәніне кіші мәнінің қатынасын динамикалық диапазон деп атайды:

$$D = \frac{U_{\text{кр.мах}}}{U_{\text{кр.мин}}}; \quad D(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\text{кр.мах}}}{U_{\text{кр.мин}}} . \quad (7.7)$$

Күшейтілетін жиілік диапазоны (өткізу жолының) деп $\Delta f = f_{\text{в.гр}} - f_{\text{н.гр}}$ шектік жиілігінің әртүрлілігі болып табылады, яғни бұл шектік жиілікте күшейткіштің күшейту коэффициенті берілген нақты бір заңдылық бойынша өзгереді; өткізу жолында күшейту коэффициентінің өзгерісі 3дБ-ден жоғары болмайды.

Күшейту жиілігінің өткізу жолы күшейтілетін жиілік спектрінің енінен үлкен немесе еніне тең болуы керек. Ол аппаратураның класына және сапасына байланысты. Өткізу жолының кеңеюіне байланысты аппаратура бағасы өседі, құрылымы күрделенеді, түрлі себептерден туындайтын кедергілердің күшейткішке әсері көбейеді. Күшейткіш жұмысының сапасын жақсарту мақсатында тәжірибеде өткізу жолының шегін кішірейтеді.

Сигналдың бұрмалануы. Сигналдың қажетті күшейту коэффициентін алудан басқа, күшейткіш оның формасын өзгертпеу керек. Кіріс сигнал формасынан шығыс сигнал формасының ауытқуын бұрмалану деп атайды. Бұрмалану сызықты және сызықты емес болып бөлінеді.

Күшейткіш элементтерінің вольт-амперлік сипаттамалары сызықты емес болғандықтан сызықты емес бұрмалану болады. Транзистордың кіріс және шығыс сипаттамалары сызықты емес болғандықтан кіріске синусоидалы форманың кернеу күшейткішін береді, осы кезде жоғары гармониктерді құраушылардың пайда болуына байланысты кіріс және шығыс ток формасы синусоидалы формада ерешеленеді. Бұл басқа кез келген кіріс сигналына секілді, синусоидалы кіріс кернеуіне де қатысты. Сызықты емес бұрамаланудың деңгейі процентпен көрсетілген *күшейткіштің сызықты емес коэффициентімен* (клир-фактор) сипатталады:

$$K_r = \frac{\sqrt{P_2 + P_3 + \dots + P_n}}{\sqrt{P_1}} 100\% = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100\%, \quad (7.8)$$

мұндағы P_2, P_3, P_n —($U_2, U_3, \dots, U_n$) кернеуінің гармоникалық құраушыларындағы 2, 3, ..., n-ші әсерінен жүктемеде бөлінетін қуаттар; P_1 — U_1 кернеуінің негізгі гармоникалық құраушыларына негізделген жүктемедегі қуат.

Сызықты емес бұрмалануды бағалау кезінде көбінесе тек екінші және үшінші гармоникаларды ескереді, яғни жоғарылары аз қуатты болып келеді.

Көп каскадты күшейткіш үшін сызықты емес бұрмаланудың жалпы коэффициенті жеке каскадтар коэффициентінің суммасына тең болады:

$$K_{r\Sigma} = K_{1r} + K_{2r} + \dots + K_{nr}. \quad (7.9)$$

Сызықты емес бұрмалану кіріс сигналының амплитудасына байланысты және оның жиілігіне қатысты емес. Шығыс сигнал формасының бұрмалануын төмендету үшін кіріс сигнал амплитудасы төмен болуы қажет. Байланыста мұндай сызықты емес бұрмалану көп каскадты күшейткіштерде, әсіресе кірісіне

жоғары амплитудалы сигнал әсер ететін соңғы және шығыс каскадтарында туындайды.

Дыбыс жиілігінің күшейткіштерінде сызықты емес бұрмалану зыңылдап немесе қырыл сияқты қабылданады. $K_r < 2-3$ % кезінде олар тіпті естілмейді. Жоғары сапалы күшейткіштерде дыбыс жиілігі $K_r < 0,2$ %, ал көп каналды байланыс күшейткіштерінде – каналдардың өзара кедергілерін болдыратын жүздеген, мыңдаған процент мөлшері болады.

Сызықты бұрмалану транзистор параметрлеріне байланысты күшейткіш қондырғыларының реактивті және жиілікті элементтерімен анықталады.

Сызықты бұрмаланудың үш түрі бар: жиілікті, фазалы және өтпелі.

Жиілікті бұрмалану жиіліктің жұмыс диапазонындағы нақты және идеалды сипаттамаларының сәйкес болмайтынымен байланысты. Бұл бұрмалану күшейткіш сигналының жиілігіне қатысты пайда болады.

Жеке жиіліктердегі бұрмалану деңгейі M жиілікті бұрмалану коэффициентімен көрсетіледі, ол K_0 орташа жиіліктегі күшейту коэффициентіне берілген жиіліктегі күшейту коэффициентінің қатынасына тең. Жиілікті бұрмаланудың көбісі $f_{в.гр}$ және $f_{н.гр}$ жиілігінің жұмыс диапазоны шегінде туындайды.

$$M_n = \frac{K_0}{K_n} = 20 \lg \left(\frac{K_0}{K_n} \right) [\text{дБ}]; \quad M_b = \frac{K_0}{K_b} = 20 \lg \left(\frac{K_0}{K_b} \right) [\text{дБ}]. \quad (7.10)$$

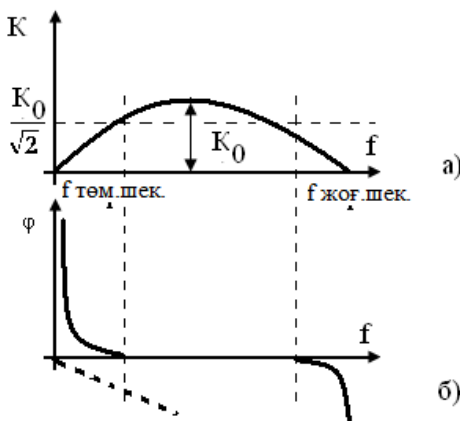
Егер $M > 1$, онда берілген жиілік аумағында жиілікті сипаттамасы төмендейді, ал $M < 1$ болса, көтеріледі. Көп каскадты күшейткіштің жиілікті бұрмалану коэффициенті былай анықталады:

$$M = M_1 M_2 \dots M_n [\text{раз}]; \quad M = M_1 + M_2 + \dots + M_n [\text{дБ}]. \quad (7.11)$$

Күшейткіштің бір каскадында туындайтын жиілікті бұрмалану компенсацияланған болуы мүмкін, себебі жалпы жиілікті бұрмалану коэффициенті берілген шектен ауытқымау керек. Жиілікті бұрмалану көлемі күшейткіштің арналуына байланысты анықталады.

Күшейткіште жиілікті бұрмалану әрдайым кіріс және шығыс сигналының арасында болатын фазалар қозғалысымен жүреді, олар *фазалы бұрмаланудың* болуын шақырады. Бұл фазалар қозғалысы күшейткіштің реактивті элементтері арқылы болатын процесс. Күшейткіш каскады бар фаза бұрылысы ескерілмейді.

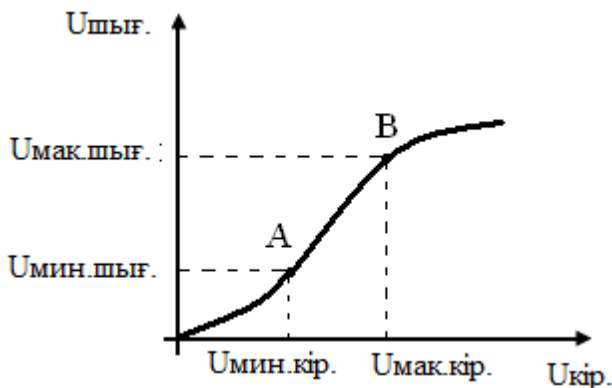
Күшейткіштің фазалы бұрмалануы фазалы-жиілікті $\varphi=F(f)$ сипаттамасымен бағаланады. Фазалы-жиілікті сипаттаманың графигі жиілік әсерінен болатын күшейткіштің кіріс және шығыс кернеулерінің арасындағы фазалар қозғалысының бұрышына байланысты (7.3, б-сурет). Жиілік әсерінен фазалы қозғалыс сызықты болса, күшейткіште фазалы бұрмалану болмайды. Идеалды фазалы-жиілікті сипаттама координаттың басынан басталатын түзу сызық болып табылады (7.3, б-суретте пункті сызық көрсетілген).



7.3-сурет. Күшейткіш сипаттамалары:
а – амплитудалы-жиілікті; б – фазалы-жиілікті

Амплитудалы сипаттама синусоидалы кіріс кернеуінің амплитудасы мен шығыс кернеуінің бірінші гармоникасының амплитудалы мәнінің байланыстылығымен анықталады: $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$ (7.4-сурет).

Амплитудалы сипаттама кернеудің шығысында өзінің кедергілері мен шуы болғандықтан координаттың бас жағы арқылы өтпейді.



7.4-сурет. Күшейткіштің амплитудалы сипаттамасы

В нүктесінен жоғары қарай шығыс кернеуі мен кіріс кернеуінің байланыс сызығы бұзылады, шығыс кернеуінде қосымша жиілікті құраушылар пайда болады, сосын сызықты емес бұрмалану туындайды. Оның себебі бір немесе екі жарты толқынды шығыс сигналының максимал кернеуінің шектелуі болып табылады. Бұл шектеулер ең үлкен кіріс сигналында жұмыс істейтін күшейткіштің соңғы каскадтарында туындайды.

Амплитудалы сипаттама арқылы күшейту коэффициентін, динамикалық диапазонды, кіріс сигналының минималды және максималды рұқсат етілген мәнін және өзінің шу деңгейін анықтауға болады.

Өтпелі сипаттама күшейткіштің шығыс кернеу уақытына байланыстылығын көрсетеді, күшейткіштің кірісіне біркелкі секірісті кернеу берілген. Бұл сипаттама күшейткіштің бір жағдайдан басқа жағдайға өту процесін анықтайды. Кіріс кернеуінің секірмелі өзгерісі өтпелі және стационарлы режимнің әсерінен күшейткіштің реакциясын анықтауға мүмкіндік береді.

Күшейткіште өтпелі процестің сипаттамасы сыйымдылықтағы кернеу мен индуктивтілікте токтың өзгеруіне әкелетін L , C реактивті элементтерінің болуымен байланысты.

Кіріске импульс беру кезінде шығыстағы кернеудің секіrmелі өзгеруі мүмкін емес.

Қорытынды: Күшейткіштің негізгі көрсеткіштері: кіріс және шығыс көлемі; күшейткіштің ПӘК-і; күшейткіштің күшейту коэффициенті; жиіліктің өткізу жолы; сызықты және сызықты емес бұрмалану; күшейткіштің динамикалық диапазоны және өзіндік шуы. Күшейткіштің күшейту коэффициенті шығыс кернеу, ток және қуат кіріс кернеуден, токтан немесе қуаттан қанша есе үлкен екенін көрсетеді. Сызықты бұрмалану схеманың реактивті элементтеріне негізделген және ол жиілікті, фазалы болып екіге бөлінеді. Сызықты емес бұрмалану күшейткіш элементінің сызықты емес амплитудалық сипаттамасына негізделген.

7. 2. Күшейткіш каскадтардың күшейту кластары

Күшейткіш каскадтардың арналуына байланысты оларға мынадай талаптар қойылуы мүмкін:

- күшейткіштің анықталған жиілікті-фазалы сипаттамасы арқылы күшейту коэффициентінің мәнін алу;
- кіріс және шығыс кедергілерінің мәнін алу;
- күшейткіш параметрлерінің тұрақтылық мәндерін және сызықты емес бұрмалану мәндерін алу;
- күшейткіштің максималды ПӘК мәнін алу;

Күшейткіштің берілген мәндері сәйкес келетін схемамен, күшейткіштің каскадтар санымен, кері байланыс орнатумен және т.б қамтамасыз етіледі.

Күшейткіштің ПӘК-і күшейткіш элементтерінің, әсіресе соңындағы каскадтың жұмыс режиміне байланысты.

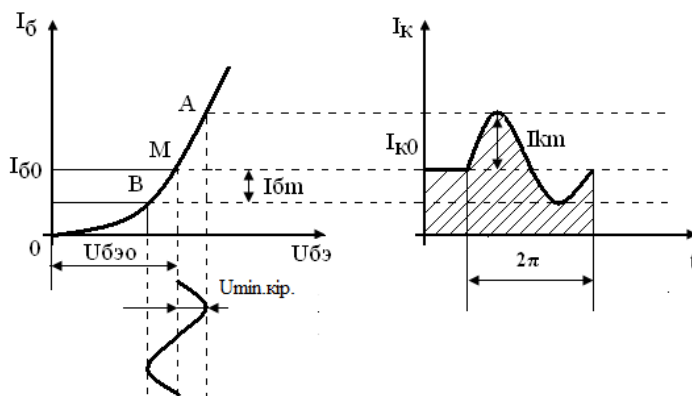
Күшейткіш элементтердің жұмыс режимін қарастырайық (күшейту кластары): AB , AB , C , D .

Жұмыс режимі күшейткіш аспаптың электрод тізбегінде ағатын ток пен КЭ электрод арасындағы тұрақты кернеумен анықталады және θ қиылысының бұрышымен сипатталады.

Ө қиылысының бұрышы градуспен көрсетілген периодтың күшейткіш аспап арқылы ағып өткен ток бөлігінің жартысымен сипатталады.

А күшейту класы – бұл транзисторлы каскадтың жұмыс режимі, яғни кіріс сигналы кернеуінің өзгеру периоды кезінде транзистордың шығыс тізбегінен токтың ағуы. Ағу бұрышы $0=180^\circ$.

Бұл режимдегі күшейткіш элементтің тыныштық нүктесін таңдайды, оны таңдау үшін шығыс ток бір периодта ағып өту керек, яғни тыныштық нүктесі жұмыс сипаттамасының сызықты аймағының ортасында болуы керек (7.5-сурет).



7.5-сурет. А класс режиміндегі күшейткіш каскад жұмысының графикалық иллюстрациясы

Кіріс сипаттамасындағы (7.5-сурет) жұмыс нүктесін таңдау кезінде кіріс сигнал толығымен сызықты аймаққа сыю керек, ал $I_{\text{б0}}$ тыныштық тогының мәні сызықты аймаққа орналасуы керек.

А класының режимі сызықты аймақ транзисторының жұмысымен сипатталады. Бұл сигналдың минималды сызықты емес бұрмалануына негізделеді ($K_r < 1\%$).

Кіріс сигнал салдарынан пайда болған кіріс және шығыс тогын құраушы айнымалы амплитудасы А режимінде $I_{\text{б0}}$ және $I_{\text{к0}}$ токтарын жоғарылата алмайды.

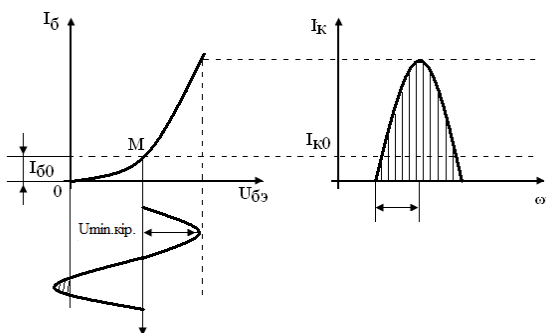
Онда күшейткіштің ПӘК-і мынаны құрайды:

$$\eta = \frac{P_{\text{шығ}}}{P_0} = \frac{U_{\text{шығ.м}} I_{\text{шығ.м}}}{2 I_{\text{шығ.0}} E} = \frac{U_{\text{шығ.м}} I_{\text{шығ.м}}}{4 I_{\text{шығ.0}} U_{\text{шығ.0}}} \leq 0,125. \quad (7.12)$$

Осыған байланысты күшейткіштің ПӘК-і каскадтың А режимінде 40 %-дан төмен. Бұл режим минималды сызықты емес бұрмалану қажет жағдайда қолданылады, ал пайдалы қуат пен ПӘК негізгі болып табылмайды. Бұл алдын ала күшейтудің және аз қуаттың шығыс каскадтары болып табылады.

АВ күшейту класы – бұл транзисторлы каскадтың жұмыс режимі, яғни кіріс сигналы кернеуінің жартыдан көп периодқа өзгеруі кезінде транзистордың шығыс тізбегінен токтың ағуы.

АВ класының режимі күшейтілетін сигналдың сызықты емес бұрмалануын азайту үшін қолданылады. Мұндай бұрмаланулар ВАХ транзисторлардың бастапқы сызықты емес аумақтарынан туындайды (7.6-сурет).



7.6-сурет. АВ класы режимі кезіндегі күшейткіш каскад жұмысының графикалық иллюстрациясы

АВ класы режимінде ағу бұрышы $\pi/2$ -ден жоғары және 120° – 130° -ға жетеді.

АВ режиміндегі екі такты каскадтың жұмысы кезінде екі такты каскад тогының оң және теріс жартылай толқындары жабылады. Бұл ВАС транзисторының бастапқы аймақтарындағы сызықты емес бұрмалану есебінен алынған бұрмалану компенсациясына ($K_r \leq 3\%$) әкеледі.

АВ режимінде жұмыс істейтін каскадтардың ПӘК-і А класының каскадтарына қарағанда жоғары, бірақ тыныштық кіріс тогының I_{B0} аз болғанынан В класына қарағанда аз.

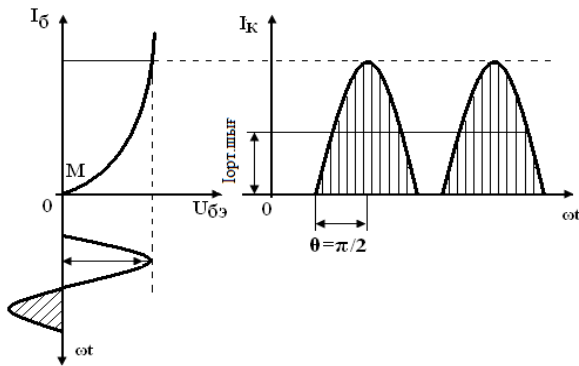
В күшейту класы – бұл транзисторлы каскадтың жұмыс режимі, яғни ток кіріс сигналының жарты периодында ағып өтеді.

ВАС транзисторында жұмыс нүктесі тыныштық тогы нөлге тең болатындай етіп таңдалынады (7.7-сурет).

В класының режимінде транзистор кіріс сигналының жарты периодында ғана ашық болады. Бұл жағдайда шығыс тогы ағу бұрышы $\theta=90^\circ$ импульс формасында болады.

Каскад тұтынатын аз қуат 60–70 % аралығындағы жоғары ПӘК алуға мүмкіндік береді. В класының режимі басқа транзисторда (каскадтың басқа жауырынында) токтың пайда болуының әсерінен бір транзисторда (бірінші жауырынында) токтың ағуы токтатылатын аумақтағы екі такты каскадтарда қолданылады.

Бастапқы аймақтың сызықты еместігінен транзистор сипаттамаларындағы шығыс тогының графиктегі формасы сызықты байланыс формасынан ерекшеленеді.



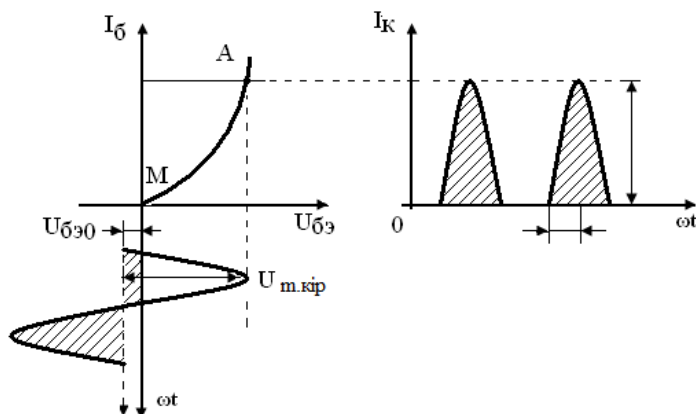
7.7-сурет. В класы режиміндегі күшейткіш каскад жұмысының графикалық иллюстрациясы

Осыған байланысты В класының режимі сигналдың үлкен сызықты емес бұрмалануымен сипатталады ($K_r < 10\%$), және бұл режим қуатты екі такты күшейту каскадтарында қолданылады,

бірақ оны таза күйінде сирек қолданады. Негізінде жұмыс режимі ретінде АВ аралық режимін қолданады.

С күшейту класы – күшейту каскадының жұмыс режимі, яғни кіріс сигналы кернеуінің өзгерісінде жарты периодтан аз интервалында транзистордың шығыс тізбегіндегі токтың ағуы.

Ол транзистордың бекітілген аймағындағы тыныштық нүктесінің таңдауымен сипатталады (7.8-сурет).



7.8-сурет. С күшейту режиміндегі күшейту каскадының графикалық жұмыс істеу иллюстрациясы

Жұмыс уақытының жартысынан көп уақытында транзистор жабық, қорек көзінен тұтынатын қуат төмендейді, сондықтан каскад ПӘК-і жоғарылайды, яғни 100 %-ға жақындайды.

Ағу бұрышы $\pi/2$ -ден төмен, ал тыныштық тогы нөлге тең. Ток импульсінде ағу бұрышы төмендеген сайын жоғары гармоник деңгейі өседі.

Үлкен сызықты емес бұрмалануға байланысты С класының режимі дыбыс жиілігінің күшейткіштерінде қолданылмайды, оны радиожіліктің екі такты қуат күшейту каскадтарында қолданады, бұл радиожілік бірінші гармониканың тогын жүктеуге мүмкіндік береді.

D күшейту класы – транзисторлы каскадтың жұмыс режимі, яғни орнатылған режимде күшейту элементі «қосулы» (биполярлы транзистордың қанықтыру режимі) немесе

«сөндірулі» (биполярлы транзистордың ағу режимі) жағдайда болады.

Жабық күйде болғанда транзистор арқылы аз ғана кері ток ағады, оның электрлік кедергісі үлкен, ондағы кернеудің түсуі қорек көзінің кернеуіне тең.

Ашық күйде болғанда транзистор арқылы үлкен ток ағады, оның электрлік кедергісі өте аз, ондағы кернеудің түсуі де өте аз. Осыған байланысты D класының режиміндегі транзистордың шығыны өте аз және каскадтың ПӘК-і 100 %-ға жақындайды.

Осылай күшейткіштің жұмыс істеу режимі тыныштық режиміндегі активті элементтің жұмыс нүктесімен анықталады. A класының режимінде транзистор минималды сызықты емес бұрмаланумен және токтың ағуынсыз жұмыс жасайды. AB , B , C және D режимдерінде транзистор токтың ағуы арқылы жұмыс жасайды.

Қорытынды: күшейткіш ПӘК-і күшейткіш элементтің жұмыс режимімен анықталады және оның ағу бұрышымен байланысты. Күшейткіш каскадтың жұмыс режимін шығыс тогы кіріс сигналының бір периодында ағып өтуіне байланысты шығыс тогының ағуы бар (AB , B , C , D) және ағуы жоқ (A) деп екіге бөлуге болады. Шығыс тогының ағуымен жұмыс жасайтын күшейткіш ең үлкен ПӘК-ке ие болады.

7.2.1. Кері байланыс түрлері

Кері байланыс (КБ) – бұл сигнал кері берілетін (шығыстан кіріске) күшейткіш тізбектерінің арасындағы байланыс, яғни алдыңғы каскадтан кейінгісіне емес, керісінше беріледі.

Кері байланыстың барлық түрлері күшейткіш құрылғының қасиетін өзгерте алады, сондықтан олар күшейткіш параметрлерінің бағытталған өзгерісі үшін қолданылады. Жалпы жағдайда кері байланыс сигналы кіріс сигналға қосылуы (оң кері байланыс – ОКБ) мүмкін немесе күшейткіштің кіріс сигналынан шегерілуі (теріс кері байланыс – ТКБ) мүмкін.

Кері байланыс күшейткіште келесі үш себептен пайда болуы мүмкін:

– күшейткіш аспаптардың физикалық қасиеттері – мұндай кері байланысты ішкі кері байланыс деп атаймыз. Мысал ретінде анод сыйымдылығы – лампалардағы $C_{дс}$ торының немесе база сыйымдылығы – транзистордағы $C_{БК}$ коллекторының есебінен пайда болатын кері байланысты айтуға болады;

– сұлбалардағы индуктивті және т.б. байланыстарда сигналды кері беру үшін жолдар жасайтын паразитті сыйымдылықтардың болуы. Мұндай байланыстарды паразитті кері байланыс деп атайды.

– сұлбаға арнайы тізбектерді енгізу салдарынан. Мұндай байланыс түрін сыртқы кері байланыс деп атайды.

Сыртқы және паразитті байланыс түрлерін басқару мүмкін емес, және олар басқа бағытта күшейткіш қасиеттерін жиі өзгертіп тұрады, мысалы, АЧХ-ның бұрмалануына және күшейткіштің өздігінен қозуына әкелуі мүмкін.

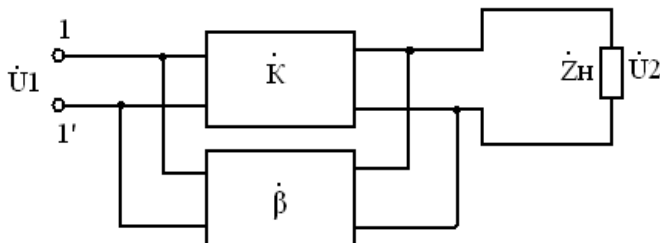
Сыртқы кері байланыс оңай басқарылады және оны күшейткіш көрсеткіштерін жақсарту үшін енгізеді: күшейту коэффициентінің тұрақтылығын жоғарылату, бұрмаланулардың барлық түрлерін төмендету, өздік кедергілерін азайту, т.б.

Күшейткішті және кері байланысты біріктірілген екі төртполюс түрінде қарастыру, біреуі бір бағытты күшейткіш болса (K – күшейткіштің күшейту коэффициенті), екіншісі кері байланыс тізбегі (β – КБ тізбегінің беріліс коэффициенті) болып табылады. Бұл төртполюстерді түрлі әдістермен байланыстыруға болады (7.9–7.13-сурет): тізбекті, параллель, тізбекті-параллель, параллель-тізбекті және аралас түрінде.

Аралас кері байланыс (КБ) кірісі мен шығысы бойынша (7.13-сурет) көп каналды аппаратураларда қолданылады, мұндағы кері байланыс төртполюсінің аралас қосылуы арнайы трансформаторлар және кіріс не шығыс алтыполюс түріндегі басқа элементтер көмегімен жүзеге асады (6 п).

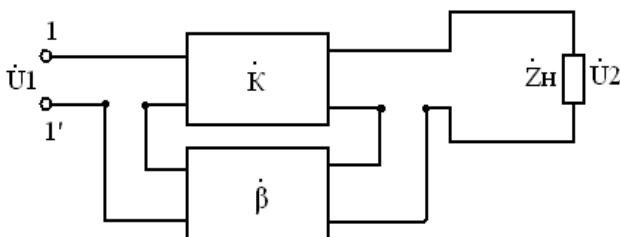
Жоғарыда аталғандар келесідей ажыратылады:

1) кірісі мен шығысы бойынша параллельді кері байланысты кернеуі бойынша параллельді КБ деп те атайды (7.9-сурет):



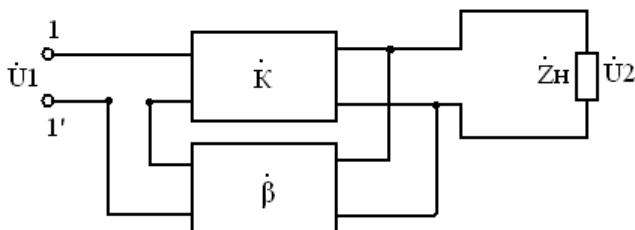
7.9-сурет. Кірісі мен шығысы бойынша параллельді кері байланыс-кернеуі бойынша параллельді КБ

2) кірісі мен шығысы бойынша тізбекті КБ-ты ток бойынша тізбекті КБ деп те атайды (7.10-сурет):



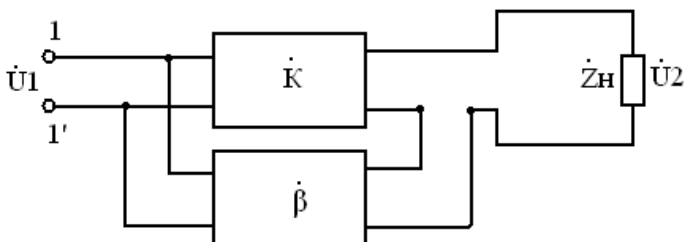
7.10-сурет. Кірісі мен шығысы бойынша тізбекті КБ-ты ток бойынша тізбекті КБ

3) кірісі мен параллельді шығысы бойынша тізбекті КБ кернеуі бойынша тізбекті КБ деп те атайды (7.11-сурет):



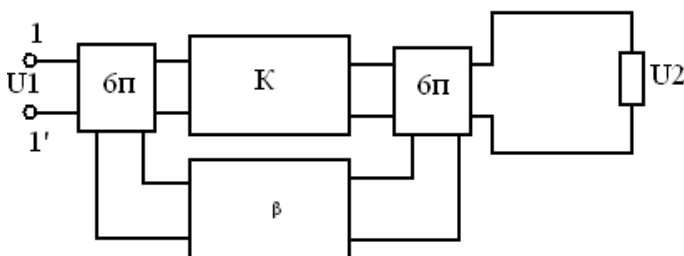
7.11-сурет. Кірісі мен параллельді шығысы бойынша тізбекті КБ-кернеуі бойынша тізбекті КБ

4) кірісі мен тізбекті шығысы бойынша параллельді КБ-ты ток бойынша параллельді КБ деп те атайды (7.12-сурет):



7.12-сурет. Кірісі мен тізбекті шығысы бойынша параллельді КБ-ты ток бойынша параллельді КБ

5) кірісі мен шығысы бойынша аралас кері байланыс (немесе соңындағы біреуінде) (7.13-сурет).



7.13-сурет. Кірісі мен шығысы бойынша аралас КБ – тізбекті-параллельді КБ (6 п – кіріс және шығыс алтыполус)

Кері байланыс түрін анықтау үшін келесі ережелерді қолдануға болады: жүктеменің қысқа тұйықталуы кезінде кері байланыс кернеуі сақталса, онда ток бойынша кері байланыс жүзеге асады, егер де нөлге ұмтылса, онда кернеу бойынша.

Әдетте күшейткіштерде ОЭ, ОК, ОБ және КБ бар каскадтар қолданылады, КБ түрін кіріс тізбекке оның сигналын беру тәсілімен анықтауға болады. Егер кері байланыстың сигналы транзистор эмиттеріне (бастау) түсетін болса, онда байланыс тізбекті, ал егер базаға (жаппа) берілетін болса, онда байланыс параллельді болады. Кері байланыстың түрін анықтау үшін (ОКБ

немесе ТКБ) күшейткіш схемасының барлық нүктелеріндегі кіріс сигнал толқындарының өтуін қарау керек.

Күшейткіштің бір бағытты күшейту коэффициенті және кері байланыс коэффициенті (β) жалпы жағдайда кешенді өлшемдер болып табылады. Осы жағдаймен кері байланыс тізбегіндегі және күшейткіштің өзіндегі реактивті элементтер есебінен жоғарғы және төменгі жиіліктерде болатын фазалық қозғалыс орын алуы мүмкін. Орташа жиілікті диапазонда жұмыс істеу кезінде егер ОС тізбегінде реактивті элементтер болмаса, онда (K) және (β) параметрлері заттық өлшем болып табылады.

7.2.2. Каскадтар арасындағы байланыс түрлері

Күшейткіштердегі каскад аралық байланыс схемалары энергия беру үшін қызмет етеді: сигнал көзінен күшейткіштің кірісіне; алдыңғы каскадтан келесі каскадқа; соңғы каскадтан жүктемеге. Каскад аралық байланыс схемалардың минималды немесе рұқсат етілетін жиілікті және фазалық бұрмаланулары, сонымен қатар аз шығынды болуы керек. Бұл схемалар бір уақытта күшейткіш элементтің электродына қорек көзінен кернеу беру үшін қызмет етеді, сонымен қатар күшейткіш каскадтарына немесе күшейткіштің толық өзіне белгілі бір касиеттерді беру үшін арналған.

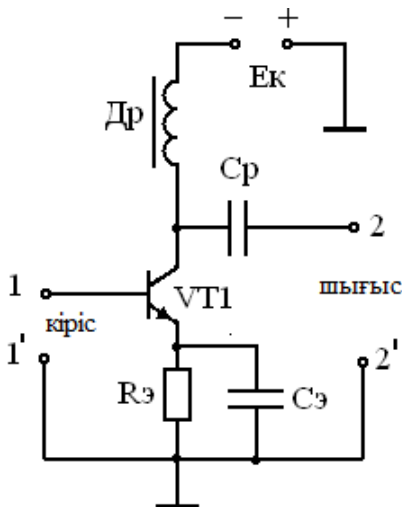
Кіріс және шығыс тізбектерінің каскад аралық байланыс схемалары симметриялы тізбектен симметриялы емес тізбекке өту үшін немесе керісінше процестің болуын қамтамасыз етеді. Мысалы, байланыстың өткізу желісі симметриялы тізбек болса, ал күшейткіш симметриялы емес тізбек болып табылады.

Симметриялы кернеу екі такты каскадтарды қоздыру үшін керек, олар жалпы жүктеме үшін кері фазада жұмыс істейтін екі күшейткіш элементті құрайды.

Тәжірибеде каскад аралық байланыстың мына түрлері кеңінен қолданылады: дроссельді-сыйымдылықты байланыс, трансформаторлы байланыс, резисторлы-сыйымдылықты байланыс және тікелей байланыс. Күшейткіш каскадтың атауы өзінде қолданылатын каскад аралық байланыс схемасы арқылы анықталады, яғни бір күшейткіш элементтің шығысын екіншісінің кірісімен байланыстыратын тізбекпен анықталады.

7.2.3. Дроссельді-сыйымдылықты байланыс

Мұндай байланыстың қарапайым схемасы 7.14-суретте көрсетілген.

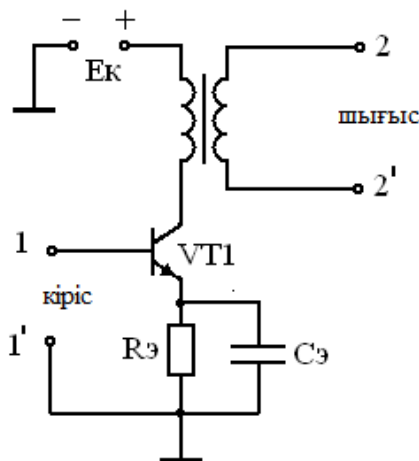


7.14-сурет. Дроссельді-сыйымдылықты байланысты каскадтың схемасы

Бұл каскад жоғары ПӘК-не ие, ал оның күшейту коэффициенті резисторлы каскадтарға қарағанда жоғары. Қазіргі таңда дроссельді каскадтарды сирек қолданады, себебі олардың өткізу жолы тар, габаритті өлшемдері үлкен және бағасы қымбат.

7.2.4. Трансформаторлы байланыс

Трансформаторлы каскадтарда каскад аралық байланыс үшін трансформаторлар қолданылады, олардың біріншілік орамын күшейткіш элементтің кірісіне, ал екіншілік орамды басқарушы электродтың тізбегіне қосады (7.15-сурет).



7.15-сурет. Трансформаторлы байланысы бар каскадтың схемасы

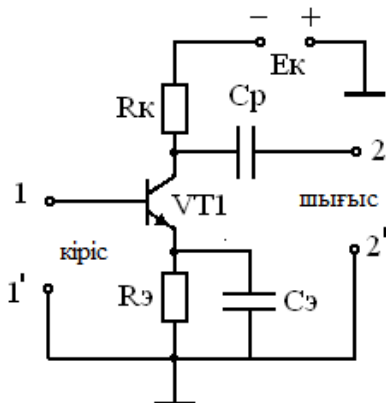
Шығыс транзисторының айнымалы құраушысы біріншілік орамнан өткенде ондағы сигнал кернеуі түседі, ол сигнал екіншілік орамға ауыстырылады және келесі каскадтың кірісіне беріледі.

Трансформаторлы байланыстың артықшылықтары: резисторлы байланысты қолдануға қарағанда жоғары күшейту коэффициентін алу мүмкіндігі; шығыс симметриясын қамтамасыздандыру; каскадтың кедергі және шу бойынша жүктемемен үйлесуі; қорек көзінің төменгі кернеуімен жұмыс істеу мүмкіндігі, яғни тұрақты құраушы кернеуінің түсуі трансформатордың біріншілік орамындағы активті кедергінің болуына негізделген.

Трансформаторлық байланыстың кемшіліктері: үлкен габаритті өлшемді каскадтардың қымбат болуы, сыртқы магнитті өрістен қорғау қажеттілігі, сонымен қатар трансформатордың төменгі және жоғарғы жиіліктегі реактивті құраушыларына негізделген жиілікті-фазалық сипаттамаларының нашарлауы.

7.2.5. Резисторлы-сыйымдылықты байланыс

Резисторлы-сыйымдылықты байланыс айнымалы ток күшейткіштерінде қолданылады (7.16-сурет.).



7.16-сурет. Резисторлы-сыйымдылықты байланысы бар каскадтың сұлбасы

R_k резисторында бөлінетін айнымалы токтың күшейткіш сигнал кернеуі келесі каскадқа беріледі. C_p конденсаторының сыйымдылығы оның кедергісі төменгі шектік жиілікте және келесі каскадтың кіріс кедергісінен төмен болатындай етіп таңдалынады.

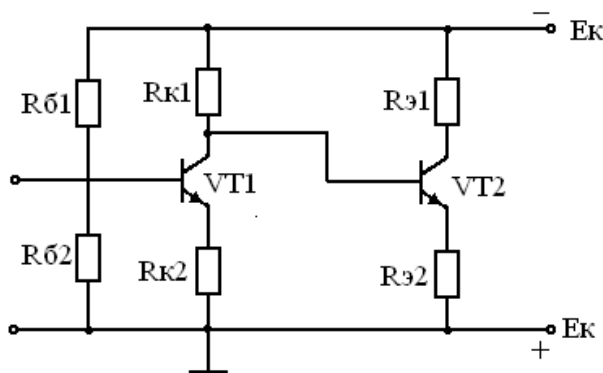
Схеманың артықшылықтары: аз габаритті өлшемдері, салмағы және бағасы; жеткілікті жиілікті-фазалық және өтпелі сипаттамалар; тұрақты ток бойынша жұмыс істейтін каскадтарға жұмыс режимінің әсері жоқ яғни, анодта жоғары оң кернеуі бар және торда теріс кернеуі бар лампалы каскадтарда маңызды орын алады.

Резисторлы-сыйымдылықты байланыстың кемшіліктері: тізбектің төменгі ПӘК-і; бөлгіш конденсатор кедергісінің жоғарылауынан төменгі жиіліктегі күшейтудің төмендеуі; уақыт бойынша жай өзгертін сигналдың берілу мүмкіндігінің болмауы; күшейткіштерде тұрақты токты қолдану мүмкіндігінің болмауы.

7.2.6. Тікелей байланыс

Жоғарыда қарастырылған каскад аралық байланыс тізбектері уақыт бойынша жәй өзгертін сигналдарды және тұрақты құраушысы бар сигналдарды бере алмайды.

Сондықтан тұрақты ток күшейткіштерінде каскад аралық тікелей (гальваникалық) байланыс қолданады (7.17-сурет).



7.17-сурет. Тікелей байланысы бар каскад сұлбасы

Тікелей байланыс деп каскад аралық байланыс тұрақты ток өткізгіші бар элементтер арқылы жүзеге асырылатын байланысты айтады (резисторлар, стабилитрондар, гальваникалық элементтер, т.б). Бұл жағдайда алдыңғы каскадтың күшейткіш элементінің шығыс электроды содан кейінгі каскадтың басқарушы электродымен тікелей байланысқан.

Тікелей байланысы бар каскадтың артықшылықтары: өте төменгі, орта және жоғарғы жиілікті сигналды күшейту мүмкіндігі; каскад аралық тікелей байланыс интегралды технология бойынша күшейткіштерді дайындауға мүмкіндік береді, бірақ мұнда аспалы элементтерінсіз басқа байланыстарды қолдану мүмкін емес.

Тікелей байланысы бар күшейткіштердің кемшіліктері: бір қорек көзі бар тұрақты ток бойынша каскадтардың қалыпты жұмыс істеу режимін қамтамасыздандырудың қиындығы,

сонымен қатар температураның өзгеруі нәтижесінде шығыс кернеудің өздігінен өзгеруі, күшейткіш элементтердің параметрлері, т.б.

Қорытынды: Каскад аралық байланыстар сигнал энергиясын синал көзінен күшейткіш кірісіне және алдыңғы каскадтан келесі каскадқа беру үшін қызмет етеді. Каскад аралық байланыстар резисторлы-сыйымдылықты, трансформаторлы, дроссельді-сыйымдылықты және тікелей деп аталатын байланыстарға жіктеледі. Осылардың ішінде өзінің қарапайымдылығы мен жақсы жиілікті-фазалық сипаттамаларына байланысты резисторлы-сыйымдылықты және тікелей байланыстар кең таралған. Резисторлы сыймдылықты байланысты айнымалы ток күшейткіштерінде қолданады, ал тікелей байланыс уақыт бойынша жай өзгеретін сигнал күшейткіштерінде және интегралды технология бойынша орындалған күшейткіштерде қолданылады. Трансформаторлы байланысты симметриялы трактан симметриялы емес трактқа (немесе керісінше) өту үшін арналған күшейткіштің кіріс және шығыс тізбектерінде қолданады, сонымен қатар күшейткіштің кіріс және шығыс кедергісінің сигнал көзі мен жүктеме кедергісімен үйлесуі үшін қолданылады. Трансформаторлы байланысты дыбыс жиілігі күшейткішінің шығыс каскадтарында қолданады. Тікелей байланысы бар күшейткіштерде тұрақты ток бойынша каскад аралық өзара әсерлесуін болдырмау үшін ТКБ қолданылады.

7.3. Дифференциалды күшейткіштер

Дифференциалды күшейткіштері (ДК) тұрақты ток күшейткіштерінің арасында кең таралған түрі.

Тұрақты ток күшейткіштері (ТТК) дегеніміз жай электрлік тербелістерді барынша күшейтуге мүмкіндік беретін күшейткіш.

Күшейтудің төменгі жиілігі нөлге ұмтылады, ал жоғарғысы тұрақты ток күшейткішіндегі сияқты ТТК арналуына байланысты таңдалынады.

ТТК-ға тән сипаттама нөл дрейфі $-\Delta U_{\text{вх}} = 0$ кезіндегі шығыс сигналының өздігінен өзгеруі. Дрейфтің туындауының себебі күшейткіштің қорек көзінің тұрақсыздығы және қоршаған орта

температурасының өзгеруі немесе басқа тұрақтандырғыш факторлардың нәтижесінде жартылай өткіш аспаптар мен басқа элемент схема параметрлерінің өзгеру ерекшеліктері болып табылады.

Мысалы, E_k қорек көзі ЭҚК-нің өсуі кезінде ΔE_k болады, ол R_1 және R_2 бөлігіші арқылы транзистор базасына беріледі, осының нәтижесінде база тогы I_b өзгереді және бұл транзистор коллекторындағы потенциалдың төмендеуіне әкеледі.

ОЭ схемасында $K_u \gg 1$ болады, бұл $\Delta U_{кэ}$ өзгерісі, ΔE_k карағанда жоғары болады. Жүктемемеде шығыс кернеуінің теріс өсімшесі пайда болады – дрейф сигналы.

Дрейф сигналы жәй өзгертін өлшем болып табылады. Күшейткіштің жұмысы кезінде $U_{вх} \gg U_{др}$ -ны қамтамасыздандыру керек. Әйтпесе шығыста дрейфті пайдалы сигналдан айыру мүмкін емес. Сапалы ТТК-ні жасау үшін дрейф нөлін азайту керек немесе толығымен жою керек.

Жұмыс режимінің қорек көзін тұрақтандыру кезінде температура бұл үшін тиімсіз болып табылады, яғни аз ғана ауытқуларда ТТК күшейеді.

Нөл дрейфімен күресудің тиімді құралы теңестірілген көпір тәсілін қолданатын каскадтар болып табылады. Осыған байланысты кең таралған түрі дифференциалды күшейткіштер болып табылады.

ОЭ каскадты қарастыру кезінде бірқатар қиындықтар туындады:

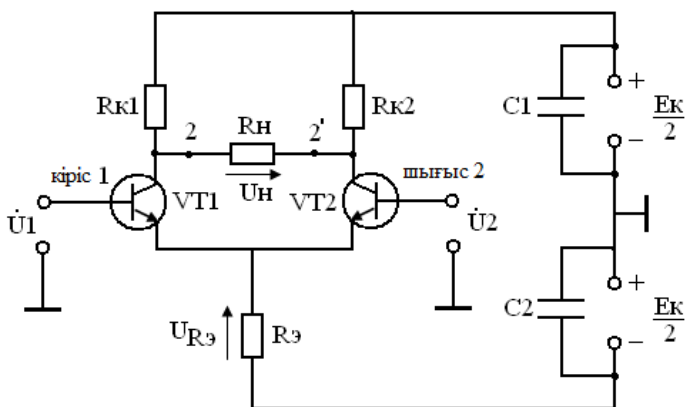
1. R_3 резисторының көмегімен тыныштық режимін тұрақтандыру кезінде болатын теріс кері байланыс әрекеті нәтижесінде каскадтың күшейту коэффициенті төмендейді.

2. Каскад аралық байланыс кезінде K_u резистивті элементтердегі шығын әсерінен азаяды. K_u төмендеуін болдырмас үшін күрделі қорек көзі бар схеманы қолдану қажет.

3. Күшейткіштерде нөл дрейфі болады.

Бұл кемшіліктердің барлығы дифференциалды каскадта толығымен жойылған.

ДК-тің бір түрі 7.18-суретте көрсетілген.



7.18-сурет. Дифференциалды каскадтың принципиялды сұлбасы

Дифференциалды каскадты әдетте *параллельді-балансты-каскад* деп те атайды.

ДК құрылысында елеулі ерекшеліктер бар: оның екі кірісі бар (немесе симметриялы кіріс) және эмиттер тізбектерінде жалпы R_3 кедергіге ие.

Сонымен қатар ДК-де қорек көзінің ортаңғы нүктесімен байланысқан өткізгіш – *ортақ өткізгіш* болып табылады. Бұл корпусқа қатысты транзистор коллекторындағы үлкен тұрақты кернеуді жою схемасының кедергі өлшемдерін жинау жолымен болады және осы арқылы бөлгіш тізбектерінсіз жүктемені қосуды қамтамасыз етеді.

Және де, осы жағдайда транзистор базаларының тізбектерінде бөлгіш қолданбауға болады. Ығысу кернеуі базаға *Вход 1* және *Вход 2* қысқыштарына қосылатын сигнал көзінің ішкі кедергісі арқылы беріледі. Осы жағдайда нөл дрейфін азайту үшін міндетті түрде бұл кедергілер тең болуы қажет. Екі кірістің бар болуы екі фазалы сияқты бір фазалы сигналдарды да күшейтуге мүмкіндік береді.

Өз кезегінде, екі фазалы сигнал парафазалық (дифференциалды) немесе синфазалық болуы мүмкін. *Парафазалық сигнал* корпусқа қатысты тізбек қысқыштарындағы

потенциалдардың әртүрлі таңбаларымен сипатталады, ал *синфазалық* – бірдей болады.

Бірфазалы сигналды күшейту кезінде потенциалды өткізгіш алдыңғы каскадтан ДК кірістерінің біріне жалғанады. ДК-тің екінші кірісі кедергісі алдыңғы каскадтың ішкі кедергісіне тең болатын резистор арқылы корпуспен жалғанады.

7.18-суретте бейнеленген дифференциалды каскадтың жұмыс істеу принципін қарастырайық.

Сигнал жоқ кезде кірістегі $U_{кэ1}$ және $U_{кэ2}$ тең, сондықтан шығыс кернеулер $U_n = U_{кэ2} - U_{кэ1} = 0$.

Енді схемаға қосфазалық сигналдар берейік, яғни *1 кіріс* және *2 кіріс* екі түрлі полярлы кернеу берейік, мысалы, *1 кіріске* «+», ал *2 кіріске* «-». VT₁ транзисторы үлкен болып ашылады, ал керісінше VT₂ жабыңқырайды. Бұл $I_{к1}$ тогының көбеюіне алып келеді. Нәтижесінде $U_{кэ1}$ кернеуі азаяды. $I_{к2}$ тогы азаяды, ал $U_{кэ2}$ кернеуі артады. Жүктеменің кедергі тізбегінде 2'-2 бағытындағы ток пайда болады. Полярлылықты ауыстырғында схема кірісінде (сигнал көзінің кернеуі) кері процесс орын алады.

Егер 1 және 2 кірістеріне полярлылығы бір бірдей сигнал берсе, онда екі транзистор да ашылады (немесе жабылады) және шығыс кернеулер $U_n = U_{кэ2} - U_{кэ1} = 0$.

Егер кіріс симметриялы болмаса, онда зиянды сигналдар қабылданып және пайдалы сигналдармен бірге күшейе бастайды. Бірақ егер күшейткіште дифференциалды кіріс болса, екі кіріске де кедергі кернеуі беріледі, нәтижесінде олар схеманың өзімен азайтылады (өшіріледі).

Күшейткіштің үлкен синфазалық кедергі фонында аз дифференциалды сигналды ерекшелей алу қасиеті ДК-тің маңызды сипаттамаларының бірі болып табылады.

R_z резисторы әртүрлі тұрақтандырғыш факторлар әсері кезінде әрбір транзисторда синфазалы сигналдардың күшеюін азайтатын және каскад шығысындағы нөл дрейфін төмендететін теріс кері байланыс жасайды.

7.3.1. Дифференциалды күшейткіштердің негізгі көрсеткіштері

ДК-ның негізгі көрсеткіштеріне мыналар жатады: күшейту коэффициенті K_o , синфазалы сигналдардың (кедергі) әлсіреу коэффициенті $K_{осс}$ кіріс және шығыс кедергі, жиілікті диапазон.

Күшейту коэффициентін келесі түрде анықтауға болады. Егер де кіріс қысқыштарына $U_{к\text{ірі}}$ сигнал кернеуі берілсе, онда әрбір транзистордың (VT_1 , VT_2) база-эмиттер аймағына $\frac{U_{к\text{ірі}}}{2}$ кернеуі беріледі және коллекторларда $g_{21} - \frac{U_{к\text{ірі}}}{2} R_k$ -ге тең потенциал пайда болады, бірақ белгісі бойынша қарама-қарсы.

$R_{нжүктеме}$ кедергісінің 2–2' қысқыштарына қосу кезінде күшейту коэффициенті мынаған тең болады:

$$K_o = g_{21} R_2, \quad (7.12)$$

мұндағы $R_2 = \frac{R_k R_n}{R_k + R_n}$, яғни бұл мән ортақ эмиттер схемасының күшейту коэффициентіне тең.

Синфазалы сигналдың әлсіреу коэффициенті мына қатынаспен бағаланады:

$$K_o = \frac{K_c}{K_o}, \quad (7.13)$$

мұндағы K_c – синфазалы сигналдың күшейту коэффициенті.

Қосфазалы сигнал үшін ДК-тің кіріс кедергісі транзисторлардың кіріс кедергісінің соммасына тең, яғни $R_{к\text{ірі, ду}} = 2h_{11}$, және ондаған $k_{Ом}$ -ды құрайды.

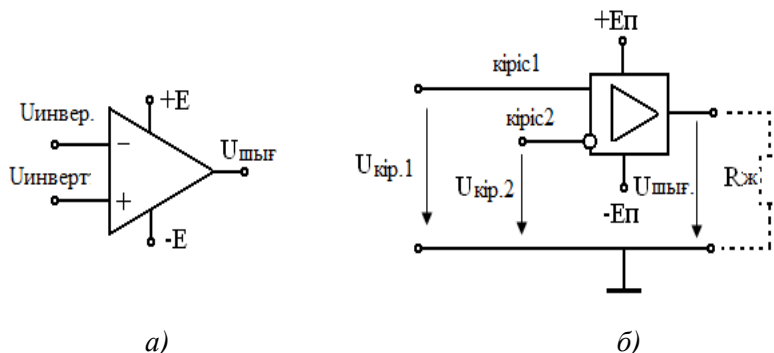
ДК-тің шығыс кедергісі $R_{шығ. ду} \approx 2R_k$ өлшемі бойынша бұл да ондаған $k_{Ом}$ -ды құрайды.

7.4. Операционды күшейткіш

Операционды күшейткіш (ОК) – бұл бірыңғайланған көп каскадты күшейткіш, электрлік параметрлердің келесі шарттарын қанағаттандырады: $K_u \rightarrow \infty$; $R_{к\text{ірі}} \rightarrow \infty$; $R_{шығ} \rightarrow 0$; $f_v \rightarrow \infty$. ОК барлық аналогты электрониканың негізін құрайды,

яғни ОК-тің барынша күрделі құрылымын бір кристалда интегралды орындалуын жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Мұның бәрі ОК-ті электронды схеманың диод, транзистор, т.б секілді қарапайым элементтері ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. ОК-тің шартты белгісі 7.19-суретте көрсетілген.



7.19-сурет. ОК: а – шартты-графикалық белгісі; б – қосу сұлбасы

«+» таңбалы кіріс оң болып табылады, яғни осы кіріске кіріс сигналын беру кезінде сигнал полярлығы шығыста өзгеріссіз қалады.

«-» таңбалы кіріс теріс болып табылады, яғни осы кіріске сигнал беру кезінде шығыста оның полярлығы қарама-қарсы болып өзгереді. Үшбұрыштың бүйір жақтарында қорек көзін қосу шығыстары орналасқан. ОК жұмыс істеу принципі қарапайым күшейткішпен бірдей. Ол кіріс сигналының кернеуін немесе қуатын күшейтуге арналған.

ОК қондырғы параметрлері КБ тізбегінің параметрлерімен анықталатындай етіп күрделі теріс кері байланыс схемасында қолдану үшін арнайы жасалған.

Егер де ОК оң кері байланысты болса, автотербелістің өздігінен қозуы туындауы мүмкін: күшейткіш генераторға айналады, және барлық ОК-тің параметрлері нашарлайды.

ОК-ті тәжірибеде қолдану күшейткіштің ішкі құрылысын білуді қажет етпейді. Тораптардың негізгі функционалды және схемотехникалық ерекшеліктерінің жұмыс істеу принципін оқып үйрену ОК-тердің техникалық мүмкіндіктерін анықтауға және

сыртқы құрылғылар көмегімен сипаттамалары мен параметрлерін түзетуге мүмкіндік береді.

7.4.1. Операционды күшейткіштердің параметрлері

ОК күрделі электронды құрылғы болып табылады, дұрыс қолдану оның жұмысының ерекшеліктерін түсіну мен негізгі параметрлерін білуге байланысты. ОК-тің жұмысын сипаттайтын негізгі параметрлер төменде келтіріледі:

Күшейту коэффициенті K кері байланыс жоқ кезінде (10^3 – 10^7 құрайды) дифференциалды кіріс сигналына осы өсімшені туғызатын шығыс кернеуінің қатынасына тең және шығыстағы бос жүріс кезінде анықталады:

$$K = \frac{U_{\text{шығ}}}{U_{\text{кір}}}. \quad (7.14)$$

$U_{\text{см}}$ орын ауыстыру кернеуі, бұл кернеу ОК шығысында $U_{\text{шығ}} = 0(0,5 - 0,15 \text{ мВ})$ болатындай етіп, кірісіне қандай кернеу беру керек екенін көрсетеді. Бұл кіріс транзисторларындағы эмиттер-база кернеуінің нақты емес үйлесімі болып табылады.

Кіріс ток $I_{\text{кір}}$ биполярлы транзисторлардағы кіріс дифференциалды каскадтың қалыпты жұмыс режимімен анықталады. Бұл ДК кіріс транзисторларының ток базасы. Егер де дифференциалды каскадтарда өрістік МДЖ-транзисторлар қолданса, онда ток азаяды.

Кіріс тогының әртүрлілігі $\Delta I_{\text{кір}}$ шығыс кернеуінің берілген мәнінде ОК-тің кірістері арқылы ағатын токтардың әртүрлі мәндердеріне тең және 0,1 – 200 нА-ді құрайды.

Кіріс кедергі $R_{\text{кір}}$ (кіріс пен шығыс арасындағы кедергі) сигнал жиілігінің берілген мәнінде кіріс тогының өсімшесіне кіріс кернеу өсімшесінің қатынасына тең. Ол төменгі жиіліктегі аумақтар үшін анықталады. Берілетін сигналдың сипаттамасына байланысты кіріс кедергі дифференциалды (дифференциалды сигнал үшін) және синфазалы (синфазалы сигнал үшін) болып табылады.

Дифференциалды кіріс кедергі – басқа кіріс ортақ шығыспен байланысып тұрған кезіндегі кез келген кірістің толық кедергісі

болып табылады; ондаған кОм-ды және жүздеген МОм-ды құрайды. Мұндай үлкен $R_{\text{кір}}$ кіріс ДК есебінен болады.

Синфазалы кіріс кедергі – бұл тұйықталған шығыс арасындағы кедергі болып табылады. Ол кіріске бірнеше рет жоғары $R_{\text{кір.диф}}$ және синфазалы сигнал беру кезінде орташа кіріс тогының өзгеруімен сипатталады.

Синфазалы сигналдың әлсіреу коэффициенті $K_{\text{осс}}$ екі кіріске берілетін синфазалы сигналдың кернеуі секілді анықталады. Әлсіреу коэффициенті дифференциалды сигналдың күшейту коэффициенті синфазалы кіріс сигналының күшейту коэффициентінен қанша есе үлкен екенін көрсетеді, және 60–120-ны құрайды.

$$K_{\text{осс}} = K_o = \frac{K_{\text{диф}}}{K_{\text{сф}}} . \quad (7.15)$$

Шығыс кедергі $R_{\text{вых}}$ сигнал жиілігінің берілген мәнінде шығыс кернеуінің өсімшесінің шығыс тогы активті құраушысының өсімшесіне қатынасымен анықталады және жүздеген Ом-ды құрайды.

Ығысу кернеуінің температуралық дрейфі ығысу кернеуінің максималды өзгерісінің және оның өзгерісін тудырған температураға қатынасына тең, ол мкВ/градпен бағаланады:

$$\alpha_{\text{см}} = \frac{\Delta U_{\text{см}}}{\Delta T} . \quad (7.16)$$

Ығысу кернеуінің және кіріс токтарының температуралық дрейфі ОК құрылғыларының температуралық қателіктерінің себепшісі болады.

Шығыс кернеуіне қорек көзінің тұрақсыздығының әсер коэффициенті қорек көзі кернеуінің 1 В-қа өзгерісі кезінде шығыс кернеудің өзгерісін көрсетеді және мкВ/В-пен бағаланады.

Максималды шығыс кернеу ОК жұмысының тұрақтылығын қамтамасыз ететін берілген жүктеме кедергісі мен кіріс сигналы кернеуі кезінде ОК-тің шығыс кернеуінің шектік мәнімен анықталады. $U_{\text{макс. шығ.}}$ қорек көзі кернеуінен 1–5 В-қа төмен.

Максималды шығыс тогы $I_{\text{макс. шығ}}$ ОК кіріс каскадының рұқсат етілген коллекторлық тогымен шектеледі.

Тұтынатын қуат – ажыратылған жүктеме кезіндегі таратылған ОК қуаты.

Бірлік күшейту жиілігі f_1 – ОК күшейту коэффициентінің 1-ге тең кезіндегі кіріс сигналының жиілігі:

$$|K(f_1)| = 1. \quad (7.17)$$

Интегралды ОК-дегі бірлік күшейту жиілігі 1000 МГц-ке жетеді.

ОК-тің қима жиілігі f_c -күшейту коэффициенті $\sqrt{2}$ есе азаятын жиілік. Ол ОК өткізу жолын анықтайды және ондаған МГц-ті құрайды.

Шығыс кернеудің максималды өсу жылдамдығы $U_{\square_{\text{вых. max}}}$ амплитудалы тік бұрышты форма импульсінің кірісіндегі жұмыс кезінде ОК-тің шығыс кернеуі өзгерісінің үлкен жылдамдығымен анықталады, ол кіріс кернеуінің максималды мәніне тең және 0,1–100В/мкс аралығында жатыр. Бұл параметр ОК негізіндегі таржолды және импульсты құрылғы үшін арналған. Ол үлкен сигнал режимінде ОК-тің жылдам жұмыс істеуімен сипатталады.

Шығыс кернеуді орнату уақыты $t_{\text{уст}}$ (өтпелі процестің аяқталу уақыты) – бұл күшейткішті шығыс бойынша қанықтыру күйінен сызықты режимге қайтару үшін қажетті уақыт.

Кіріске әкелінетін шулар кернеуі – бұл операциянды күшейткіштің күшейту коэффициентіне бөлінген сигнал көзінің нөлдік кедергісімен және нөлдік кіріс сигналы кезіндегі күшейткіш шығысының кернеу мәнімен анықталады. Шудың спектральды беріктігі шудың берілген кернеу квадратынан алынған түбір секілді бағаланады. Ол шу кернеуі өлшенген жиіліктерге бөлінген.

7.4.2. Операционды күшейткіштердің классификациясы

МЕСТ 4.465-86 стандартына сәйкес барлық ОК параметрлері бойынша келесі топтарға бөлінеді: универсалды (әмбебап) және жалпы қолданыс үшін арналған; прецизионды немесе инструменталды; тез әрекет етуші; микроқуатты. Әр топтан алынған ОК-дің бірнеше түрлерінен салыстырмалы мәліметтер келтіреміз.

7.4.2.1. Тезәрекет етуші тар жолақты ОК

Тез өзгеретін сигналдарды түрлендіру үшін қолданылады. Олар шығыс сигналының жоғары өсу жылдамдығымен, орнату уақытының аздығымен, бірлік күшейтудің жоғарғы жылдамдығымен сипатталады, ал басқа параметрлері бойынша жалпы түрде қолданылатын ОК-ге ұқсайды.

7.4.2.2. Прецизионды (жоғары нақтылықты) ОК

Жоғарғы деңгейлі кедергілері бар аз электр сигналдарын (өлшеу аспаптарының құрамында) күшейту үшін қолданылады, ығысу кернеуінің аз мәнімен және оның үлкен күшейту коэффициенті бар температуралық дрейфімен, жоғарғы және төменгі деңгейлі шумен, синфазалы сигналдың азаюымен сипатталады.

7.4.2.3. Жалпы қолданыстағы ОК

Жалпы кедергісі 1 %-дан аспайтын аппаратура тораптарын құру үшін қолданылады. Орташа деңгейлі параметрлерімен және арзандығымен сипатталады.

7.4.2.4. Қуатты және жоғары вольтты ОК

Жоғары вольтты элементтермен құрылған шығыс каскадтары бар күшейткіштер. Мысалы, К157УД1, К1040УД2.

Олардың негізгі параметрлері: шығыс ток $I_{\text{шығ}} \geq 100 \text{ мА}$; шығыс кернеуі $U_{\text{шығ}} \geq 15 \text{ В}$.

7.4.2.5. Микроқуатты ОК

Бұл тұтынылатын қуат лимиттелген жағдайда қажет (автономды қорек көзі бар айнымалы құрылғылар, күту режимінде жұмыс істейтін аспаптар). Тұтынылатын ток $I_{\text{макс.тұт.}} \leq 1$ мА. Бұларға К140УД14, 28. К153УД4 күшейткіштері жатады.

7.4.2.6. Көп каналды ОК

Жалпы қолданыстағы күшейткіштерге тән параметрлерге немесе каналдарды бөлу коэффициенті бар микроқуатты күшейткіштердің параметрлеріне ие. Олар көп габаритті көрсеткіштерді жоғарылатуға және аппаратураның энергия тұтынуын азайту үшін қолданылады. Батыс фирмалары екі еселенген прецизионды және тез әрекет ететін күшейткіштерді шығарады. Мысалы, К140УД20, К157УД2, К574УД2, К1040УД1, т.б.

Қорытынды: ОК параметрлеріне қойылатын талаптар олардың орындай алатын функцияларына байланысты. Әрбір жағдайда ОК түрін берілген талаптарды жоғарғы деңгейде қанағаттандыра алуына байланысты таңдалады. ОК-ны таңдау кезінде олардың параметрлеріне байланысты белгілі бір қарама-қайшылықтар туындайды, сондықтан арнайы тағайындалуы бар ОК-ны жасау қажеттілігі туындайды. Мысалы, тар жіберу жолағы бар жоғары жиілікті және шығыс кернеуінің жоғары өсу жылдамдығы бар ОК. Бірақ бұл жағдайда шығыста минималды қателігі бар ОК алу өте қиын. Басқа жағдайларда параметрлердің жоғарғы нақтылығына қол жеткізеді. Мұндай ОК-лар прецизионды (жоғары нақтылықты) деп аталады. Жалпы қолданыстағы ОК-лар – универсалды, көп функционалды болады және олар көбінесе байланыс аппаратураларында қолданылады.

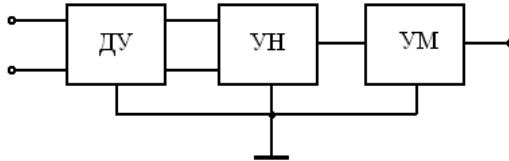
7.4.3. Операционды күшейткіштердің құрылғылары

7.20-суретте үш каскадты ОК-ның қысқартылған құрылымдық схемасы көрсетілген.

Жеке каскадтардың тағайындалуы келесідей:

Дифференциалды күшейткіш (ДК) парафазалық сигналдың үлкен күшейту коэффициенті бар, салыстырмалы түрде кіріс

кедергісі жоғары және синфазалық сигналды қатты әлсіретеді, сонымен қатар қорек көзі кернеуінің өзгерісіне, температураға және басқа да тұрақтандырғыш факторларға сезімталдығы төмен.



7.20-сурет. Үш каскадты ОК-ның құрылымдық сұлбасы

Кернеу күшейткіш (КК) – аралық каскад. Ол кернеу және ток күшейтуді жүзеге асырады, кіріс және соңғы каскад арасындағы үйлесімді құрылғы болып табылады және ОК шығысындағы тыныштық кернеуін нөлге дейін төмендетеді. Ал ОК секілділер тікелей байланысы бар күшейткіш болып табылады, тұрақты құраушы кірістен шығысқа жоғарылатылған түрде беріледі және аралық каскад оны нөлге дейін төмендетеді. Аралық каскадтарда кернеу бойынша күшейту коэффициентін жоғарылату үшін динамикалық жүктемелер қолданылады, ал каскадтар схемада симметриялы немесе симметриялы емес түрде тұрғызылады.

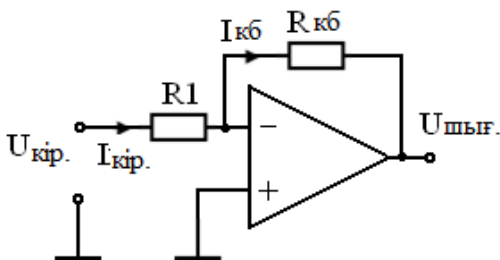
Қуат күшейткіші (ҚК) – ОК-ның соңғы каскады. Ол аралық каскадты жүктемес үшін салыстырмалы жоғарғы кедергіге және аз шығыс кедергіге ие болуы тиіс. Бұл жұмысты эмиттерлі немесе бастау қайталағышы орындайды.

7.5. Операционды күшейткіш базасында орындалатын функционалды тораптар

7.5.1. Терістейтін күшейткіштер (инверторлар)

Кіріс сигналының көзі болып генератор $U_{вх}$ қызмет етеді, ол резистор R_1 арқылы ОК-ның инверсті кірісіне қосылады. Өз кезегінде резистор генератордың ішкі кедергісінің қызметін атқарады (7.21-сурет). Кері байланыс кернеуі резистор $R_{кб}$

арқылы ОК шығысынан инверсті кіріске беріледі. ОК-ның тура кірісі жерлендіріледі.



7.21-сурет. Инверттейтін күшейткіштің принципіалды сұлбасы

Тура кіріс жерлендірілді, осыған байланысты инверттелген кіріс потенциалын тәжірибе жүзінде «жер» потенциалына тең деп есептеуге болады.

Негізінен ОК-ның инверттелген кірісі үлкен $R_{вх}$ ие, мұндай жағдайды жерлендірілген деп атауға болады.

Инверттелеген кіріс потенциалының нөл теңдігі R_1 кернеудің түсуі U_{kip} -не тең, ал R_{OC} резисторындағы кернеудің түсуі $U_{шығ.}$ -на тең.

Күшейткіштің кіріс тізбегі арқылы ток өтпейді ($R_{ОК,КБ}$ шексіздікке ұмтылады), сондықтан $I_{kip} = I_{kb}$.

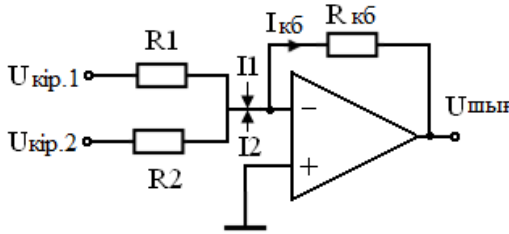
$$I_{kip} = U_{kip} / R_1, \text{ а } U_{вых} = R_{kb} I_{kb} \quad \text{болғандықтан,}$$

$$K = \frac{U_{шығ.}}{U_{kip}} = -\frac{R_{OC}}{R_I} \quad (7.18)$$

аламыз.

7.5.2. Аналогты сигналдардың бірігуі (сумматор)

Аналогты сигналдарды біріктіру үшін инверттейтін күшейткіш қолдануға болады, яғни ОК инверттейтін кірісіне біріктіруге арналған бірнеше кернеу беріледі (7.22-сурет).



7.22-сурет. ОК-дағы сумматор

Қайтадан ОК-ның идеалданған сипаттамаларына жүгінеміз, яғни $U_+ = U_- = 0$ тең деп санаймыз және ОК-ның кіріс тогын нөлге теңдеп есептейміз. Осыған баланысты сумматор кірісіндегі токтар келесі мәндерге ие:

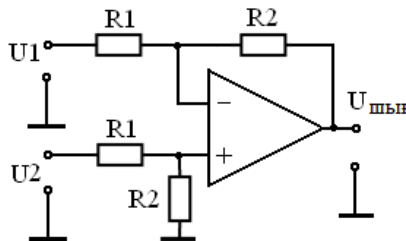
$$I_1 = \frac{U_{\text{кiр.1}}}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_{\text{кiр.2}}}{R_2}; \quad I_{\text{OC}} = I_1 + I_2, \quad (7.19)$$

ал шығыс кернеу:

$$U_{\text{шығ}} = -\left(\frac{R_{\text{OC}}}{R_1} U_{\text{кi.1}} + \frac{R_{\text{OC}}}{R_2} U_{\text{кiр.2}}\right). \quad (7.20)$$

7.5.3. Дифференциалды күшейткіштер

Көбінесе тәжірибеде дифференциалды кірісі бар күшейткіштер қажет болады. Мұндай дифференциалды күшейткіш құрылғы түрін ОК базасында оңай жасауға болады. Ок базасындағы дифференциалды кірісі бар күшейткіштің қарапайым схемасы 7.23-суретте көрсетілген.



7.23-сурет. ОК базасындағы ДК-тің қарапайым сұлбасы

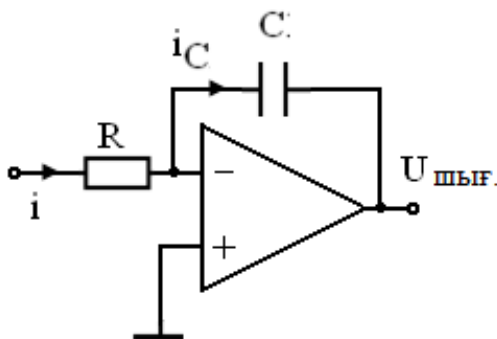
Шығыс кернеу мына түрде анықталады:

$$U_{\text{шығ}} = (U_2 - U_1) \frac{R_2}{R_1}, \quad (7.21)$$

Схеманың кемшілігі – төменгі кіріс кедергісі. Оны жоғарылату үшін қайталағыштар қолданылады. Қайталағыштардың өте үлкен кіріс кедергісі ретінде бұл схема тәжірибе жүзінде сигнал көзінен ток тұтынбайды.

7.5.4. Интегратор және дифференциатор

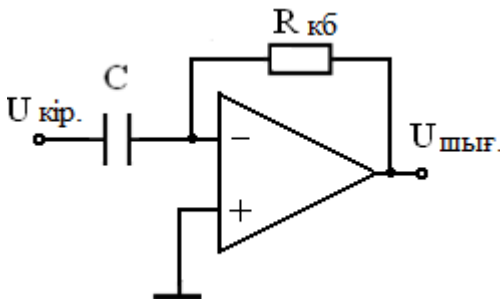
Егер ОК-тің кері байланыс тізбегіндегі шығыс пен кірісінің арасына конденсатор қосса, онда интегралданған күшейткіш схемасын (интегратор) аламыз (7.24-сурет).



7.24-сурет. Интегратор

Әдеттегідей ОК-ны идеал түрінде қарастырамыз. Ал бұл оның инверсті және тура кірістерінің потенциалының бірдей екенін білдіреді. Кіріс токтары нөлге тең. Бұл жағдайда инверттейтін күшейткіштер үшін де $U_{\text{вых}} = U_C$ мәнін аламыз.

Егер интегратор схемасындағы резистор мен конденсатордың орнын ауыстыратын болсақ, онда дифференциатордың қарапайым схемасын аламыз (7.25-сурет).



7.25-сурет. ОК базасындағы дифференциатор

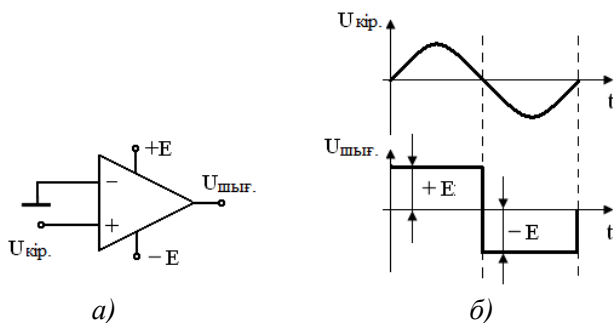
Дифференциатордың жұмысы интегратор секілді талданады: $U_{кр.} = U_C, U_{шығ.} = U_{OC}$.

Жиілік төмендеген сайын конденсатор кедергісі жоғарылайды, ОК күшейту коэффициенті әртүрлі жиілікте бірдей болмайды (жоғарғы жиілікте ол төменгіге қарағанда көп болады). Ал бұл қарапайым дифференциатор схемасының кездейсоқ жоғарғы жиілікті кедергілерге сезімтал болуына әкеледі. Және ол ол жиі тұрақсыз болады.

7.5.5. Компаратор

Компаратор – бұл берілген кернеу мен кіріс кернеуін салыстыру үшін арналған құрылғы болып табылады, яғни ол екі кернеуді салыстыру үшін және логикалық формада салыстыру нәтижесін беру үшін арналған аналогты интегралды схема: көп немесе аз.

Кернеу компараторы (7.26-сурет) оның кіріс сигналдары арасына берілген кернеу полярлығына сезімтал. Шығыстағы кернеу инверттейтін және инверттемейтін кіріс сигналдары арасындағы кернеу оң болған кезде жоғарғы деңгейде ($U_{вых}^1$) болады. Және керісінше, кернеу компараторы логикалық нөлге ($U_{вых}^0$) сәйкес болса.



7.26-сурет. Компаратордың шартты белгісі
(а) және оның уақытша диаграммалары (б)

$U_{\text{шығ.}}$ -ның бір күйден екінші күйге өтуі кернеу деңгейінің қай бағытта $U_{\text{кпр}}$ ағатынын көрсетеді. Тіректі кернеуді тура кіріске де беруге де болады. Осыған байланысты компаратор жұмысы өзгермейді тек кіріс кернеуінің полярлығы өзгереді.

Компаратордың негізгі параметрлеріне мыналар жатады; сезімталдылық, кіріс және тіректі сигналды ажырата алатын нақтылық, тезерекеттілік, жүктемелік қабілет.

8. ЭЛЕКТРОНДЫ КІЛТТЕР

Электронды құрылғылардың әртүрлі ғылым мен техника аумақтарында кеңінен пайдаланылуы мен қызмет мүмкіндіктерінің жоғарылауы микроэлектрониканың жетістіктерімен қатар, электрлік сигналдардың импульсті және сандық түрлендірудің әдістерін пайдаланумен байланысты. Осы әдістердің пайдаланылуы периодты түрде қосу, өшіру және электрлік тізбекті ауыстырып-қосумен сипатталатын коммутация режимін пайдалануға негізделеді. Бұл режимді тәжірибеде *кілттік режим* деп атайды, ал осыған сәйкес электрлік тізбектердің графикалық суреттерін *коммутация сұлбалары* деп атайды.

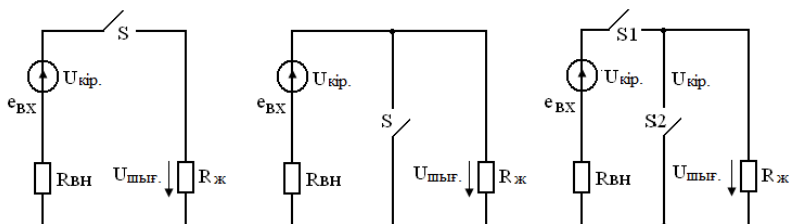
Осындай коммутация құрылғылары ретінде – электронды құрылғылар: диод пен транзистор сызықты емес негізгі элемент болатын, контактылы емес электронды кілттер қолданылады. Механикалық ауыстырып-қосқышпен салыстырғанда электронды кілттер үлкен сенімділікпен және тез қимылымен ерекшеленеді.

Мұндай электронды сұлбаларда өтімділік үрдісіне реактивті элементтермен (C, L) қатар, жартылайөткізгіш құрылғылар да үлкен әсерін тигізеді. Мұның себебі, жартылайөткізгіш құрылғылар шамалы инерциондыққа ие.

Қолданылатын жартылайөткізгіш құрылғының типі мен орнын ауыстыру шарттарына байланысты инерциондық әсері аз не көп деңгейде байқалады. Бірақ жартылайөткізгіш құрылғының типі мен жұмыс істеу шартына тәуелсіз түрде коммутация сұлбасын құрудың ерекшеліктерін атап өтуге болады.

Жалпы кезкелген коммутация сұлбасы тұрады:

- 1) Уақытпен өзгеретін электрлік кірістің сигнал $e_{вх}$ көзі жалпы жағдайда уақытпен өзгеретін ішкі кедергіден $Z_{вн}$;
- 2) Электронды кілт қызметін атқаратын сызықты емес элементі болатын жартылай өткізгіш құрылғыдан;
- 3) $\square_n$ жүктемесінен;



8.1-сурет. Электронды кілттердің коммутация сұлбаларын құру нұсқалары:

a – тізбекті сұлба; б – параллель сұлба;

в – тізбекті-параллель сұлба

Қарапайым электронды кілттерде $e_{\text{басқ.}}$ ретінде тікелей $e_{\text{кір.}}$ шығыс электрлік сигналын қолдануға болады, яғни өз-өзін коммутациялайтын кернеу.

Элементтердің орналасуына байланысты коммутацияның тізбектей, параллель және тізбекті-параллель сұлбалары болады.

- коммутацияның тізбектей сұлбасы e_{BX} , электронды кілттің және $R_{\text{ж}}$ (сұлбаларда электронды кілт S әрпімен белгіленеді) тізбектей жалғануын қарастырады.

- коммутацияның параллель сұлбасы $e_{\text{кір.}}$, электронды кілттің және $R_{\text{ж}}$ параллель жалғануын қарастырады.

- коммутацияның тізбекті-параллель сұлбасы екі электронды кілттен, біреуі (S_1) $R_{\text{ж}}$ жүктемемен тізбектей жалғанған, екіншісі (S_2) жүктемемен параллель жалғанған. Бұл жерде S_1 және S_2 синхронды түрде ауыстырылып-қосылады және кері фазада, яғни S_1 ашық (ажыратылған) болса, S_2 жабық (ажыратылмаған).

Соңғы кездері өрістік транзистор негізіндегі электронды кілттер кең пайдаланылады. Оның бір себебі тарату қуатының кішіреюі, ол электронды құрылғыларды кешенді кішірейту талабына сай келеді.

Сонымен қатар биполярлы транзисторды электронды кілт ретінде пайдалану коммутация сұлбаларының шапшандығын арттырады, осылайша оны өрістік транзистормен қатар, импульсті және сандық электроника құрылғыларында кеңінен қолданады.

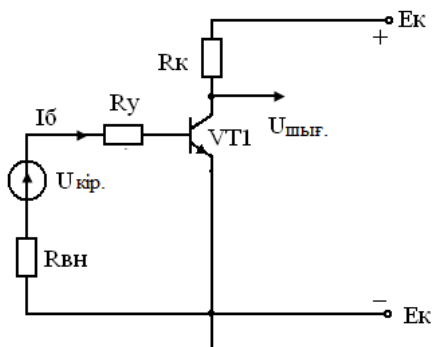
Тағайындалуына байланысты кілттік сұлбалар сандық және аналогтық болады. Аналогтық кілттік сұлбалар күшейткіш және түрлендіргіш құрылғылардың кірісіне аналогтық сигналдарды қосып өшіреді.

Сандық кілттер есептеуіш техника, сандық байланыс, дискретті автоматика құрылғыларында пайдаланылады.

Аналогтық кілттер аналогосандық және сандық аналогты түрлендіргіштерде, өлшеу және басқару құрылғыларында, көп арналы коммутаторларда пайдаланылады.

8.1. Кілттік режимдегі биполярлы транзистордың жұмысы

Транзисторлы кілтті құру кезінде ортақ эмиттер сұлбасы кең қолданысқа енді. Сол себепті ары қарай осы сұлба қарастырылады. 8.2-суретте биполярлы транзистордағы *npn*-құрылымды электронды кілттің тізбекті сұлбасы және биполярлы транзистордың кіріс сипаттамаларының жиынтығы көрсетілген.



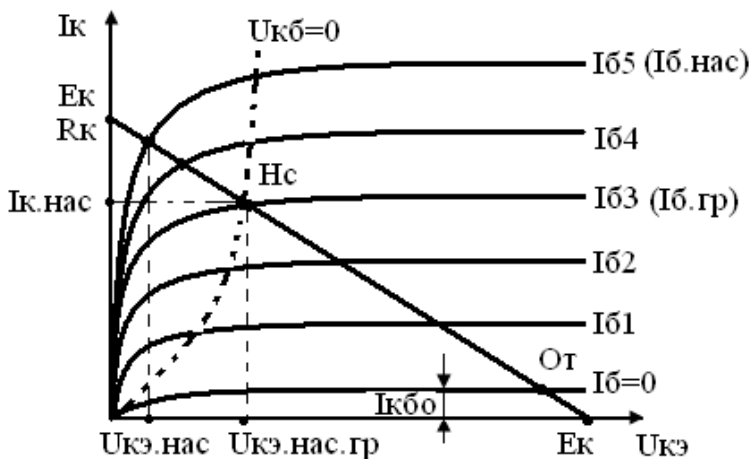
8.2-сурет. *npn*-типті биполярлы транзистордағы электронды кілттің тізбекті сұлбасы

Кіріс сипаттамасының жиынтығына R_k кедергінің таңдалған мәніне сәйкес тура жүктемені жібереміз. Тура жүктеме координат осін $U_{кз}=E_k$ және $I_k=E_k/R_k$ нүктелерінде кесіп өтеді.

$U_{кб}=0$ қисығының тура жүктемемен қиылысуы қанығу режимінің шекті нүктесін (H_c нүктесі) береді.

$I_б=0$ қисығының тура жүктемемен қиылысуы кесу режимінің шекті нүктесін (O_t нүктесі) береді.

Кілттік режимде жұмыс істеу үшін транзисторлық каскадтың жұмыс нүктесі H_c нүктесінен (қанығу режимі) солға қарай немесе O_t нүктесінен (кесу режимі) оңға қарай орналасуы керек. Екі H_c және O_t нүктелердің ортасында тек транзисторды қаныққан жағдайынан жағдайына немесе керісінше ауыстырып-қосқан кезде болады. Бұл аумақта транзисторды табудың ұзақтығы оның жиіліктік қасиетіне байланысты. Сол себепті осы қасиеттер көп жағдайда коммутация сұлбаларының шекті шапшаңдығын анықтайды.



8.3-сурет. *pnp*-типті биполярлы транзистордың шығыс сипаттамалары

Шығыстары: коммутация сұлбаларының биполярлы транзистордағы негізгі артықшылығы (диодтармен салыстырғанда): сыртқы сигналды басқару; қосылған жағдайдағы жақсы сипаттамалар; басқару сигналдарының параметрлерін өзгерте отырып, құрылғының шапшаңдығына әсер ету мүмкіндігі. Негізгі кемшілігі: диодтағы кілттермен салыстырғанда транзисторлық кілттер өте күрделі.

8.1.1. Өрістік транзистордағы кілттер

Өрістік транзистордың қасиеттерін сараптай отырып, коммутация шығыстарының үш негізгі сұлбаларын айтуға болады.

1. Электрлік өрісті басқару кернеуді басқаруға мүмкіндік береді, ол биполярлы транзистордағы тоқты басқарумен салыстырғанда, стационарлы қосылған және өшірілген жағдайды ұстап тұру үшін жұмсалатын қуатты 0-ге келтіруге тәжірибелі түрде мүмкіндік береді. Сол себепті теориялық түрде орнатылған режимде өрістік транзистордың ток және қуат бойынша беріліс коэффициенті шексіздікке ұмтылады.

2. Өрістік транзистордағы физикалық процестен келесідей қорытынды: берілген құрылғы кіріс пен шығыс арасындағы берілген кернеу полярлығын ауыстырғанда да өзінің сипаттамаларын сақтайды.

3. Биполярлымен салыстырғанда, өрістік транзистордың тогы негізгі заряд тасымалдаушылардың қозғалысы арқылы анықталса, онда оны ауыстырып-қосқан кезде негізгі емес көлемді заряд тасымалдаушылардың өзгерісімен байланысты үрдіс болмайды. Сондықтан өрістік транзистордағы өтімділік үрдістері сәйкес сыйымдылықты қайта зарядтау үрдісіне негізделген.

Көрсетілген ерекшеліктер өрістік транзисторлардың қолдану аумағын әртүрлі электронды құрылғыларда кеңейтеді.

Дегенмен, коммутация сұлбаларында бұл мүлтіксіз артықшылықтарды өрістік транзистордың ерекше қасиеттерін ескерген жағдайда ғана іске асыруға болады.

Бұл қасиеттерге келесі жатады:

– өрістік транзистор биполярлы транзистормен салыстырғанда, ең нашар кілттік қасиеттерге ие. Тәжірибе түрінде ол үлкен деңгейдегі қалдық кернеу мен қосылған жағдайдағы шығыс кедергісінде көрініс табады.

– өрістік транзистордың шығыс ВАС бастапқы аумақта басқару кернеуінен $U_{жб}\Delta I_K/I_{Kб}$ тәуелділіктегі биполярлы транзистордың аналогты сипаттамаларынан сапалы түрде айырмашылық жасайды.

Осылайша, қосылған өрістік транзистордағы қалдық кернеуінің төмендеуі басқару кернеуінің мәніне қатты тәуелді. Қанығу режиміндегі биполярлы транзисторда мұндай тәуелділік жоқ. Берілген кемшілікті азайту үшін кірістің жұмыс тогын азайту керек.

Сандық сұлбаға тән бірнеше кілттердің тізбектей қосылуы кезінде жүктеменің кедергісін арттыру қажеттілігі сыйымдылықты қайта зарядтаудың уақыт тұрақтысын $\tau_{ж}=R_{ж}C_{ж}$ ұлғайтады және өрістік транзисторға кілттердің әсер ету шапшаңдығын азайтады. Мұның түсіндірмесі: өрістік транзистордың кіріс тізбегі сыйымдылықты $C_{к\text{ір}}$ сипаттамаға ие. Сондықтан таңдалған транзистордың типі үшін жүктеме сыйымдылығын ($C_{н} \approx C_{к\text{ір}}$) азайту мүмкін емес.

8.1.2. Кілттік режимде МДЖ-транзистордың индуцирленген каналмен жұмыс істеуі

Биполярлы сияқты өрістік транзисторды әртүрлі қызметтегі тізбектің коммутациясы үшін электронды кілт ретінде қолдануға болады.

Окшауланған тесігі бар өрістік транзисторда орындалған кілттер импульсті және сандық құрылғыларда қолданылатын болды.

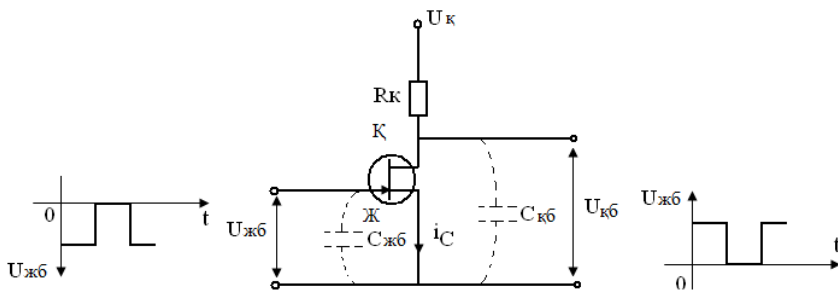
Өрістік транзистордың кез келген типінде орындалған электронды кілттің жалпы қасиеттері шығыс сипаттаманың бастапқы аумағын жабық жағдайда пайдалану болып табылады, яғни өрістік транзистордың қанықпаған режимдегі жұмысы.

8.4-суретте басқарылатын рп-өтімділікті және n-типті каналы бар өрістік транзисторда орындалған кілттің сұлбасы келтірілген.

Жүктеменің қосылу нүктесіне байланысты бұл сұлба не тізбекті ($R_c=R_{ж}$), не параллель ($R_{ж}$ кіріс-шығыс транзисторда параллель қосылған) коммутация сұлбасын іске асырады. Осыған сәйкес оның берілістегі статикалық сипаттамалары өзгереді.

Берілген кілттің ерекшелігі: біркелкі полярлықты ауыстырған кезде басқару сигналының инверттілігі $-U_{к\text{ір}}=U_{жб}<0$, сәйкесінше, $U_{шығ}=U_{кб}<0$.

Берілген типтегі кілттің инерциалығы кіріс сыйымдылықты $C_{жб}$ және шығыс сыйымдылықты ($C_{кб} + C_{ж}$) қайта зарядтау үрдісімен анықталады. Сондықтан $t_{шеппе}$ және $t_{кесу}$ уақытты азайту осы сыйымдылықты қайта зарядтау тогын ұлғайтумен байланысты.



8.4-сурет. Басқарылатын рп-өткелді және n-типті каналы бар өрістік транзисторда орындалған кілттің сұлбасы

Басқару кіріс және шығыс кернеуінің полярлығының айырмашылығы, бірнеше кілттердің тізбекті қосылуын талап ететін құрылғылардың схемотехникасын күрделендіреді.

9. ЭЛЕКТРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАР

9.1. Гармоникалық тербелістің генераторы

Генераторлар әртүрлі құрылғыларда ең маңызды және орны ауыстырылмайтын элемент болып табылады. Генераторлар аппаратура, автоматика, телемеханикада байланысты өлшеу үшін пайдаланылады. Жұмыс істеу шарттарына байланысты генераторларға жиілік, амплитуда тұрақтылығы және тербеліс пішініне байланысты әртүрлі талаптар қойылады. Аппаратурада гармоникалық тербеліс генераторы, импульсті генератор және басқару генераторлары пайдаланылады.

Гармоникалық тербеліс генераторлары маңызды және орны ауыстырылмайтын элемент, автоматика, телемеханика және байланыс аппаратураларында пайдаланылады.

Генераторларда белсенді элемент ретінде күшейткіш каскадтар мен кері дифференциалды кедергісі бар құрылғылар пайдаланылады. Фазаны қозғалысқа келтіретін тізбектер RC-жәнеRLC-элементтерінде құрылған. 100кГц-тан жоғары жиілікте негізі LRC-элементті, ал 20 кГц-тан кіші жиілікте RC-элементті генераторлар пайдаланылады.

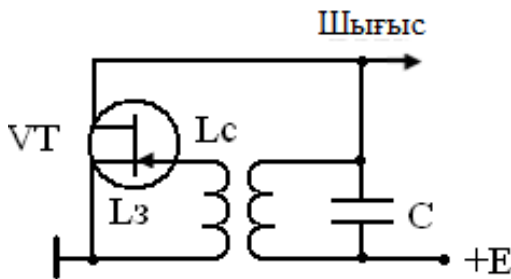
Генераторлардың бар сұлбаларында сигнал пішінінің екі түрлі болуы мүмкін. Біріншіден, тербеліс амплитудасын тұрақтандырудың сызықты емес сұлбасы арқылы пайда болған. Екіншіден, транзистор сипаттамасының сызықты еместігі арқылы пайда болады.

Әртүрлі құрылғылардың шығысында тербеліс олардың кірістеріне белгілі сигналды берген кезде ғана орынға ие. Сыртқы әсер арқылы пайда болатын тербеліс мәжбүрленген тербеліс болып саналады. Мәжбүрленген тербелістің пішіні мен оның негізгі параметрлері, амплитуда және тербеліс жиілігі, берілген құрылғылардың ерекшеліктеріне және кіріс сигналының параметрлері мен сипаттамаларына тәуелді болып келеді.

Мәжбүрленген тербеліспен салыстырғанда өздігімен пайда болатын тербелістер автотербелістер деп аталады, ал олардың пайда болатын құрылғыларын автотербелісті деп атайды. Ондай құрылғылар тербеліс генераторлары немесе автогенераторлар. Автотербеліс келесі ерекшеліктерге ие: олар

сыртқы сигналдың әсерінен емес, жүйенің ерекше қасиеттерінің болуына байланысты; пайда болатын тербелістің пішіні, олардың амплитудасы мен жиілігі жүйенің өз қасиеттерімен анықталады; пайда болатын автотербелістер, мысалы генератор контурындағы кернеу, белгілі энергияға ие. Автотербелісті жүйе техника мен табиғаттың көп аумақтарында кездеседі. Олардың қатарына сағат, автокөлік, т.б. кіреді. Жиі автотербелістер аса қажетті емес және олардың пайда болуын зерттеу келесі жолы пайда болмас үшін орындалады. Мұндай құбылыстардың қатарына кіреді: күшейткіштерді өздігінен қоздыру; ұшақ қанатын, автокөлік дөңгелектерін және ұшақ, көпірлерді автоматты реттеу жүйесінің автотербелісі.

9.1-суретте тербелісті контуры бар генератордың қарапайым электрлік сұлбасы көрсетілген.



9.1-сурет. Тербелісті контуры бар генератордың электрлік сұлбасы

Сұлбада көрсетілген үрдісті сапалы түрде түсіндіруге тоқталайық. Көптеген жағдайларда генераторларда автотербелістердің пайда болуының көзі ретінде ылғи шынайы сұлбадағы элементтерде орынға ие флукуация болып табылады. Осылайша, белсенді элемент (өрісті тарнзистор) арқылы ағатын ток транзисторда өзгерістің болуы арқылы флукуиірлейді. Осы өзгерістер арқылы сұлбаның барлық элементтерінде кездейсоқ кернеу мен ток өзгереді.

Болжайтын болсақ, бұл флукуациялар транзистор тесігінде пайда болды. Олар кіріс тогындағы айнымалы құраушының пайда болуын шақырады. Бұл ток контурда L және C элементтері арқылы анықталатын жиілігі бар кернеуді туғызады. Контурдағы

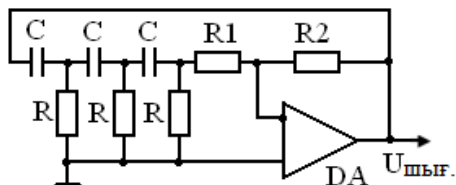
тербеліс тесікке трансформацияланады. Егер бұл тербеліс фазасы бойынша алғашқы тербеліспен сәйкес келсе, онда үлкен амплитуданың қосынды тербелісі пайда болады. Үлкен тербеліс кіріс тоғын үлкен өзгеріске әкеледі, контурда одан да үлкен кернеуді туғызады, сәйкесінше, тесікте үлкен кернеу болады. Нәтижесінде тербелісті өздігінен қоздыру үрдісі дами түседі, тербеліс амплитудасы ұлғаяды. Генератордың жабық тізбегі бойынша беріліс кернеуінің коэффициенті 1-ден үлкен ($K > 1$) болса, орынға ие болады.

Тербелістің ұлғаюы күшейткіштің сызықты еместігінен K коэффициенті 1-ге дейін төмендегенге дейін болады ($K = 1$). Бұл кезде тербелістің белгілі амплитудасына сәйкес стационарлы динамикалық режим орнатылады.

Генератордың сұлбасында болатын үрдістерді математикалық сипаттау және тербелістің пайда болу шарттарын сипаттау кезінде екі шарт қабылданады: амплитуда тепе-теңдігінің және фаза тепе-теңдігінің шарттары. Бірінші шарт бойынша стационарлы режимде беріліс коэффициентінің мәні генератордың жабық контуры бойынша 1-ге тең. Екінші шарт бойынша – жабық контурдың тізбегіндегі тербеліс фаза бойынша сәйкес келеді.

Бұл курстың шегінде генератор теориясын толық қарастыру мүмкін емес. Тұрақты тербелістер 1-ден үлкен беріліс коэффициенті үшін іске асатын оң кері байланыс кезінде туындайды, ал толық фазалық ауытқу 0-ге тең.

9.2-суретте RC-тізбекті фазалық ауытқуы бар генератор көрсетілген.



9.2-сурет. RC-тізбекті фазалық ауытқуы бар генератор

Тербеліс туындау үшін операционды күшейткіштің (ОК) беріліс коэффициенті болуы керек. Тербеліс жиілігі

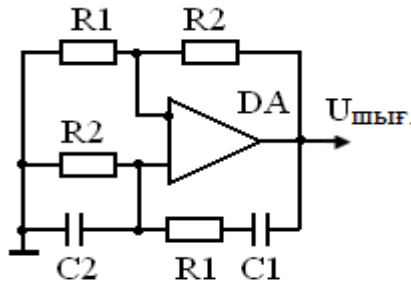
$$F=1/(2\pi RC \cdot 6^{0.5}). \quad (9.1)$$

Егер осы сұлбада R және C орнын ауыстырса, онда жиілік келесі жолмен анықталады

$$F=6^{0.5}/(2\pi RC). \quad (9.2)$$

Операционды күшейткіштің беріліс коэффициенті тең: $K=R_2/R_1=18,4$.

Генератордың кемшілігі оң кері байланыс (КБ) тізбегіндегі элементтердің үлкен саны болып табылады. Ол өте қиын қайта құрылады.



9.3-сурет. Вин көпіріндегі генератор сұлбасы

Генератордағы Вин көпірінде квазирезонанстық RC-тізбек $f=1/(R_1R_2C_1C_2)^{0.5}$ жиілігіне ауысады.

ОК беріліс коэффициенті $K=R_2/R_1=3$.

10. ҚОРЕК КӨЗДЕРІ ЖӘНЕ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕР

10.1. Жалпы мағлұматтар

Тұрақтыда үзілісті токтың күштің түрлендіргіштерін түзеткіштер деп атайды. Олар техникада маңызды рөл атқарады, яғни тұрақты токта электр энергиясын үнемді өндіру және таратуды ұйымдастыру, ал құрылғының көп түрі өзінің қорегі үшін тұрақты токты талап етеді. Негізінен түзеткіштер құрылғының барлық түйіндері үшін жалпы қолданудың қорек блогында қосымша бөлігіне кіреді. Кейде қуат, өткіш стабилизатор тіктейтін сүзгіге қосылады. Сүзгісіз қорек блогын өте сирек қолданады. Түзеткіштер күштік қондырғыларда ғана емес, сонымен қатар автоматика жүйесінің өлшеуіш және басқарушы тізбектерінде де қолданылады.

Үзілісті ток желісінің кернеуі біраз аралықта және көптеген тұтынушыға ең үнемді энергияның берілісін көздеген. Тұтынушыға өте түрленген қорек кернеулері қажет. Сондықтан түзеткіштің құрамдас бөлігі болып диодты сұлбаның кіріс кернеуінде желі кернеуін түрлендіретін жоғарғы ПӨК-мен, яғни қажетті тұрақтыдағы үзілісті кернеуді түрлендіретін трансформатор (төмендететін немесе жоғарылататын) табылады. Үзілісті кернеудің қарапайым түрлендіргіштері трансформатордың теріс жартылай периодты екілік кернеуіне біржақты өткізгіш-түзеткіш диодты элемент көмегімен күш арқылы ток жолын кесудегі тұрақтыдан тұрады. Мұндай түзеткіштің жетіспеушілігі желі кернеуінің теріс жартылай периодты ағынында қуат арқылы токтың болмауы болып табылады. Қуат арқылы токтың уақыт өтуінің жоғарылауы бірдей бағытта ток өтуі үшін арналған екі жартылай периодты кернеу жолында құрастырылған арнайы сұлбалардың көмегімен жетеді. Бірақ та ток жүктемеде бұрынғыша лүпілдеуші болып қалады. Лүпілдеудің азаюы тез жоғала алмайтын ток (кернеу), диодтан кейін орнатылатын қосымша элементтерді қолданумен жетеді. Бұл элементтер сүзгіге, тегістейтін лүпілге кіреді. Сүзгі диодтың жұмыс режимін өзгертеді.

Кернеу түрлендіргіштерге басқа деңгейдің үзілісті немесе тұрақты кернеуіндегі тұрақты кернеу түрлендіргіші үшін

арналған құрылғы жатады. Түрлендіргіштер аккумулятор және батареямен қоректенетін әртүрлі электронды аспаптарда қолданумен табылады. Оларды бірнеше тұрақты көздерді бір түрлендіргішпен ауыстыра отырып құрылғыларда қолдануға болады. Үзілісті кернеу түрлендіргіштері жоғары вольтты қорек көздерін алу үшін қолданылады. Бұл түрлендіргіштерде үзілісті кернеу көбеюі бірнеше рет жүзеге асады. Трансформаторлы және резистивті-конденсаторлы түрлендіргіштер болады. Түрлендіргіш негізіне симметриялы мультитербеліс сұлбасымен жиналған генератор жатады. Түрлендіргіштің трансформаторлы сұлбасы көбірек кеңеюге ие болды. Мұндай сұлбада жиналған түрлендіргіштер 500 Вт қуатты қамтамасыз етеді. Резистивті-конденсаторлы түрлендіргіштер аз қуатты (10 Вт-тан аз) болып табылады. Трансформаторлы түрлендіргіштерде генераторлар жалпы база (ЖБ), жалпы эмиттер (ЖЭ) және жалпы коллекторлы (ЖК) сұлба бойынша қосылуы мүмкін. Көбіне ЖЭ-лі сұлба қолданылады. Бұл сұлба кіріс қорек көзіндегі аз кернеу кезіндегі үлкен ПӘК алуға мүмкіндік туғызады. ЖК-лі сұлбасы жалпы радиаторға транзисторды орнату қажет болған жағдайда қолдануды тапты.

Түрлендіргіштердің негізгі параметрлерін анықтау кезінде жүктеменің тогын және қуатын білу қажет. Бұл екі параметр түрлендіргіштердің кіріс кернеуін және транзисторды ауыстырып-қосқыш коллекторлы тоқты анықтауға мүмкіндік береді. Кіріс кернеулер максималды рұқсат етілген транзистордағы кернеу жартысынан аз болуы керек. Ашық транзистордың коллекторлы тогы трансформатордың магнитті токтың уақытпен өзгеруі салдарынан артады.

10.2. Айнымалы кернеу түрлендіргіштері

Екілік электрлі қорек көздері (ЕКК) – бұл мағынасы айқын электронды құрылғылармен (ЭК) анықталған міндеттермен сәйкес жиіліктің, деңгейдің және тұрақтылықтың электр энергиясына біріншілік электрлі қорек көзін түрлендіру үшін арналған электронды құрылғы.

Негізінен ЭҚ және жүйе үшін біріншілік электрлі қорек көзі ретінде не айнымалы токтың өнеркәсіпті желісін, не айнымалы немесе тұрақты токтың автономды көзін қолданады.

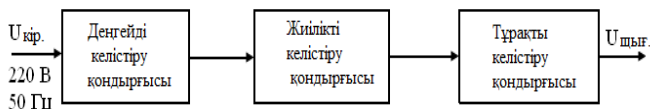
ЕҚК бірнеше аяқталған функционалды блоктан тұрады, барлық сұлба техникалық әртүрлілік негізгі үш топқа бөлінуі мүмкін: жиіліктің, деңгейдің және кернеу тұрақтылығының келісу құрылғысы.

Жиіліктің келісу құрылғысы өзгертілген энергия түріне тәуелділіктен екі негізгі класқа бөлінеді:

– *тегістеуші сүзгі* – кенет пульсті кернеуді (ток) түзейтін құрылғы;

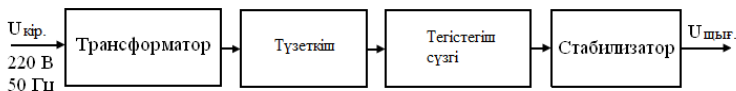
– *түзеткіштер* – шығыс кернеуінің, ток және қуаттың орташа мәнін түзететін құрылғы.

Жоғарыда айтылғандармен сәйкес ЕҚК жалпыланған құрылымдық сұлбасын үш блоктың тізбекті қосындысы түрінде көруге болады (10.1-сурет).



10.1-сурет. ЕҚК жалпыланған құрылымдық сұлбасы

10.2-суретте өндірістік желіде кернеуді тұрақты кернеуге түрлендіретін ЕҚК типтік құрылымдық сұлбасы көрсетілген.

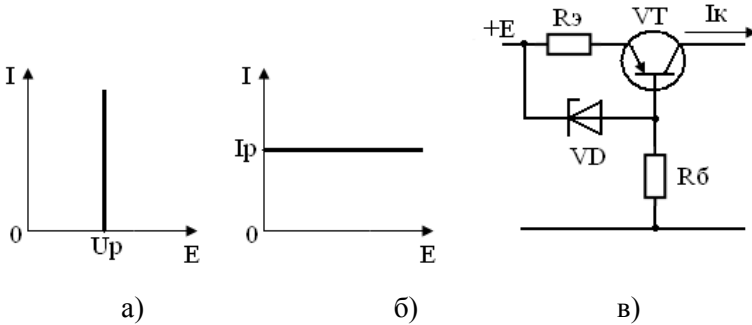


10.2-сурет. Кіріс төмен жиілікті трансформаторы бар
ЕҚК құрылымдық сұлбасы

10. 3. Кернеу мен токтың қорек көздері

Электрлік сұлбалардың жұмысы үшін энергияның екі көзі пайдаланылады: кернеу мен ток көзі. Кернеу көзі 10.3, а-суретте көрсетілген ВАС-ға ие. Бұл көздің тұрақтысы шығыс кернеуі.

Жүктемемен қолданылатын ток мүмкін болатын мәннің (теориялық) бәрін қабылдай алады. Кернеу көзінде ішкі кедергі 0-ге тең.



10.3-сурет. Кернеу мен токтың генератор сипаттамасы және ток генераторының сұлбасы:

а – кернеу генераторының ВАС; б – ток генераторының ВАС; в – транзистордағы ток генераторының электрлік сұлбасы

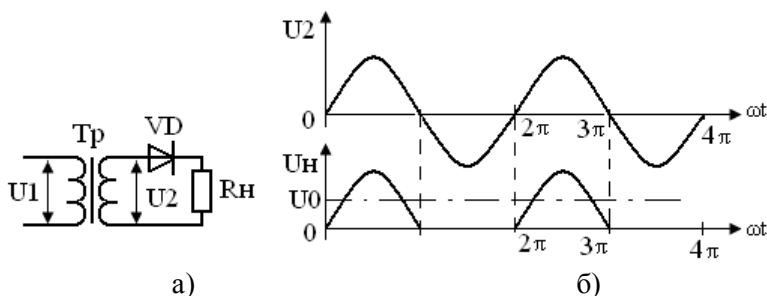
Кернеу көзіне кіреді: аккумулятор, батарея, тұрмыстық және өндірістік желі. Кернеу көзіне параллель түрде энергияның көп пайдаланушыларын қосуға болады және шығыс кернеу мәні өзгермейді.

Ток көзі 10.3,б-суретте көрсетілген ВАС-ға ие. Бұл көздің тұрақтысы шығыс тогы. Ток көзінің шығыс кернеуі жүктеме кедергісіне $U_{\text{шығ}} = I_p R_{\text{ж}}$ тәуелді. Теориялық түрде $R_{\text{ж}} = 0$ (сыртқы тізбектің үзілуі) болса, шығыс кернеуі үлкен мәнге ие болады. $R_{\text{ж}} = \infty$ (қысқа тұйықталу) болса, $U_{\text{шығ}} = 0$. Бірнеше жүктемені тізбектей қосқан кезде, олар арқылы бір I_0 ток өтеді. Ток көзінде ішкі кедергі үлкен мәнге ие (теориялық түрде $R_{\text{ж}} = \infty$). Ток көзі электронды құрылғыларда пайдаланылады. 10.3, в-суретте транзистордағы ток генераторының сұлбасы көрсетілген. Бұл құрылғылар басқарудың автоматты жүйесінде аналогты сигналды алыс арақашықтыққа жіберу үшін қолданады. Транзистордың шығыс тогы VD түзеткіш диод кернеуі және эмиттерлік кедергімен анықталады. Бұл ток генераторының шығыс кедергісі 100 кОм-ға жуық.

10.4. Түзеткіштер

Түзеткіш айнымалы кернеуді тұрақтыға түрлендіруге арналған. Түзеткіш трансформатор мен диодтан тұрады. Диод тұрақты құраушы мен жоғары жиіліктің гармоникалық құраушыларынан тұратын айнымалы кернеуді пульстіге түрлендіреді. Түзеткіштің жоғары жиілігін басу үшін тегістеуші сүзгі пайдаланылады. Түзеткіштер бөлінеді: түзету сұлбасына қарай: бір және үш фазалы; түзетілген кернеу пішініне қарай: біржартыпериодты және екіжартыпериодты; диодтардың қосылу сұлбасына қарай: тізбекті және көпірлік; қуаты бойынша: аз қуатты 100Вт-қа дейін, орта қуатты 5 кВт-қа дейін және үлкен қуатты 5 кВт-тан жоғары; кернеу бойынша: төмен 200В және орта 1кВ, жоғары 1кВ-тан үлкен; түзетілген ток жиілігі бойынша: 50Гц, 400–1000Гц және 1кГц-тан жоғары.

Біржартыпериодты түзеткіш сұлбасы 10.4, а, б-суретте көрсетілген. Екінші орамға диод және жүктеме кедергісі R_H қосылған.



10.4-сурет. Біржарты периодты түзеткіш сұлбасы (а) және б) сұлба жұмысын түсіндіретін уақыттық диаграмма

Екінші тізбекте ток бір жарты толқын периоды бойынша ғана ағады, ол кезде кернеу оң (10.4, б-сурет). Теріс кернеу кезінде диод жабылады және жүктемеде ток болмайды. Түзеткіш келесі параметрлермен сипатталады:

– жүктеменің тұрақты ток құраушысы – айнымалы кернеу периоды үшін орташа мән $I_0 = (\pi/2) \int_0^\pi I_{\max} \sin \omega t dt = I_{\max} / \pi = 0,318 I_{\max}$, мұндағы $I_{\max}$ – айнымалы ток амплитудасы;

– кернеудің тұрақты құраушысы $U_0 = I_0 R = 0,318 U_{\max} = 2^{0.5} U_{2d} / \pi = 0,45 U_{2d}$, мұндағы U_{2d} , $U_{\max}$ – қозғалыстағы кернеу және трансформатордың екіншілік орамының амплитудалық кернеуі;

– диод арқылы токтың максимал (амплитудалық) мәні $I_{\max} = \pi I_{\max}$;

– трансформатордағы екіншілік орамның токтың қозғалыстағы мәні – екіншілік орамдағы трансформатордың қозғалыстағы кернеу мәні $I_{2d} = U_{RN} / 2^{0.5} = 0,7 U_{RN} = 0,7 \pi U_0 = 2,22 U_0$;

– диодтағы максимал кері кернеу $U_{OD} = U_{\max} = 3,14 U_0$;

– біріншілік орамдағы кернеудің қозғалыстағы мәні $U_1 = K U_2 = K 2,22$;

– біріншілік орамдағы токтың қозғалыстағы мәні $I_1 = 1,21 / K I_0$;

– біріншілік орамдағы трансформатордың толық қуаты $P_1 = U_1 I_1 = 2,22 K U_0 \cdot 1,21 I_0 / K = 2,69 U_0 I_0$;

– екіншілік орамдағы трансформатордың қуаты $P_2 = U_{2d} I_2 = \pi^{2U_{010}} / 2 \cdot 2^{0.5} = 3,39 P_0$;

– трансформатордың есептелген қуаты $P_T = (P_1 + P_2) = 3,09 P_0$.

– кіріс кернеудің пульс коэффициенті (%) $K_n = U_{\max} \cdot 100 / U_0 = \pi U_0 \cdot 100 / 2 U_0 = 157$.

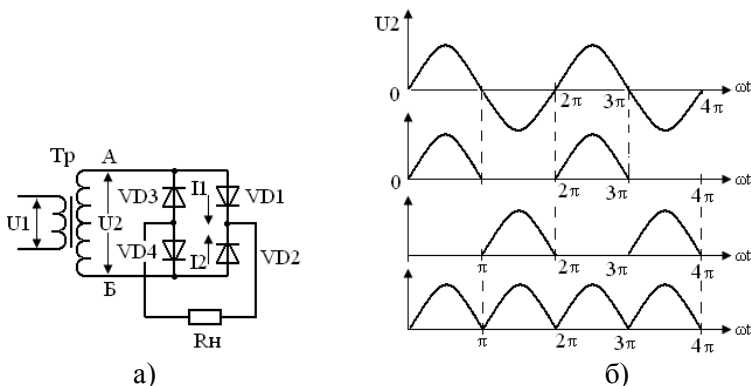
Бұдан басқа түзеткіш сипатталады:

– біріншілік орамды қолдану коэффициенті $K_1 = P_0 / P_1 = 1/2,69 = 0,37$;

– екіншілік орамды қолдану коэффициенті $K_2 = P_0 / P_2 = 1/3,49 = 0,286$;

– трансформаторды қолдану коэффициенті $K_T = P_0 / P_T = 1/3,09 = 0,324$.

– екі жарты периодты (көпірлік) сұлба және түзеткіш сигналының пішіні 10.5, а, б-суретте көрсетілген.



10.5-сурет. Екі жарты периодты (көпірлік) сұлба
(а) және түзеткіш сигналының пішіні (б)

Жартыпериод кезеңінде А нүктесі Б нүктесіне қарағанда оң потенциалға ие. Ток VD1, VD2 диодтары және $R_{ж}$ жүктеме кедергісі арқылы өтеді. Келесі жартыпериодта Б нүктесі А нүктесіне қарағанда оң болады. VD3 және VD4 диодтары ашылады және $R_{ж}$ жүктеме кедергісі арқылы ток өтеді. Нәтижесінде трансформатордың екінші орамындағы ток екі жартыпериодта да ағады. Екінші орамдағы тұрақты құраушы жоқ және трансформаторды мәжбүрленген магниттеу өзегі де жоқ.

Сұлба келесі параметрлермен сипатталады:

- түзетілген кернеудің тұрақты құраушысы $U_0 = 2U_{max}/\pi$, $I_0 = 2I_{max}/\pi$;
- диод арқылы ағатын токтың орташа мәні $I_{CD} = I_0/2$;
- екіншілік орамдағы токтың қозғалыстағы мәні $I_{2д} = I_{max}/2^{0.5} \pi I_0/2 \cdot 2^{0.5}$;
- диод арқылы ағатын токтың қозғалыстағы мәні $I_{ДД} = I_{max}/2 = \pi I_0/4$;
- екіншілік орамдағы трансформатордың кернеудегі қозғалыстағы мәні $U_{2д} = U_{max}/2^{0.5} = \pi U_0/2 \cdot 2^{0.5}$;
- диодтағы үлкен кері кернеу $U_{об.д} = U_{max} = \pi U_0/2$;
- біріншілік орамдағы кернеудің қозғалыстағы мәні $U_{1д} = K U_{2д} = K \pi U_0/2 \cdot 2^{0.5}$;
- біріншілік орамдағы токтың қозғалыстағы мәні $I_{1д} = I_{2д}/K = I_0/K \cdot 2 \cdot 2^{0.5}$;

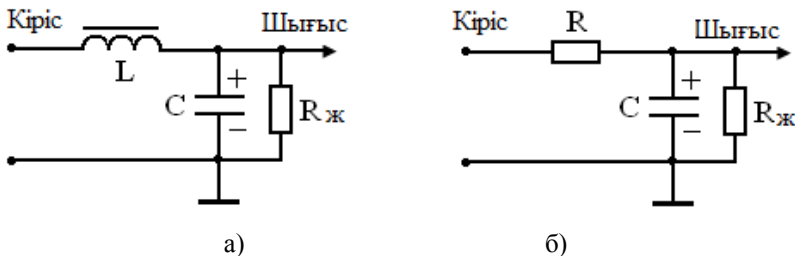
- біріншілік және екіншілік орамдағы толық қуат $P_1=U_{1Д} I_{1Д}=\pi^2 U_0 I_0/8$, $P_2=U_{2Д} I_{2Д}=\pi^2 U_0 I_0/8$;
- трансформатордың есептелген қуаты $P_T=(P_1+P_2)/2=1,23P_0$.
Түзеткішті есептеу кезіндегі қосымша параметрлер:
- біріншілік және екіншілік орамның коэффициенті $K_1=K_2=0,814$;
- трансформатордың қолдану коэффициенті $K_T=0,84$;
- шығыс кернеуінің пульсті коэффициенті $K_n=67\%$.

10.5. Тегістеуші сүзгілер

Тегістеуші сүзгілер түзетілген кернеудің пульсін азайту үшін арналған. 10.5-суретте сүзгі сұлбалары көрсетілген: жалғыз LC-сүзгі (10.5, а-сурет), жалғыз RC-сүзгі (10.5, б-сурет). Сүзгі жұмысын анықтайтын негізгі параметр түзетілген кернеудің пульсін тегістейтін коэффициент:

$$G=K_{п.к\dot{p}}/K_{п.шығ}, K_{п.к\dot{p}}=\frac{\Delta U_{к\dot{p}}}{U_{к\dot{p}}}; K_{п.шығ}=\frac{\Delta U_{шығ}}{U_{шығ}}. \quad (10.1)$$

Шығыс кернеудің пульсі импульсті біржартыпериодты сигналды құрайтын жоғары жиілікке байланысты. Сұлбада (10.5, а-сурет) индуктивтілік катушкасы шығысқа жоғары жиілікті құраушылардың өтуіне кедергі жасайды.

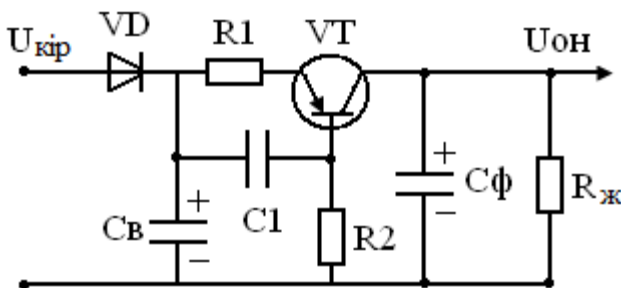


10.5-сурет. Тегістеуші сүзгілер: а – LC-сүзгі, б – RC-сүзгі

Бұл құраушылардың амплитудаларын қосымша азайтуды конденсатор жасайды. Екі есе азайту арқылы бұл құраушылардан шығыста білінбес мәні қалады. Азайтусыз тұрақты құраушысы шығысқа индуктивтілік катушкасы арқылы өтеді.

Азайтуды қайта ұлғайту үшін айнымалы құраушыларға екі еселі тегістеуші сүзгілер пайдаланылады. Мұндай сүзгілерде индуктивтілік катушкасының орнына RC-сүзгісін қолдануға болады.

Пассивті элементтерден басқа тегістеуші сүзгілер транзисторларда құрылады.



10.6-сурет. Біржартыпериодты түзеткіш бір транзисторлы сүзгісі бар сұлбасы

Сұлбада (10.6-сурет) транзистор базасына RC-сүзгі қосылған. Конденсаторда айнымалы құраушы әлсіз күйде болады, ал тұрақты құраушының деңгейі өзгермейді. Конденсатордағы кернеу транзистор эмиттеріне беріледі және шығыста азайтылған айнымалы құраушымы бар кернеуден тұратын болады.

Сұлбада C1 конденсаторы айнымалы құраушыға да кедергі жасайды. Ол толығымен транзистор базасына беріледі. Бұдан транзистор базасы мен эмиттерінде мәні бойынша жақын айнымалы құраушылар болады. Сәйкесінше, бұл құраушылардан эмиттерлік ток мәні үлкен болмайды. Тұрақты құраушы үшін C1 конденсатор үлкен кедергі болады. Тұрақты құраушы R1 кедергісімен анықталады. Тұрақты құраушының тогы шығыс кернеуді анықтайды.

БИБЛИОГРАФИЯЛЫҚ ТІЗІМ

1. Гальперин М. В. Электронная техника. – М.: Форум Инфра-М, 2003. – 304 с.
2. Горошков Б. И. Радиоэлектронные устройства. – М.: Сов. радио, 1984. – 400 с.
3. Горошков Б. И. Элементы радиоэлектронных устройств. – М.: Сов. радио, 1988. – 177 с.
4. Логин В. И., Савелов И. С. Электроника. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. – 576 с.
5. Опадчий Ю. Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И. Аналоговая и цифровая электроника. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 738 с.
6. Прянишников В. П. Электроника. Полный курс лекций. – СПб.: Корона, 2004. – 416 с.
7. Ткаченко Ф. А. Техническая электроника. Минск: Дизайн ПРО, 2002.
8. Опадчий Ю. Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника. – М.: Горячая линия-Телеком, 2000.
9. Жеребцов И. П. Основы электроники. Изд. 5-е, перераб. и дополн. – Л.: Энерго-атомиздат, 1989.
10. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. – М.: Высшая школа, 1987.
11. Петров К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. – СПб.: Питер, 2003.
12. Батушев В. А. Электронные приборы. – М.: Высшая школа, 1980.
13. Бочаров Л. Н. Электронные приборы. – М.: Энергия, 1979.
14. Лачин В. И., Савелов Н. С. Электроника. Ростов н/Д: Феникс, 2002.
15. Павлов В. Я, Ногин В. Я. Схемотехника аналоговых электронных устройств. – М.: Радио и связь, 1997.
16. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника. – М.: Высшая школа, 1982.
17. Забродин Ю. С. Промышленная электроника. – М.: Высшая школа, 1982.

МАЗМҰНЫ

	Кіріспе.....	3
1.	Жартылай өткізгіштердің электрөткізгіштігі.....	6
1.1.	Өзіндік жартылайөткізгіш.....	6
1.2.	Жартылай өткізгіштердің кристалдық торы мен атомының құрылысы.....	6
1.3.	Жартылай өткізгіштің өзіндік электрөткізгіштігі.....	9
1.4.	Жартылай өткізгіштердің энергетикалық (аймақ) диаграммалары.....	11
1.5.	Қоспалы жартылай өткізгіш.....	12
1.6.	Жартылай өткізгіштердегі Ферми деңгейі.....	15
1.7.	Жартылай өткізгіштегі электрөткізгіш процестері.....	17
1.7.1.	Ығу тоғы.....	17
1.7.2.	Диффузиялық ток.....	20
1.8.	Электронды-кемтікті өткел.....	22
1.8.1.	p -өткелінің қасиеттері.....	25
1.8.2.	Тура қосу кезіндегі pn -өткелі.....	29
1.8.3.	Кері қосу кезіндегі pn -өткелі.....	31
1.8.4.	Симметриялы емес pn -өткелі.....	34
1.8.5.	pn -өткелдің теориялық вольт-амперлік сипаттамасы.....	36
1.8.6.	pn -өткеліндегі тесілудің пайда болуы.....	37
1.8.7.	pn -өткелдің сыйымдылығы.....	39
1.9.	Металл-жартылай өткізгіш өткелі.....	41
2.	Жартылайөткізгішті диодтар.....	44
2.1.	Жартылайөткізгішті диодтың құрылымы.....	44
2.2.	Сыртқы кернеу болмаған жағдайда жартылай өткізгішті диодтың жұмыс істеу принципі.....	46
2.2.1.	Тұрақты кернеу кезіндегі жартылай өткізгішті диодтың жұмыс істеу принципі.....	47
2.2.2.	Кері кернеу кезіндегі жартылай өткізгішті диодтың жұмыс істеу принципі.....	47

2.3.	Жартылайөткізгіштердің вольт-амперлік сипаттамасы.....	48
2.4.	Диодтың негізгі параметрлері.....	52
2.5.	Төменгі жиіліктегі диодтардың эквивалентті жүйесі.....	54
2.6.	Жартылайөткізгіш диодтардың түрлері.....	55
2.6.1.	Түзеткіш диодтар	55
2.6.2.	Шоттки диодтары.....	55
2.6.3.	Жоғары жиілікті диодтар.....	56
2.6.4.	Импульсті диодтар	57
2.6.5.	Аса жоғары жиіліктегі диодтар.....	59
2.6.6.	Туннельді диод	60
2.6.7.	Варикап	63
2.6.8.	Стабилитрон.....	64
2.6.9.	Ганн диодтары.....	66
2.7.	Жартылайөткізгіш диодтардың белгілену жүйесі.....	67
3.	Транзисторлар.....	69
3.1.	Биполярлы транзисторларда болатын физикалық процестер.....	69
3.2.	Ортақ базамен қосылу сұлбасының статикалық сипаттамалары.....	73
3.3.	Ортақ эмиттермен қосылу сұлбасының статикалық сипаттамасы.....	76
3.4.	Транзистордың h -параметрлері.....	77
3.5.	Транзистордың электрлік параметрлері....	78
3.6.	Биполярлы транзистордың негізгі параметрлері мен жұмыс істеу режимдері және қосылу сұлбасы	82
3.7.	Биполярлы транзистордың жұмыс істеу режимдері.....	84
4.	Өрістік транзисторлар.....	86
4.1.	$U_{си}$ кернеуінің арна қимасына әсері.....	89
4.2.	Басқарушы $p\bar{n}$ -өткелі бар өрістік транзистордың статикалық сипаттамалары	91
4.3.	Шоттки өткелі бар өрістік транзисторлар....	94
4.4.	Индукцияланатын арнасы бар МДЖ-транзистор құрылғысы.....	95

4.4.1.	Индукцияланған арнасы бар МДЖ-транзисторларының жұмыс істеу принципі.....	97
4.5.	Орнатылған арнасы бар МДЖ-транзистор	99
4.5.1.	Орнатылған арнасы бар МДЖ-транзисторларының статикалық сипаттамалары.....	100
4.6.	Оқшауланған жаппасы бар өрістік транзисторлардың негізгі параметрлері.....	101
4.7.	Өрістік транзисторлардың жиіліктік қасиеттері.....	102
4.8.	Өрістік транзисторлардың таңбалануы.....	103
5.	Тиристорлар және күштік транзисторлар...	104
5.1.	Динистордың жұмыс істеу принципі.....	104
5.1.1.	Динистор жұмысының математикалық анализі.....	106
5.1.2.	Динистордың вольт-амперлік сипаттамасы	107
5.2.	Тринистордың жұмыс істеу принципі және құрылғысы.....	108
5.3.	Симметриялық тиристорлар.....	110
5.4.	Тиристорлардың жұмыс істеу ерекшеліктері және параметрлері.....	111
5.5.	Күштік транзисторлар.....	113
5.5.1.	Күштік модульдер.....	113
5.5.2.	Күштік (қуатты) өрістік транзисторлар.....	117
5.5.3.	Оқшауланған бекітпесі бар IGBT транзисторы.....	119
5.5.4.	Статикалық индукциясы бар SIT-транзисторы.....	123
6.	Интегралды микросұлба және оптоэлектронды аспаптар.....	126
6.1.	Интегралды микросұлба және оптоэлектронды аспаптар туралы жалпы мағлұмат.....	126
6.2.	Интегралды микросұлбалардың классификациясы.....	127
6.3.	Микросұлбаның құрылымдық элементтері	131

6.4.	Интегралды микросұлбаның белгілену жүйесі	132
6.5.	Жартылай өткізгішті оптоэлектронды аспаптар.....	133
6.5.1.	Фотоөткізгіш және фотоэффект заңдары....	137
7.	Электронды күшейткіштер.....	139
7.1.	Электр сигналдарын күшейту	140
7.1.1.	Күшейткіш каскадтардың негізгі техникалық көрсеткіштері мен сипаттамалары.....	141
7.2.	Күшейткіш каскадтардың күшейту кластары.....	148
7.2.1.	Кері байланыс түрлері	153
7.2.2.	Каскадтар арасындағы байланыс түрлері....	157
7.2.3.	Дроссельді-сыйымдылықты байланыс	158
7.2.4.	Трансформаторлы байланыс.....	158
7.2.5.	Резисторлы-сыйымдылықты байланыс.....	160
7.2.6.	Тікелей байланыс	161
7.3.	Дифференциалды күшейткіштер.....	162
7.3.1.	Дифференциалды күшейткіштердің негізгі көрсеткіштері.....	166
7.4.	Операционды күшейткіш.....	166
7.4.1.	Операционды күшейткіштердің параметрлері.....	168
7.4.2.	Операционды күшейткіштердің классификациясы.....	171
7.4.2.1.	Тезәрекет етуші тар жолақты ОК.....	171
7.4.2.2.	Прецизионды (жоғары нақтылықты) ОК.....	171
7.4.2.3.	Жалпы қолданыстағы ОК.....	171
7.4.2.4.	Қуатты және жоғары вольтты ОК	171
7.4.2.5.	Микроқуатты ОК.....	172
7.4.2.7.	Көп каналды ОК	172
7.4.3.	Операционды күшейткіштердің құрылғылары.....	172
7.5.	Операционды күшейткіш базасында орындалатын функционалды тораптар.....	173
7.5.1.	Терістейтін күшейткіштер (инверторлар).....	173

7.5.2.	Аналогты сигналдардың бірігуі (сумматор).....	174
7.5.3.	Дифференциалды күшейткіштер.....	175
7.5.4.	Интегратор және дифференциатор.....	176
7.5.5.	Компаратор.....	177
8.	Электронды кілттер.....	179
8.1.	Кілттік режимдегі биполярлы транзистордың жұмысы.....	181
8.1.1.	Өрістік транзистордағы кілттер.....	183
8.1.2.	Кілттік режимде МДЖ-транзистордың индуцирленген каналмен жұмыс істеуі.....	184
9.	Генераторлар	186
9.1.	Гармоникалық тербелістің генераторы.....	186
10.	Қорек көздері және түрлендіргіштер.....	190
10.1.	Жалпы мағлұматтар.....	190
10.2.	Айнымалы кернеу түрлендіргіштері.....	191
10.3.	Кернеу мен токтың қорек көздері.....	192
10.4.	Түзеткіштер.....	194
10.5.	Тегістеуші сүзгілер.....	197
	Библиографиялық тізім.....	199

Оқулық басылым

Сауле Плановна Луганская
Назым Қияшовна Қыдырбаева

ЭЛЕКТРОНИКА НЕГІЗДЕРІ

Оқу құралы

ОБО РБ бастығы

Редакторы

Компьютерде беттеген

З. А. Ғұбайдулина

Т. С. Жақсыбаева

С. Е. Орысбекова

Басуға қол қойылды 19.02.2016 ж.

Таралымы 300 дана. Пішімі 60x84x 1/16. № 1 Баспаханалық қағаз.

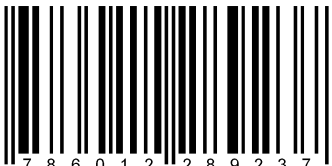
Е.- б.т. 12.8. 11.9 ш.б.т. Тапсырыс № 677. Бағасы келісімді.

Қ. И. Сәтбаев атындағы

Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті басылымы

Оқу-баспа орталығы, Алматы қ., Сәтбаев көшесі, 22

ISBN 978-601-228-923-7



9

7 8 6 0 1 2 2 8 9 2 3 7