

ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШ АСПАПТАР

13.1. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕР ТУРАЛЫ
МАҒЛҰМАТТАР

Электроника — электрмагниттік өрістері бар зарядталған бөлшектердің өзара әсері туралы және жұмысы қатты денеде, вакуум мен газдарда электр тогын өткізуге негізделген электрондық аспаптар мен құрылғыларды жасау әдістері туралы ғылым. Сәйкесінше, электрондық аспаптар жартылай өткізгіш, электрондық-вакуумдық және газразрядты деп аталады. Қазіргі уақытта электрондық-вакуумдық және газразрядты аспаптар арнайы жағдайларда ғана қолданылады және мұнда қарастырылмайды.

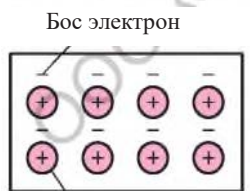
Жартылай өткізгіштер меншікті көлем кедергісі 10^8 — 10^{-6} Ом · м болатын материалдардың ауқымды класын біріктіреді. Si кремний мен Ge германий кең қолданыс тапқан. Жартылай өткізгіш материалдардағы негізгі процестерді олардың идеалды модельдерінің негізінде қарастырайық.

Д.И. Менделеевтің Элементтердің периодтық жүйесінің IV тобындағы идеалды кремний кристалының электрондық құрылымында кез келген атомның төрт валентті электрондарының әрқайсысы төрт атом қосылысының осындай валентті электрондарымен байланысқан жұп (валентті байланыс) түзеді. Егер кремний атомдарына оның электрондық құрылымын бұзуға қабілетті сыртқы энергия көздері, мысалы, жарық, жылулық, әсер етпесе онда барлық атомдар электрлік тұрғыда бейтарап болып табылады. Мұндай идеалды кремний кристалы электр тогын өткізбейді.

Алайда идеалды кремний кристалының электрлік қасиеттері оған басқа химиялық элементтер қоспасын қосқан кезде айтарлықтай өзгереді. Қоспалар ретінде әдетте Периодтық жүйенің не V топтағы (сурьма Sb, фосфор P), не III (галлий Ga, индий In) топтағы элементтері қолданылады.

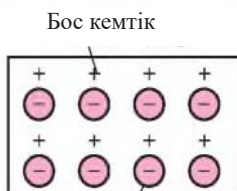
Фосфор қоспасымен кремний кристалының электрондық құрылымында фосфордың төрт валентті электроны және кремнийдің төрт іргелес атомдарының электрондары төрт байланысқан жұптар түзеді. Фосфордың бесінші валентті электроны артық болады. Сыртқы көздерден болмашы энергия шығындарында артық электрон қоспа атомымен байланысын жоғалтып, бос электронға айналады. Фосфор атомы электронын жоғалтып, жылжымайтын оң ионға айналады. Мұндай жартылай өткізгіш электрондық электр өткізгіштікті жартылай өткізгіш немесе *n-типті* жартылай өткізгіш деп, ал сәйкес қоспа *донорлық* деп аталады. 13.1-суретте *n*-типті идеалды жартылай өткізгіштің шартты кескіні келтірілген, онда жылжымайтын оң ион шеңбердің ішінде плюс белгісімен, ал жылжымалы бос электрон минус белгісімен белгіленген.

Егер қоспа ретінде үш валентті электроны бар индий қолданылса, онда кремний кристалының электрондық құрылымында индий атомының кремнийдің төрт көршілес атомдарымен бір валентті байланысы толық жинақталмайды да, кристалда кемтік пайда болады. Кристалдың тұрақты электрондық құрылымын қалыптастыру үшін қосымша электрон қажет. Индий атомы кремнийдің іргелес атомдарының арасындағы валентті байланыстан бір электрон қамтиды. Бұл ретте индий атомы тұрақты жылжымайтын теріс ионға айналады, ал кемтік қамтылған электронның орналасқан орнына ауысады. Одан әрі қайта пайда болған кемтіктің орнына іргелес валентті байланыстағы электрон ауысып келеді және т.б. Бұл процесті кристалда электрон зарядына тең оң зарядты бос кемтіктердің хаустық қозғалысы ретінде қарастыруға болады. Мұндай жартылай өткізгіш кемтікті электр өткізгіштікті жартылай өткізгіш немесе *p-типті жартылай өткізгіш* деп, ал сәйкес қоспа *акцепторлық* деп аталады. 13.2-суретте *p*-типті идеалды жартылай өткізгіштің шартты кескіні келтірілген.



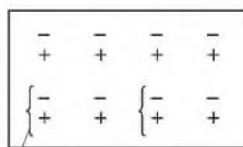
Жылжымайтын + ион

13.2-сурет



Жылжымайтын – ион

13.2-сурет



«Электрон-кемтік» жұбы

13.3-сурет

Жоғарыда қаралған екі процесте электрондар ғана қатысса да, оң зарядты жалған кемтіктерді енгізу әдістемелік тұрғыда қолайлы болмақ.

Бос электрондар мен кемтіктер қоспалары бар жартылай өткізгіштерде ғана емес, сондай-ақ сыртқы көз энергиясы валентті байланысты ұзу үшін жеткілікті болған жағдайда қоспасыз идеалды жартылай өткізгіштерде де пайда болады. Кремнийдің электрлік бейтарап атомында бір валентті байланыстың үзілуі 13.3-суретте бейнеленген «электрон – кемтік» жұбының пайда болуына ұқсайды. Бұл процесс *генерация* деп немесе энергия көзі жылу энергиясы болса *термогенерация* деп аталады. Сонымен қатар кері процесс – *рекомбинация*, яғни электрон мен кемтік кезіккен кезде валентті байланыстың қалпына келуі жүреді.

Донорлық, сол сияқты акцепторлық қоспамен идеалды жартылай өткізгіште термогенерацияның арқасында екі белгідегі еркін зарядтар болады. *n*-типті жартылай өткізгіштер үшін бос электрондар *негізгі*, ал кемтіктер *негізгі емес заряд тасушылар* деп аталады. *p*-типті жартылай өткізгіш үшін негізгі заряд тасушылардың қызметін кемтіктер, ал негізгі еместерінің қызметін электрондар атқарады. Одан әрі бұл зарядтарды негізгі және негізгі емес тасушылар деп атаймыз. Негізгі тасушылардың концентрациясы, яғни олардың 1 см^3 -дегі саны, әдетте негізгі емес тасушылардың концентрациясынан асады.

Егер электр энергиясының сыртқы көзінің көмегімен бір жартылай өткізгіш өзекте кернеулігі ε электр өрісін тудыратын болсақ, онда электрондар мен кемтіктердің хаостық (жылулық) қозғалысымен қатар олардың қарсы бағыттардағы реттелген қозғалысы (дрейф) пайда болады, яғни *өткізгіштік тогы* деп аталатын электр тогы пайда болады:

$$I = I_n + I_p, \quad (13.1)$$

мұндағы I_n және I_p — токтың электрон және кемтік құраушылары.

Жартылай өткізгіш атомдарының арасында орташа l_{op} қашықтығын еркін жүріп өту уақыт моментінде зарядтардың жылжымалы тасушылары кинетикалық энергияға ие болады:

$$W = e l_{op} \varepsilon. \quad (13.2)$$

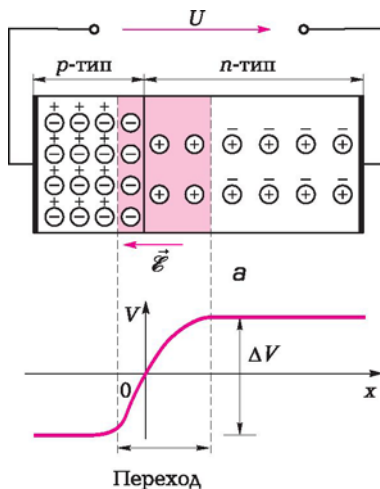
Осы энергия электр өрісінің $\varepsilon > 6\text{ МВ/м}$ кернеулігі кезінде жартылай өткізгіштің атомдарын соққымен қоздыру үшін, яғни олардағы валентті байланысты үзіп, «электрон – кемтік» жұбын тудыру үшін жеткілікті. Бұл ретте зарядтың жылжымалы тасушыларының, сәйкесінше жартылай өткізгіштің меншікті

өткізгіштігінің күрт ұлғаюы орын алады. Сипатталған құбылыс *көшкіндік тесіп өту* деп аталады. Жартылай өткізгіштің қасиеттері электр тогының кернеулігі азайған кезде қалпына келеді. Осы арқылы көшкіндік тесіп өту *жылулық тесіп өтуден* өзгешеленеді, ол көшкіндік тесіп өтуден кейін электр өрісінің кернеулігі одан әрі ұлғайған жағдайда туындайды және жартылай өткізгіштің бүлінуіне әкеледі.

13.2. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕРДЕГІ КОНТАКТІЛІК ҚҰБЫЛЫСТАР

Жартылай өткізгіш аспаптарда p - және n -типті жартылай өткізгіштердің арасында да, сол сияқты осы жартылай өткізгіштер мен диэлектриктердің, сондай-ақ металдардың арасында да бөліну шекарасында туындайтын құбылыс пайдаланылады.

p - және n -типті жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасындағы контактілік құбылыстар. Талдау қолайлы болу үшін жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасының идеалды жазық-параллель конструкциясын пайдаланамыз (13.4-сурет, *a*). Әуелі p -және n -типті идеалды жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасындағы құбылысты қарастырамыз, онда термогенерацияны, яғни негізгі емес тасушыларды елемейтін боламыз.



б

Переход – өткел
13.4-сурет

Бос кемтіктер мен электрондар концентрациясының әртүрлі болуының салдарынан энергия көзінің ажыратылған тізбегінде жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасының екі жағынан да p -типті жартылай өткізгіштен кемтіктер бөлігі n -типті жартылай өткізгішке диффузияланады (ауысады), ал n -типті жартылай өткізгіштен электрондар бөлігі p -типті жартылай өткізгішке диффузияланып, өз арасында толықтай рекомбинацияланады. Нәтижесінде жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасының бойында p - n -өткелін тудыратын, p - және n -типті жартылай өткізгіштер жақтан сәйкесінше жылжымайтын теріс және оң иондардың қабаттары пайда болады. Екі қабаттың да зарядтарының абсолюттік мәндері бірдей. Осы қабаттардың арасында пайда болатын кернеулігі ξ электр өрісі бос кемтіктер мен электрондардың бөліну шекарасы арқылы одан әрі диффузиялануына кедергі болады. Электр өрісі кернеулігінің кейбір мәнінде p - n -өткелде бөліну шекарасы арқылы диффузия толығымен тоқтайды. Егер бөліну шекарасында ($x = 0$, 13.4-сурет, б) потенциал мәнін $V(0) = 0$ деп алсақ, онда потенциалдың p - және n -типті жартылай өткізгіштердегі таралуы мына тәуелділікпен анықталады:

$$V = \int_0^x \vec{E} dx. \quad (13.3)$$

p - n -өткелдегі ΔV потенциалдардың айырымы *потенциалдық тосқауылдың биіктігі* деп аталады. Егер p - және n -типті жартылай өткізгіштердің бос шеттеріне кернеуі $U < 0$ энергия көзін қоссақ, онда потенциалдық тосқауылдың биіктігі ұлғаяды және тізбекте ток болмайды. Егер көз кернеуі $U > 0$ болса, онда потенциалдық тосқауылдың биіктігі азаяды да, тізбекте электр тогы пайда болады. Сәйкесінше, идеалды p - n -өткелде тек бір бағыттағы *негізгі тасушылар диффузиясының электр тогы* болуы мүмкін.

Термогенерация p - n -өткелдегі процестерді өзгертеді. Сыртқы энергия көзінің әсерімен потенциалдық тосқауыл ұлғайған жағдайда ток нөлге тең болып тұрады. Термогенерацияның төмен қарқындылығының салдарынан осы токтың мәні жоғары болмайды.

Жартылай өткізгіш пен металдың бөліну шекарасындағы контактілік құбылыстар. Егер металлға арналған V_m шығу потенциалы n -типті жартылай өткізгішке арналған $V_{Si(n)}$ шығу потенциалынан төмен болса, онда электрондардың металдан жартылай өткізгішке басым өтуі орын алады, оның шекаралық қабатында байытылған қабат пайда болады. Мұндай бөліну шекарасы екі бағытта да ток өткізеді және жартылай өткізгіш аспаптардың шықпаларын конструкциялау үшін пайдаланылады.

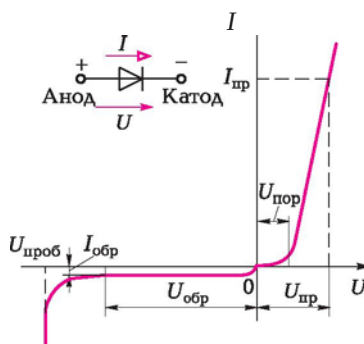
Егер $V_m > V_{si(n)}$ болса, онда жартылай өткізгішпен бөліну шекарасында металда теріс зарядты қабат, ал жартылай өткізгіште оң зарядты жұқарған қабат түзіледі. Мұндай бөліну шекарасында бір жақты өткізгіштік болады. Осындай типтегі электрлік өткелдер зерттеген ғалымның атымен *Шоттки тосқауылдары* деп аталады.

13.3. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШ ДИОДТАР

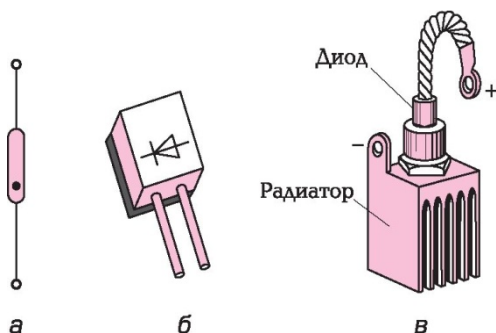
Функционалдық міндеті бойынша жартылай өткізгіш диодтар түзеткіш, импульсті, стабилитрондар, фотодиодтар, жарық шығарушы диодтар деп және т.б. бөлінеді.

Түзеткіш диодтар айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіруге арналған және олар *p-n*-өткелдің, сондай-ақ басқа да электрлік өткелдердің электр тоғын бір бағытта жақсы өткізу және қарсы бағытта нашар өткізу қасиетін пайдаланады. Диод шықпаларының арасындағы бұл токтар және оларға сәйкес кернеулер *тура* және *кері токтар*, *тура* және *кері кернеулер* деп аталады. 13.5-суретте түзеткіш диодтың шартты белгісі және оның типтік вольт-амперлік сипаттамасы келтірілген.

Тура ток пен кернеу оң мәндерде *анодтық шықпадан катодтық шықпаға* бағытталады. Диодтардың тогы мен кернеуінің таңдалған оң бағыттары үшін тура және кері шамалардың белгілері әртүрлі болғандықтан, екі жағдайда да олардың сандық мәндерін оң сандармен анықтау қабылданған.



13.5-сурет



13.6-сурет

Төмен және жоғары жиілікті түзеткіш диодтар болады. Біріншісі өнеркәсіптік жиіліктегі (100 Гц дейін) энергетикалық электрониканың түрлендіргіш құрылғыларында қолданылады, екіншісі радиосигналдарды (100 МГц дейін) түрлендіру үшін қолданылады.

Түзеткіш диодтардың негізгі параметрлері (13.1-кесте):

- тұрақты $U_{тр}$ тура кернеуінде тұрақты $I_{тр}$ тура тогы;
- тұрақты $U_{кр}$ кері кернеуінде тұрақты $I_{кр}$ кері тогы
- максималды рұқсат етілген тұрақты $U_{кр.мах}$ кері кернеуі;
- максималды рұқсат етілген орташа $I_{тр.ор.мах}$ тура тогы;

13.1-кесте. 25°C жағдайындағы түзеткіш диодтардың кейбір типтерінің электрлік параметрлері

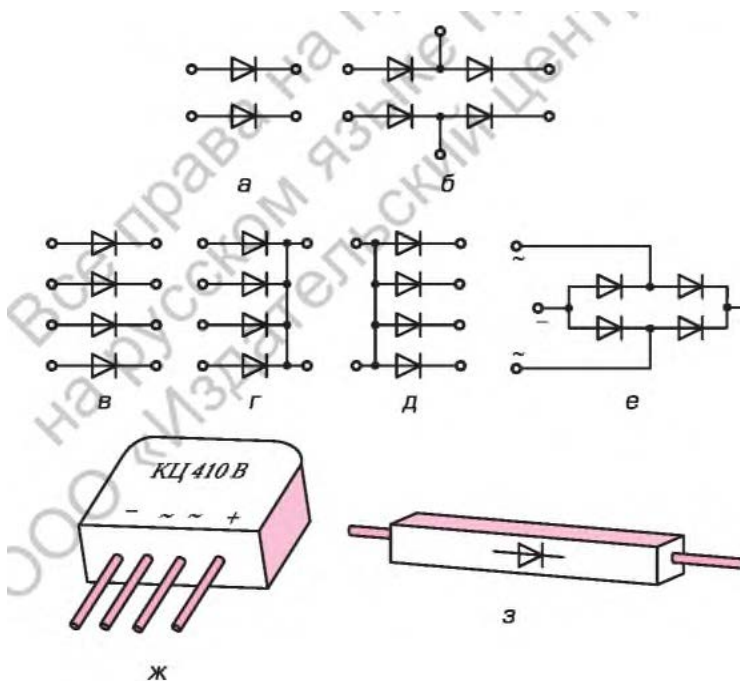
Диод типі	$U_{кр.мах}$ В	$I_{тр.ор.мах}$ А	$I_{тр}$, А	$I_{кр}$, А	Ескерту
ЕД103А	75	9,1	0,05(1 В)	0,05(75 В)	Төмен қуатты диод $I_{тр} < 0,3$ А, 13.6-сурет, а
КД210Б	800	10	10(1 В)	1,5(800 В)	Орташа қуатты диод $0,3$ А $< I_{тр} < 10$ А, 13.6-сурет, б
5SDA 9P23	2 000	850	1800(1,3 В)		Жоғары қуатты диод $I_{тр} > 10$ А, 13.6-сурет, в

Қосымша ретінде мына параметрлер қолданылады:

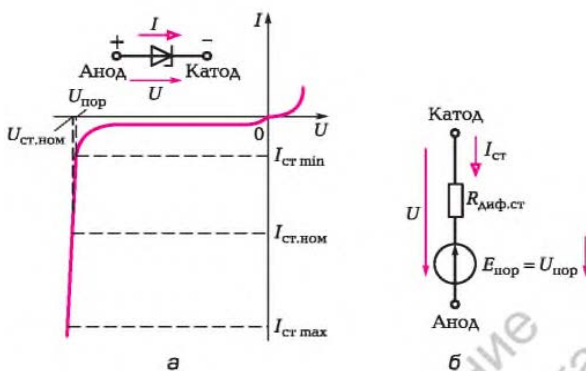
- $U_{\text{шек}}$ тұрақты шектік өткізгіштік кернеуі;
- $U_{\text{тес}}$ электрлік тесіп өтуді бұзатын тұрақты кернеу;
- θ_{max} қоршаған ортаның максималды рұқсат етілген температурасы (германий үшін 70 °С дейін, кремний үшін 150 °С дейін, титан үшін 250 °С дейін) және т.б.

Дара диодтардан басқа олардың белгілі бір схема бойынша жалғанған конструктивті аяқталған модульдер болып есептелетін құрастырмалары да шығарылады. Құрастырмалардың арасында: 50 В дейінгі кері кернеудегі 0,1 А дейінгі тура токқа арналған диодтық матрицалар (13.7-сурет, а-е), 600 В дейінгі кері кернеудегі 3 А дейінгі тура токқа арналған бір фазалық (13.7-сурет, ж) және үш фазалық (13.7-сурет, з) түзеткіш блоктар және 15 кВ дейінгі кері кернеудегі 1 А дейінгі тура токқа арналған жоғары вольтты түзеткіштердегі жұмыс үшін тізбектей жалғанған диодтардан құралған жоғары вольтты бағандар (13.7-сурет, з) болады.

Импульсті диодтар көбінесе импульсті құрылғылардағы жұмысқа арналған. Олардың 13.1-кестеде көрсетілгеннен қасиеттерден басқа



13.7-сурет



13.8-сурет

қасиеттерін диодты ауыстыру инерциялылығын есептейтін параметрлер айқындайды: C_d өткел сыйымдылығы (1—20 пФ), $\Delta t_{\text{кал}}$ кері кедергінің қалпына келетін уақыт аралығы (1—500 нс) және т.б.

Стабилитрондар, немесе тірек диодтар, тұрақты кернеуді тұрақтандыруға және кернеу шығарындыларын шектеуге арналған. Бұл диодтарда кері кернеудің кейбір $U_{\text{кр}} = U_{\text{тес}}$ мәндерінде p - n -өткелдің электрлік тесіп өтуін (көшкіндік тесіп өтуін) бұзбайтын құбылыс пайдаланылады (13.8-сурет, а). Ток пен кернеудің оң бағыттары анодтан катодқа қарай таңдалған, ВАС диодтар кескінінде солай қабылданған.

Стабилитронның $I_{\text{ст.мин}}$ бастап $I_{\text{ст.мах}}$ дейінгі көшкіндік тесіп өту тогын өлшеу кезінде ондағы керу аз өзгереді:

$$U = U_{\text{шек}} + R_{\text{диф.ст}} I_{\text{ст}}$$

мұндағы $U_{\text{шек}}$ және $R_{\text{диф.ст}}$ — стабилитронның шектік өткізгіштік кернеуі және дифференциалды кедергісі, олар стабилитронның эквивалентті алмастыру схемасы элементтерінің параметрлері болып табылады (13.8-сурет, б)

$I_{\text{ст}}$ токтың және U кернеудің оң бағыттары эквивалентті алмастыру схемасында, схемотехникада қабылданғандай, катодтан анодқа қарай таңдалған.

Стабилитрондардың маңызды параметрі кернеуді тұрақтандырудың *температуралық коэффициенті* (КТК) болып табылады, ол температура 1°C -қа өзгерген кезде және стабилитронның номиналды тогы $I_{\text{ст.ном}}$ тұрақты болған кезде тұрақ-

$$\alpha_U = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст.ном}} \Delta \theta} 100 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}, \quad (13.4)$$

тандыру кернеуінің салыстырмалы өзгерісіне тең. Төмен вольтты стабилитрондар үшін ($U_{\text{ст.ном}} = 3,3 — 5,6 \text{ В}$) КТК теріс мәндерге ие, $U_{\text{ст.ном}} \geq 6 \text{ В}$ стабилитрондар үшін оң мәндерге ие.

p - n -өткелдердің ВАС тура тарамдары теріс КТК-ке ие. Сондықтан тұрақтандыру кернеуі $U_{\text{ст.ном}} \geq 6 \text{ В}$ болатын стабилитрондар үшін тура бағытта бір корпуста p - n -өткелдерді тізбектей қосу арқылы олардың оң КТК-ін термокомпенсациялауға болады. Термокомпенсацияланған прецизионды стабилитрондар үшін КТК $0,0005 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ дейін азаяды.

Максималды рұқсат етілген шығындар қуаты $P_{\text{шығ max}} = U_{\text{ст max}} I_{\text{ст. max}} = 0,1—0,3 \text{ Вт}$ болатын аз қуатты стабилитрондар орташа ($0,3-0,5 \text{ Вт}$) және жоғары қуатты (8 Вт -дан жоғары) кернеулі өтемдеуші стабилизаторларда және параметрлік кернеу стабилизаторларында тірек кернеуінің көздері ретінде және кернеу шығарындыларын шектеу үшін пайдаланылады.

13.2-кестеде стабилитрондардың, сондай-ақ *стабисторлардың* кейбір типтерінің электрлік параметрлері келтірілген. Стабисторлар кернеуді тұрақтандыру үшін p - n -өткелдің ВАС тура тарамдары

13.2-кесте. Стабилитрондар мен стабисторлардың кейбір типтерінің электрлік параметрлері

Тип	$U_{\text{ст.ном}}, \text{ В}$	$I_{\text{см}}, \text{ мА}$		$R_{\text{диф.ст}}$		$\alpha_U, \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{пот max}}, \text{ Вт}$
		min	max	Ом	$I_{\text{см}}, \text{ мА}$		
2С107А	$0,7 \pm 0,07$	1	100	7	10	- 0,3	0,300
2С119А	$1,9 \pm 0,1$	1	100	15	10	- 0,4-0,5	0,300
2С133А	$3,3 \pm 0,3$	3	81	65	10	- 0,11	0,300
2С175Ж	$7,5 \pm 0,4$	3	17	40	4	0,065	0,125
2С213Б	$13 \pm 0,65$	3	10	25	5	0,075	0,125
Д217Г	100 ± 10	5	50	82	50	0,18	5
Д815Ж	$18 \pm 1,8$	25	460	3	500	0,14	8

қолданылатын аспаптар болып есептеледі. Стабисторлар 100 мА дейінгі токта 1-2 В кернеуді тұрақтандыру үшін пайдаланылады.

13.4. БИПОЛЯРЛЫҚ ТРАНЗИСТОРЛАР

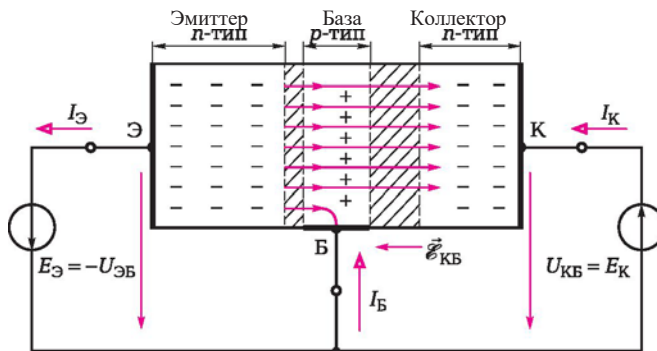
Биполярлық транзисторлардың жұмысы жақын орналасқан екі p - n -өткелдердің өзара әрекеттесу құбылыстарына негізделген.

Биполярлық транзистордың идеалды моделі үш қабатты n - p - n немесе p - n - p типті құрылымы болып есептеледі (13.9-сурет). 13.10, a және b суреттерінде осы транзисторлардың шартты белгілері берілген. Транзистордың *биполярлық* деп аталуының себебі – онда физикалық процестер екі белгідегі зарядтардың (бос кемтіктер мен электрондар) қозғалысымен байланысқан.

Биполярлық транзистордың ортаңғы қабаты Б *база* деп, бір шеткі қабаты К *коллектор*, екінші шеткі қабаты Э *эмиттер* деп аталады. Әрбір қабатың шықпасы болады, соның көмегімен транзистор тізбекке қосылады. Биполярлық транзистор шықпаларының арасындағы кернеулердің полярлығына байланысты ол әртүрлі режимдерде жұмыс жасайды.

Биполярлық транзистордың төрт жұмыс режимі болады:

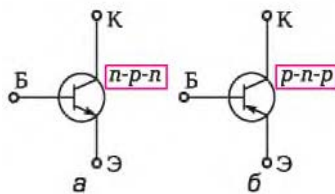
- *активті режим*, онда эмиттер өткелі – база тура бағытта, ал коллектор өткелі – база кері бағытта қосылған;
- *инверсті режим*, онда эмиттер өткелі – база кері бағытта, ал коллектор өткелі – база тура бағытта қосылған;
- *қиылу режимі* – онда екі өткел де кері бағытта қосылған;



13.9-сурет

■ *қанығу режимі*, онда екі өткел де тура бағытта қосылған.

Егер транзистор сигналдарды күшейту үшін қолданылса, онда оның активті жұмыс режимі негізгі болады, егер кілт ретінде қолданылса, онда қиылу және қанығу режимдері негізгі болады.



13.10-сурет

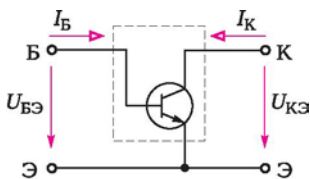
Тұрақты $E_3 = U_{\kappa 6}$ ЭҚК көзінің оң полюсін базаға қосқан кезде база мен эмиттердің арасында $p-n$ -өткелдің (13.9-суреттегі $n-p-n$ -транзистор) потенциалдық тосқауылы төмендейді. Бос электрондар эмиттерден базаға инжектрленіп, эмиттер тізбегінде I_3 тогын тудырады.

Егер коллектор мен базаның арасында тұрақты $E_k = U_{\kappa 6}$ ЭҚК көзі базаға теріс полюспен қосылса, онда база мен коллектордың арасында $p-n$ -өткелдің потенциалдық тосқауылы ұлғаяды.

Эмиттерден базаға инжектрленген электрондардың басым бөлігі коллектор тізбегінде I_3 тогын тудырып, осы $p-n$ -өткелдің кернеулігі $\varepsilon_{\kappa 6}$ күшті электр өрісімен тартылады. Эмиттерден базаға инжектрленген электрондардың болмашы бөлігі база тізбегінде I_6 тогын тудырады.

Қаралып отырған жағдайда база кіріс және шығыс тізбектердің ортақ электроды болып табылады. Биполярлық транзисторды қосудың мұндай схемасы *ортақ базалы* (ОБ) схема деп аталады. Биполярлық транзисторды қосудың *ортақ коллекторлы* (ОК) және *ортақ эмиттерлі* (ОЭ) схемалары да болуы мүмкін. Соңғысын $n-p-n$ -транзистор мысалында толығырақ қарастырамыз, себебі транзистордың осындай қосу кезіндегі сипаттамалары оның жұмысының негізгі тыныштық, төмен сигнал және кілттік режимдерін талдау үшін пайдаланылады.

Тыныштық режимі. Тұрақты ток тізбегіне ОЭ схемасы бойынша қосылған биполярлық транзистордың жұмысын (13.11-сурет) статикалық коллекторлық $I_K(U_{\kappa 6})I_{B=\text{const}}$ (13.12-сурет, а) және базалық $I_B(U_{BE})U_{KЭ=\text{const}}$ сипаттамаларымен анықтайды. Соңғысы өз тобында бір-бірінен аса қатты өзгешеленбейді, сондықтан 13.12, б суретінде бір сипаттамамен ұсынылған. Базалық сипаттамада база тогы $I_3 = 0$ болатын U_{BE} кернеуі эмиттер мен базаның арасындағы өткелдің *шектік өткізгіштік кернеуі* немесе $U_{BЭ\text{ки}}$ *қиылу кернеуі* деп аталады. Бұл кернеу шамамен абсцисс осында оның базалық сипаттаманың



13.11-сурет

жоғары сызықтық бөлігінің жалғасымен қиылысу нүктесінде анықталады.

Биполярлық транзистордың негізгі статикалық параметрлері (13.3-кесте):

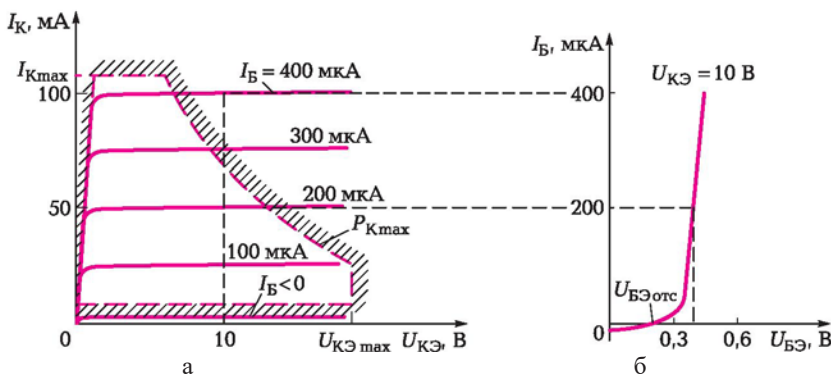
■ коллектордың $I_{К.маx}$ және базаның $I_{Б.маx}$ максималды рұқсат етілген тұрақты токтары, $U_{КЭ.маx}$ және $U_{БЭ.маx}$ кернеулері, коллектордағы $P_{К.маx}$ шығындар қуаты;

■ $U_{КЭ} = \text{const}$ кернеуінде тұрақты токтың берілу не күшею коэффициенті:

$$H_{21} = \frac{I_K - I_K|_{I_B=0}}{I_B}. \quad (13.5)$$

Олар 13.12, а суретінде штрих сызықпен белгіленген транзистордың жұмыс аймағын анықтайды.

Төмен сигнал режимі. Егер база мен эмиттердің арасында $U_{БЭ}$ және $U_{КЭ}$ тұрақты кернеулерінен басқа уақыт бойынша өзгертін төмен мәнді $u_{БЭ}$ кернеуі де қосылса, онда транзистордың жұмысын 13.13-суреттегі алмастыру схемасында $u_{БЭ}$ кернеуі жоқ кездегі тыныштық режимі мен $U_{БЭ}$ және $U_{КЭ}$ кернеулері жоқ кездегі төмен сигнал режимінің қосындысы ретінде қарастыруға болады (оның дәл-



13.12-сурет

елі мұнда келтірілмейді), оның параметрлері мына мәндерге ие:

$$\left. \begin{aligned} h_{11} &= 10^3 — 10^4 \text{ Ом;} \\ h_{22} &= 10^{-5} — 10^{-6} \text{ См;} \\ h_{21} &= 20 — 200. \end{aligned} \right\} \quad (13.6)$$

13.13-суреттегі алмастыру схемасында: $h_{11} = R_{\text{кiр}}$ және $1/h_{22} = R_{\text{шығ}}$ — кіріс және шығыс кедергілері; $h_{21}i_{\text{Б}}$ — $i_{\text{Б}}$ база тогымен басқарылатын ток көзі. Соңғы жайт биполярлық транзисторды *токпен басқарылатын аспап* деп санауға мүмкіндік береді.

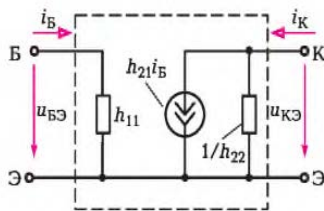
13.3-кесте. 25°C жағдайындағы түзеткіш диодтардың кейбір типтерінің электрлік параметрлері (Моторола компаниясының деректері бойынша)

Транзистор типі	$U_{\text{КЭmax}}, \text{ В}$	$I_{\text{К.max}}, \text{ А}$	$I_{\text{Б.max}}, \text{ А}$	$P_{\text{К.max}}, \text{ Вт}$	$U_{\text{БЭmax}}, \text{ В}$	H_{*21}	$I_{\text{К.ки}}, \text{ А}$	$U_{\text{КЭкан}}, \text{ В}$
2N5877	60	10	4	150	5	200... 100	0,5	1
2N5884	80	25	7,5	200	5	200... 100	1	4
2N5655	250	0,5	0,25	20	6	30... 250	0,1	1
2N5686	80	50	15	300	5	15.60	2	1

13.3-кестенің соңы

Транзистор типі	$f 1, \text{ МГц}$	$h_{* 21}$	$\Delta t_{\text{кід}}^*, \text{ мкс}$	$\Delta t_{\text{өс.}}^*, \text{ мкс}$	$\Delta t_{\text{тар.}}^*, \text{ мкс}$	$\Delta t_{\text{күл.}}^*, \text{ мкс}$
2N5877	4	20	0,04	0,3	0,6	0,3
2N5884	4	20	—	0,7	1,0	0,8
2N5655	10	20	0,04	0,12	0,33	0,22
2N5686	2	15	0,03	0,4	0,5	0,23

* Параметрді өлшеу шарттары Моторола компаниясының анықтамалығында берілген.

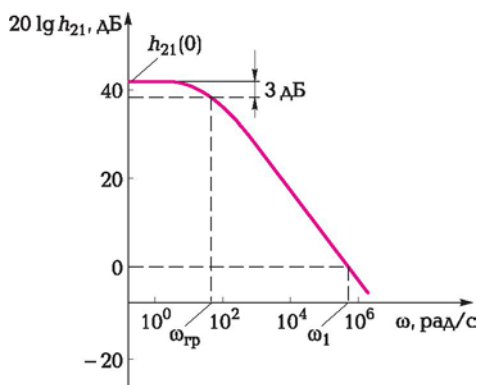


13.13-сурет

h_{21} шамасы *токтың төмен сигнал режиміндегі беріліс не күшею коэффициенті* деп аталады.

Заряд тасушылардың инерциялылығы мен *p-n-өткелдердің* электрлік сыйымдылықтарын ескеретін болсақ, биполярлық транзистордың синусоидалық сигнал режиміндегі параметрлері жиілікке тәуелді болатынын атап өтпекпіз. Сондықтан (13.6) параметрлердің мәндері төмен жиілікті төмен синусоидалық сигнал үшін дұрыс болмақ.

Биполярлық транзистордың жиілік қасиеттерін 13.4-суретте келтірілген токтың беріліс коэффициентінің логарифмалық амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы анықтайды. Ол $\omega = 0$ бұрыштық жиіліктегі токтың беріліс коэффициенті $\sqrt{2}$ есеге, ал $20 \lg h_{21}$ шамасы — $20 \lg \sqrt{2} = 3$ дБ азаятын $\omega_{ш}$ *шекаралық бұрыштық жиілікті* және ω_1 *токтың бірлік берілісінің бұрыштық жиілігін* немесе токтың беріліс коэффициенті $h_{21} = 1$ болатын $f_1 = \omega_1/2\pi$ жиілігін белгілейді.



13.14-сурет

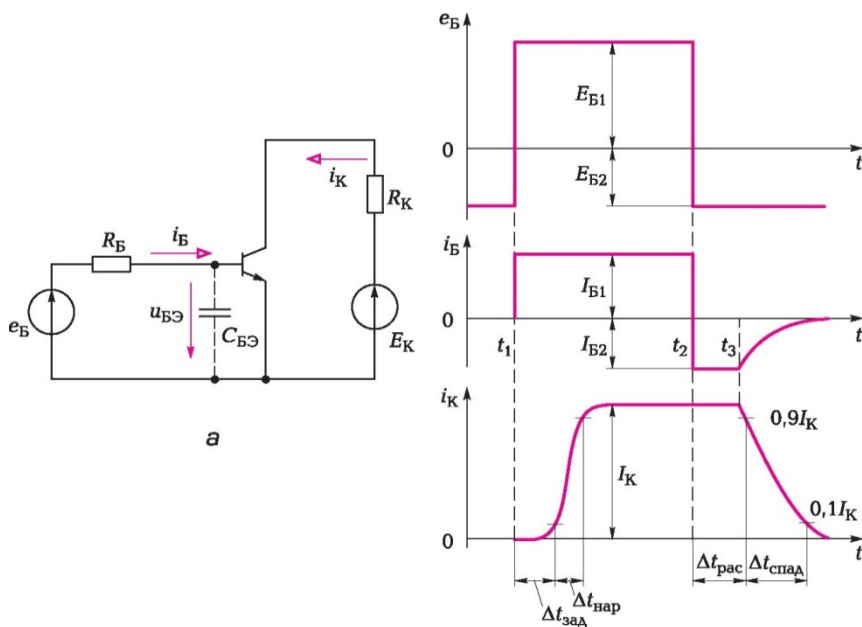
h_{21} токтың беріліс коэффициенті мен f_1 бірлік беріліс жиілігі биполярлық транзистордың негізгі параметрлері болып табылады (13.3-кестені қараңыз).

Кілттік режим. 13.15, *a* және *б* суреттерінде *n-p-n* биполярлық транзисторды сынау мысалындағы өлшеу тізбегінің схемасы және оны қосу мен ажыратудың біріккен уақытша диаграммалары келтірілген.

Биполярлық транзистордың импульсті сипаттамалары негізінен 13.15, *a* суретінде штрих сызықпен көрсетілген $C_{ЭБ}$ эмиттер – база өткелінің сыйымдылығымен, сондай-ақ негізгі емес заряд тасушылардың, яғни базадағы *n-p-n* биполярлық транзисторға арналған электрондардың жиналу және таралу процестерімен анықталады.

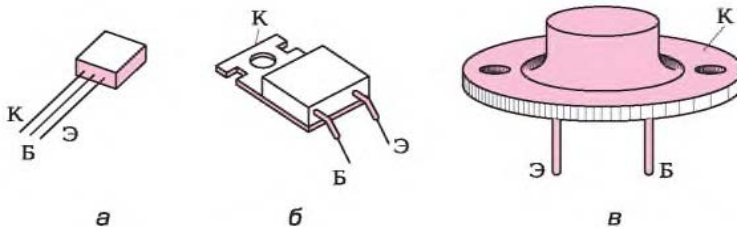
$e_B = -E_{B2}$ ЭҚК әсерімен бастапқы күйінде транзистор ажыратулы (қиылу режимі) болады. Бұл ретте эмиттер – база өткелінің сыйымдылығындағы кернеу: $u_{БЭ} = -E_{B2}$.

Биполярлық транзисторды қосу екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде негізінен эмиттер – база өткелінің сыйымдылығы қайта зарядталады, ондағы кернеу $-E_{B2}$ теріс мәнінен оң мәнге ауысады. Бұл ретте транзистор кернеу $u_{БЭ} < U_{БЭки}$ болғанға дейін ажыратулы бола береді. Екінші кезеңде $u_{БЭ} > U_{БЭки}$ кернеуінде коллектордың тогы



13.15-сурет

б



13.16-сурет

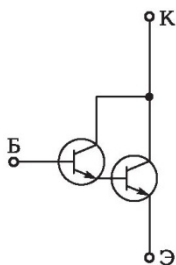
$I_K = E_K/R_K$ мәніне дейін ұлғаяды, ал база қабатында негізгі емес заряд тасушылар жиналады. $e_B = E_{B1} > |u_{BЭ}|$ ЭКК тікбұрышты импульсінің $t_2 - t_1$ әсер ету уақытының аралығында база тогының импульсі де $I_{B1} = E_{B1}/R_B$ амплитудасымен тікбұрышты болады.

Биполярлық транзисторды *ажырату* да екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде базада $i_B = -E_{B1}/R_B$ база тогымен жиналған негізгі емес заряд тасушылар t_2 моментінен t_3 моментіне дейін таралады, бұл кезде $u_{BЭ}$ кернеуі $U_{BЭки}$ мәніне дейін азаяды. Бұл ретте транзистор қосулы күйінде қалады. Екінші кезеңде негізінен эмиттер – база өткелінің сыйымдылықтары $U_{BЭки}$ кернеуінен $u_{BЭ} = -E_{B2}$ кернеуіне дейін қайта зарядталады.

Биполярлық транзистордың негізі *импульсті* параметрлері (13.3-кестені қараңыз):

- $\Delta t_{кид}$ кідіру, $\Delta t_{өс}$ коллектор тогының өсу, $\Delta t_{тар}$ базадан негізгі емес заряд тасушылардың таралу және $\Delta t_{күл}$ коллектор тогының азаю уақытының аралықтары;
- қиылу режиміндегі коллектордың $I_{Кки}$ тұрақты тогы;
- қанығу режиміндегі $U_{КЭқан}$ тұрақты кернеуі.

Статикалық параметрлерінің мәні бойынша биполярлық транзисторлар төмен ($P_{Кmax} = 0,3$ Вт, $I_{Кmax} = 0,3$ А дейін, 13.16-сурет, а), орташа (сыртқы жылу әкету болған жағдайда 0,3—1,5 Вт, 0,3—1,5 А, 13.16-сурет, б) және жоғары (сыртқы жылу әкету болған жағдайда 1,5 Вт, 1,5 А жоғары 13.16-сурет, в) қуатты болып бөлінеді.



13.17-сурет

Токтың бірлік беріліс жиілігінің мәні бойынша төмен (f_1 3 МГц дейін), орташа (3 — 30 МГц) және жоғары (30 МГц жоғары) жиілікті болады.

Биполярлық транзисторлардың негізгі артықшылығы – коллектор тогының мәндері (25 А дейін) айтарлықтай жоғары болған кезде коллектор мен эмиттердің арасындағы кернеудің рұқсат етілген жоғары мәні (бірнеше киловольтқа дейін).

Негізгі кемшілігі – салыстырмалы түрде төмен кіріс кедергісі (1-10 кОм), әдетте неғұрлым аз болса, транзистордың қуаты соғұрлым жоғары болады, бұл олардың төмен қуатты көзден басқарылуын қиындатады. Осы кемшілікті жою үшін бір корпустағы төмен қуатты транзистормен басқарылатын жоғары қуатты транзистордан *құрама транзисторларды* (13.17-сурет) қолданады.

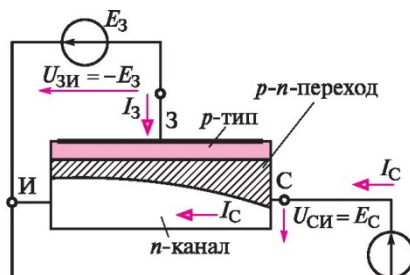
13.5. ДАЛАЛЫҚ ТРАНЗИСТОРЛАР

Басқарылмалы *p-n*-өткелді және металл – диэлектрик – жартылай өткізгіш конструкциясының негізіндегі далалық транзисторлар немесе МДЖ-транзисторлар болады.

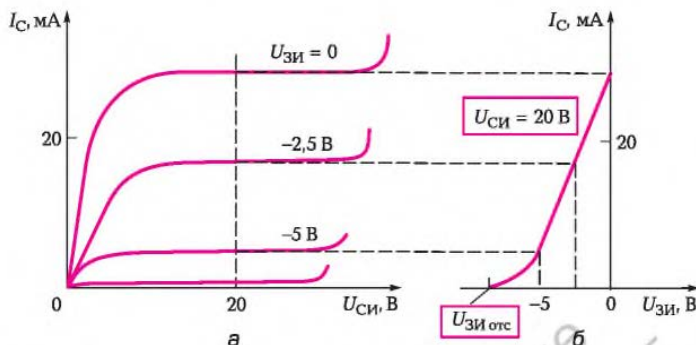
Басқарылмалы *p-n*-өткелді далалық транзисторлар.

Басқарылмалы *p-n*-өткелді және *n*-арналы далалық транзистордың жұмыс принципін оның идеалды моделінің негізінде қарастырайық (13.18-сурет).

И *бастау* және С *ағынды* деп аталатын екі электродтың арасында *n*-типті жартылай өткізгіштен *n*-арна орналасқан. Егер бастау мен ағындының арасында ағындыға оң полюспен E_C ЭҚК қосылса, онда *n*-арнада өткізгіштік тогы (13.1) бар дегенді білдіреді, ол токтың мәні арнаның кедергісіне тәуелді болады. Өз кезегінде, *n*-арнаның кедергісі оның еніне тәуелді, аталмыш енді далалық транзисторларда өзгертуге болады. Ол үшін 3 *бекітпе* деп аталатын үшінші электрод пен бастаудың арасына E_C ЭҚК бекітпеге теріс полюспен қосылады, сондықтан *n*-арна мен бекітпедегі *p*-типті жартылай өткізгіштің арасындағы *p-n*-өткел кері бағытта қосылады. Жылжымалы тасушылармен жүқарған *p-n*-өткелдің ені (13.18-суретте штрих сызықпен берілген аймақ) *n*-арнаның еніне әсер етіп, сол арқылы оның өткізгіштігіне де әсер етеді.



p-n-переход – *p-n*-өткел; *n*-канал – *n*-арна
13.18-сурет



13.19-сурет

n -арналы және басқарылмалы p - n -өткелді далалық транзистордың жұмысын статикалық ағындық $I_C(U_{СИ})_{U_{ЗИ}=\text{const}}$ (13.19-сурет, а) және ағындық-бекітпелі $I_C(U_{ЗИ})_{U_{СИ}=\text{const}}$ (13.19-сурет, б) сипаттамалар анықтайды. Соңғысы өз тобында бір-бірінен аса қатты өзгешеленбейді, сондықтан бір сипаттамамен ұсынылған. $U_{СИ}$ кернеуінің шамадан тыс ұлғаюы бекітпе мен ағындының арасында көшкіндік тесіп өту тудырады. $U_{ЗИ}$ кернеуінде, $U_{СИки}$ төмен кернеуінде арна жабық болады ($I_C = -I_3$). $U_{СИ}$ және $U_{ЗИ}$ кернеулерінің полярлылығының өзгеруі бекітпенің жұмысын бұзады.

n -арнаның орнына p -типті жартылай өткізгіштен тұратын p -арна, ал бекітпе n -типті жартылай өткізгіштен болуы мүмкін.

Арнадағы заряд тасушылардың қозғалысына перпендикуляр бағытталған кернеулі электр өрісімен арна өткізгіштігін басқару транзистордың атауын – *далалық* дегенді білдіреді.

Далалық МДЖ-транзисторлардың p - n -өткелді далалық транзисторлардан айырмашылығы – оларда 3 бекітпесінің электроды арнадан диэлектрик қабатымен оқшауланған. Диэлектрик ретінде әдетте SiO_2 пайдаланылады. Сондықтан МДЖ терминімен қатар МОЖ термині де қолданылады, ол металл – оксид – жартылай өткізгіш құрылымын білдіреді (MOSFET — metal oxid semiconductor field effect transistor).

МДЖ-транзистор p немесе n -типті кремний тілімі болып есептеледі, ол *П төсеніш* деп аталады, онда өткізгіштіктің қарама-қарсы типі бар екі аймақ құрылады. Ол аймақтардың бірі *И бастау*, екіншісі *С ағынды* ретінде пайдаланылады.

МДЖ-транзисторлар кіріктірме және индуцирленген арналы бо-

лып бөлінеді.

Кіріктіріме *n*-арналы МДЖ-транзистор (13.20-сурет) *p*-типті жартылай өткізгіштен жасалған төсеніштен тұрады, онда ағынды мен бастауға арналған *n*-типті жартылай өткізгіштің екі аймағы құрылады. Диэлектрик пен төсеніштің бөліну шекарасында контактілік құбылыстардың салдарынан оның шекаралық қабатында инверсті қабат, яғни *n*-арна пайда болады. Бұл арна өз арасында $U_{зи} = 0$ кернеу жоқ кезде ағынды мен бастау аймақтарын жалғайды. $U_{зи} > 0$ болған кезде арна электрондармен байытылады, ал $U_{зи} < 0$ кезінде жұқарады.

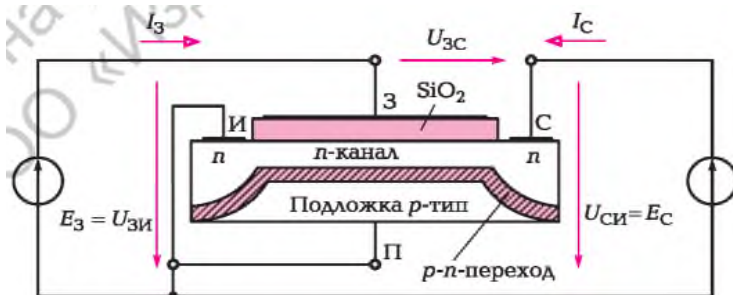
Кіріктіріме *n*-арналы МДЖ-транзистордың статикалық ағындық және ағындық-бекітпелі сипаттамалары 13.21, *a* және *б* суреттерінде келтірілген, ондағы $U_{зики}$ — қиылу кернеуі.

Кіріктіріме арналы МДЖ-транзистордың ерекшелігі – олардың арнаны жұқарту және байыту режимінде жұмыс істеу мүмкіндігі болып табылады.

Индукцияланған *n*-арналы МДЖ-транзистор 13.20-суреттегі құрылымда төсеніштің жартылай өткізгіш қабатын SiO_2 диэлектригінің астында акцепторлармен лигирлеген жағдайда алынады. Онда $U_{зи} = 0$ кернеуінде ағынды мен бастау арасында өткізгіш арна болмайды да, $U_{зи} > U_{зишек}$ кернеуінде пайда болады.

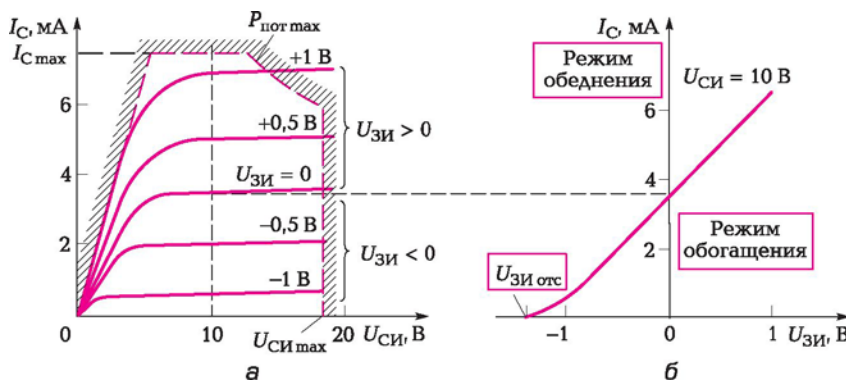
13.22, *a* және *б* суретінде индукцияланған *n*-арналы МДЖ-транзистордың ағындық және ағындық-бекітпелі статикалық сипаттамалары келтірілген.

МДЖ-транзисторларда төсеніш электроды не бастау электродымен бірігеді, не екінші бекітпе ретінде қызмет етеді.



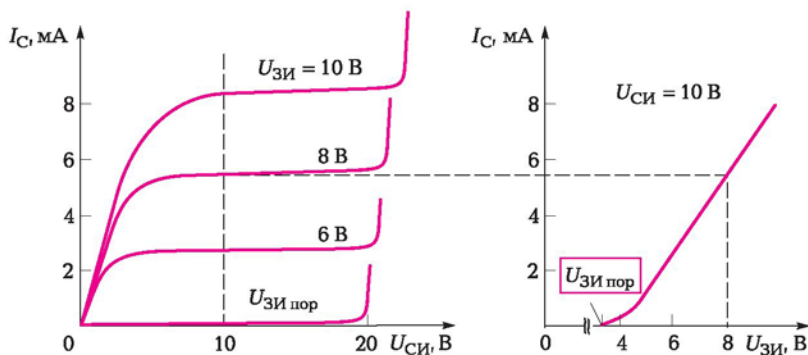
p-*n*-переход – *p*-*n*-өткел; *n*-канал – *n*-арна; подложка – төсеніш

13.20-сурет

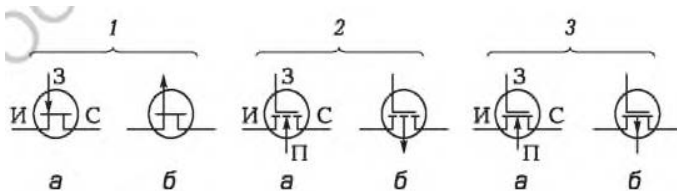


13.21-сурет

Басқарылмалы p - n -өткелді далалық транзисторлардың, индуцирленген n -арналы МДЖ-транзисторлардың және кіріктірілме арналы МДЖ-транзисторлардың шартты белгілері сәйкесінше 13.23-суреттің 1-3-позицияларында, а n -арна үшін және 13.23, б суреті p -арна үшін келтірілген.



13.22-сурет



13.23-сурет

Қаралып отырған жағдайларда бастау кіріс және шығыс тізбектердің ортақ электроды болып табылады. Далалық транзисторды қосудың мұндай схемасы *ортақ бастаулы* (ОИ) схема деп аталады. Транзистордың сипаттамалары бұл ретте оның жұмысының негізгі тыныштық, төмен сигнал және кілттік режимдерін талдау үшін пайдаланылады.

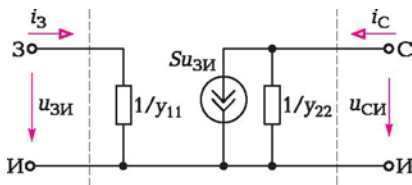
Тыныштық режимі. Тұрақты ток тізбегіндегі далалық транзистордың жұмысын статикалық ағындық және ағындық-бекітпелі сипаттамалар анықтайды (13.19, 13.21 және 13.22-суреттерді қараңыз).

Далалық транзисторлардың негізгі *статикалық* параметрлері (13.4-кесте): ағындының $I_{C,max}$ максималды рұқсат етілген тұрақты токтары, $U_{СИ,max}$ және $U_{ЗИ,max}$ кернеулері және $P_{К,max} = I_C U_{СИ}$ шығын қуаты. Олар 13.21, а суретінде штрих сызықпен белгіленген транзистордың жұмыс аймағын анықтайды.

Төмен сигнал режимі. Егер бекітпе мен бастаудың арасында $U_{СИ}$ және $U_{ЗИ}$ тұрақты кернеулерінен басқа уақыт бойынша өзгертін төмен мәнді $u_{ЗИ}$ кернеуі де әрекет етсе, онда далалық транзистордың жұмысын 13.24-суреттегі алмастыру схемасында $U_{ЗИ}$ кернеуі жоқ кездегі тыныштық режимі мен $U_{СИ}$ және $U_{ЗИ}$ кернеулері жоқ кездегі төмен сигнал режимінің қосындысы ретінде қарастыруға болады (оның дәлелі мұнда келтірілмейді), оның параметрлері мына мәндерге ие:

$$\left. \begin{aligned} y_{11} &= 10^{-7} \text{—} 10^{-9} \text{ См}; \\ y_{21} &= 1 \text{—} 10^{-1} \text{ мА/В}; \\ y_{22} &= 10^{-5} \text{—} 10^{-6} \text{ См}. \end{aligned} \right\} \quad (13.7)$$

13.24-суреттегі алмастыру схемасында: $1/y_{11} = R_{к\text{іріс}}$ және $1/y_{22} = R_{шығ}$ — кіріс және шығыс кедергілері; $Su_{ЗИ} = y_{21}u_{ЗИ} - u_{ЗИ}$ кернеуімен басқарылатын ток көзі. Соңғы жайт далалық транзисторды база тогымен басқарылатын биполярлық транзистормен (13.13-суретті қараңыз) салыстырғанда *кернеумен басқарылатын аспап* деп санауға мүмкіндік береді.



13.24-сурет

13.4-кесте. 25°C жағдайындағы түзеткіш диодтардың кейбір типтерінің электрлік параметрлері (Моторола компаниясының деректері бойынша)

Транзистор типі	$U_{СИ\max}$, В	$U_{ЗИ\max}$, В	$P_{шек.\max}$, Вт	$I_{C\max}$, А	S , мСм	$C_{к\text{ір}}$, пФ	$C_{шығ}$, пФ	$C_{пр}$, пФ	$I_{Скн}$, мА
MTB2N40E	400	20	40	2	1,0	229	34	7,3	10
MTD1N50E	500	20	40	1	0,9	215	30,2	6,7	10
MTB50N06V	60	20	125	42	23	1 644	465	112	10
MTB75N05HD	50	20	125	75	15	2 600	1000	230	10

13.4-кестенің соңы

Транзистор типі	$R_{СИ\cos}^*$ Ом	$U_{СИ\cos}^*$ В	$\Delta t_{кан.кід}^*$ НС	$\Delta t_{кан}^*$ НС	$\Delta t_{аз.кід}^*$ НС	$\Delta t_{аз}^*$ НС	q_{1}^* нКл	q_{2}^* нКл	q_{y}^* нКл
MTB2N40E	3,1	7,3	8	8,4	12	11	2,6	3,2	8,6
MTD1N50E	4,3	4,5	8	9	14	17	1,6	3,8	7,4
MTB50N06V	0,025	1,4	12	130	70	62	9	21	47
MTB75N05HD	0,007	0,64	15	170	70	100	13	33	71

* Параметрді өлшеу шарттары Моторола компаниясының анықтамалығында берілген.

$S = y_{21}$ шамасы *тікшіл ағындық-бекітпелі сипаттама* деп аталады және ол төмен сигнал режиміндегі далалық транзистордың негізгі параметрі болып табылады (13.4-кестені қараңыз).

Ағынды, бастау және бекітпе электродтарының арасындағы электрлік сыйымдылықтарды ескеретін болсақ, далалық транзистордың синусоидалық сигнал режиміндегі y -параметрлері жиілікке тәуелді болады. Сондықтан далалық транзисторды алмастыру схемасы (13.24-суретті қараңыз) элементтерінің (13.7) y -параметрлерінің мәндері тұрақты кезде төмен және орташа жиілікті төмен синусоидалық сигнал үшін дұрыс болмақ.

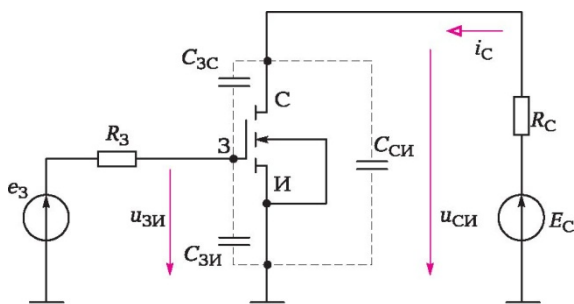
Кілттік режим. 13.25, *a* және *б* суреттерінде ОИ схемасы бойынша қосылған индуцирленген n -арналы МДЖ-транзисторды сынау мысалындағы өлшеу тізбегінің схемасы және оны қосу мен ажыратудың біріккен уақытша диаграммалары келтірілген.

Далалық транзистордың импульсті сипаттамалары негізінен 13.25, *a* суретінде штрих сызықпен көрсетілген $C_{зи}$, $C_{си}$, $C_{зс}$ электродтарының арасындағы сыйымдылықтармен анықталады.

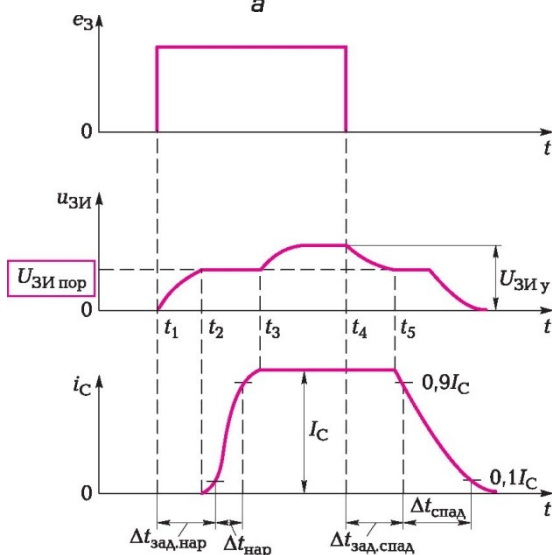
$e_3 = 0$, яғни $u_{зи} = 0$ ЭҚК мәніндегі бастапқы күйінде транзистор ажыратулы (13.22-суретті қараңыз) болады.

Далалық транзисторды *қосу* екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде негізінен $C_{зи}$ сыйымдылығы t_1 уақыт моментінде оның әрекеті басталғаннан бастап, $u_{зи}$ кернеуі $U_{зишөк}$ мәніне жететін t_2 уақыт моментіне дейінгі уақыт аралығында e_3 ЭҚК көзінен зарядталады. Бұл ретте n -арна жабық болып қала береді, ал транзистор ажыратулы болады. Екінші кезеңде t_2 уақыт моментінен бастап n -арна ашылады. i_c тогы ұлғаяды, $u_{си}$ кернеуі азаяды және e_3 ЭҚК көзінен $C_{зи}$ сыйымдылығы зарядталады. Бұл ретте $u_{зи} = U_{зишөк}$ кернеуі және $C_{зи}$ заряд сыйымдылығы ағын тогы $I_c \approx E_c/R_c$ максималды мәнге жететін (Миллер әсері) t_3 уақыт моментінде транзистор толық қосылғанға дейін мүлдем өзгеріссіз болады. Одан әрі біраз уақыт ішінде $C_{зи}$ және $C_{зс}$ сыйымдылықтары e_3 ЭҚК көзінен $u_{зи6}$ кернеудің белгіленген мәніне дейін зарядталады.

Далалық транзисторды *ажырату* екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде негізінен $C_{зи}$ және $C_{зс}$ сыйымдылықтары e_3 ЭҚК-ң әсер етеуі аяқталған t_4 уақыт моментінен бастап, $u_{зи}$ кернеуі $U_{зишөк}$ мәніне дейін азаятын t_5 уақыт моментіне дейін e_3 ЭҚК зарядтан ажырайды. Бұл ретте n -арна ашық болып қала береді, ал транзистор қосулы болады. Екінші кезеңде n -арна жабыла бастайды. i_c тогы азаяды, $u_{си}$ кернеуі ұлғаяды және E_c ЭҚК көзінен негізінен $C_{зс}$ сыйымдылығы зарядталады. Бұл ретте біраз уақыт ішінде n -арна толық жабылғанға дейін кернеу $u_{зи} = U_{зишөк}$ болады, одан соң нөлге дейін азаяды.



а

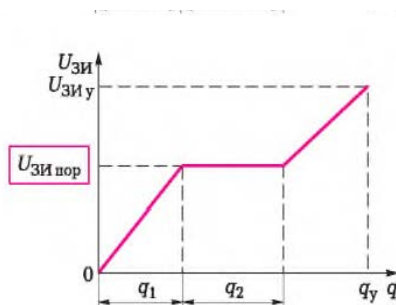


б

13.25-сурет

МДЖ-транзистордың негізі *импульсті* параметрлері (13.4-кестені қараңыз):

- $\Delta t_{\text{өс.кід}}$ ағын тогы өсімінің кідіру (13.25, б суретін қараңыз), $\Delta t_{\text{өс}}$ ағын тогының өсу, $\Delta t_{\text{аз.кід}}$ ағын тогы азаюының кідіру және $\Delta t_{\text{аз}}$ ағын тогының азаю уақытының аралықтары;
- кіріс $C_{\text{кір}} = C_{3\text{с}} + C_{3\text{и}}$, шығыс $C_{\text{шығ}} = C_{\text{си}} + C_{3\text{с}}$ және өтпелі $C_{\text{өтп}} = C_{3\text{с}}$ сыйымдылықтар;
- $e_{\text{с}}$ ЭҚК көзінен негізінен $C_{\text{кір}}$ кіріс сыйымдылығымен $\Delta t_{\text{өс.кід}}$ және $\Delta t_{\text{өс}}$ уақыт аралығында алынатын q_1 және q_2 зарядтары (13.26-сурет) және белгіленген q_6 ;



13.26-сурет

- қосылған МДЖ-транзистор үшін ағын мен бастаудың арасындағы $R_{\text{СИкос}}$ кедергісі мен $U_{\text{СИкос}}$ кернеуі;
- ажыратылған МДЖ-транзистор үшін $I_{\text{Ски}}$ ағын тогы (қиылу тогы);

Далалық транзисторлардың негізгі артықшылығы – кіріс тізбегінің жоғары кедергісі ($1 — 10^4$ МОм), бұл оларды төмен қуатты көзден басқаруды жеңілдетеді.

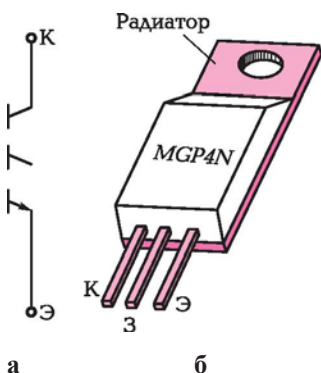
Негізгі кемшілігі – ағын мен бастаудың арасындағы кернеудің салыстырмалы түрде рұқсат етілген төмен мәндері (бірнеше жүз вольтқа дейін).

13.6.

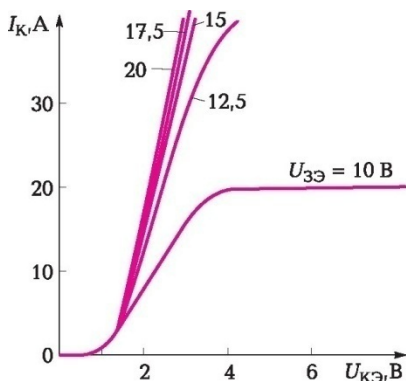
ТОЛЫҚ БАСҚАРЫЛАТЫН ЖОҒАРЫ ҚУАТТЫ ТРАНЗИСТОРЛЫҚ КІЛТТЕР

Төмен қуатты көздермен басқарылатын, *толық басқарылатын* (қосу және ажырату) жоғары қуатты *транзисторлық кілттер* энергетикалық электроникада кеңінен пайдаланылады.

Оларды қолдану электр энергиясын түрлендіру құрылғыларының жұмыс сипаттамаларын айтарлықтай жақсартып, олардың ПӘК-ін ұлғайтуға мүмкіндік береді. Транзисторлық кілттердің негізгі параметрлеріне тұйықталған және ажыратылған күйдегі ток пен кернеу мәндері, ауыстыру жиілігі, сондай-ақ тұйықталған және ажыратылған кілттің уақыт аралықтарына сәйкес келетін статикалық және оны қосу мен ажырату шептеріне сәйкес келетін динамикалық шығын қуаттары жатады.



13.27-сурет



13.28-сурет

Толық басқарылатын транзисторлық кілттер оқшауланған бекітпелі биполярлық және далалық транзисторлардың негізінде болады.

Оқшауланған бекітпелі биполярлық транзистор (ОҚБТ — IGBT, Insulated Gait Bipolar Transistor) басқару тізбегіндегі МДЖ-транзистормен құрама транзистор (13.17-суретті қараңыз) болып есептеледі. Бұл ретте жоғары қуатты биполярлық транзистордың (коммутацияланатын кернеулердің рұқсат етілген жоғары мәндері) және МДЖ-транзистордың оң сапалары (жоғары ауысу жылдамдығы, төмен басқару қуаты) ұштасады. 13.27, а және б суреттерінде ОҚБТ-ң шартты белгісі мен типтік конструкциясы келтірілген. ОҚБТ жұмысын статикалық коллекторлық сипаттамалар (13.28-сурет) айқындайды.

Ауданы 6 см² дейінгі бір кристалда транзисторлық құрылымдардың көп мөлшерін (1 см²-де бірнеше миллионға дейін) параллель жалғау және кристалдарды тізбектей және параллель жалғау ОҚБТ модульдерінде пайдаланылады. ОҚБТ модульдері 2400 А дейінгі токтарға, 6500 В дейінгі коммутацияланатын кернеулерге, және 150 кГц дейінгі ауыстыру жиілігіне арналып шығарылады.

ОҚБТ кемшіліктеріне олардың коллектор мен эмиттердің арасындағы артық кернеулерге және ток бойынша артық жүктемелерге сезімталдығы жатады.

Оқшауланған бекітпелі далалық транзисторларда, яғни МДЖ-транзисторлар мен олардың негізіндегі модульдерде ОҚБТ-мен салыстырғанда ток (200 А дейін) пен коммутацияланатын кернеу мәндері (400 В дейін) төмен болады, бірақ ауыстыру жиіліктері (1

МГц дейін) жоғары және кедергілері қосулы күйде төмен (10^{-3} Ом дейін) болады.

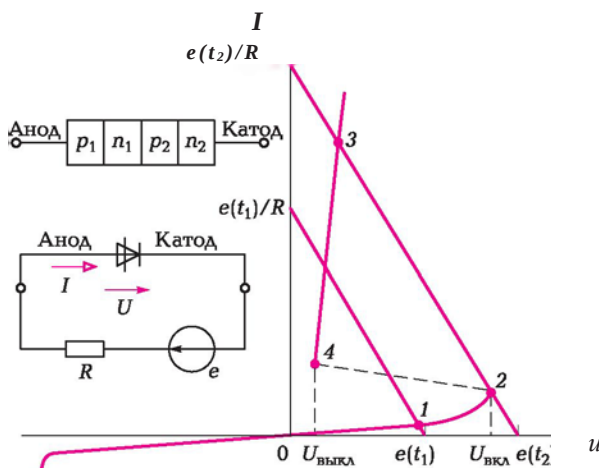
Төмен басқару қуаты энергетикалық электроника үшін бір кристалда күш элементтері орналастырылатын, толық басқарылатын транзисторлық кілттер, оларды қосу, ажырату және қорғау схемаларын, сондай-ақ жүктемені тексеру, басқару және реттеу схемаларын жасауға мүмкіндік береді. Мұндай транзисторлық кілттер *зерделі кілттер* (IPM— intelligent power module) деп аталады.

13.7. ТИРИСТОРЛАР

Тиристор — екі тұрақты күйі және жабық күйден ашық күйге, сондай-ақ керісінше ауыса алатын үш не одан көп тізбектей қосылған p - n -өткелдері жартылай өткізгіш аспап. Тиристордың p -және n -типті жартылай өткізгіштердің кезек-кезек төрт қабаты бар құрылымы ең кең таралған (13.29-сурет).

Тиристорлар басқарылатын не триодтық және басқарылмайтын не диодтық болып бөлінеді.

Диодтық тиристордың екі шықпасы болады — анодтық және катодтық. Оны айнымалы ток тізбегінде бір тұрақты күйден екіншісіне ауыстыру жүктемелік сипаттама әдісімен анықталады (2.32-суретті қараңыз). Осы жерде және одан әрі тиристорлардың



13.29-сурет