Азәрбајчан Республикасы Тәһсил Назирлији

Азәрбајчан Дөвләт Нефт Академијасы

Р.Т.Һүмбәтов

БӘРКЧИСМЛИ ЕЛЕКТРОНИКА

Дәрс вәсаити

Азәрбајчан Республикасынын
Тәһсил Назирлији тәсдиг
етмишдир.
Әмр №732, 30.09.1999-чу ил

Бакы - 2000

УОЧТ - 621.38 (075.8)
ИБ - 0895

621.3
1192

Тәртиб едән: професcор Р.Т.Һүмбәтов. Бәркчисмли електроника. Дәрс вәсаити, Бакы.: Азәрб.ДНА-нын нәшри, 2000, сәһ. 172

Шәкил 87, әдәбијјат 15.

Дәрс вәсаитиндә јарымкечиричи материаллар, онлардан һазырланмыш чиһазларын физики әсаслары һаггында гыса мә'лумат верилир, бу чиһазларын ән кениш јајылмыш нөвләринин: диодларын, транзисторларын, тиристорларын, фотоелектрон вә оптоелектрон чиһазларын гурулушу, иш принсипи изаһ едилир, онларын әсас характеристикалары, параметрләри вә тәтбиг саһәләри шәрһ едилир.

Јарымкечиричи вә һибрид интеграл микросхемләрдә актив вә пассив елементләрин һазырланма технолокијасы гыса шәкилдә изаһ едилир.

Вәсаит али мәктәбләрин вә техникумларын "Електрон техникасы", "Автоматика вә идарәетмә", "Електротехника" истигамәтләри үзрә тәһсил алан тәләбәләри үчүн нәзәрдә тутулмушдур.

Редактору: досент А.М.Әлијев

Рә'ј верәнләр: досент Ф.Һ.Ағајев (АДНА), досент
М.Б.Намазов (АзТУ)

246276

Б.Д.У-нун
Елми
китабханасы

КИРИШ

Електроника елм вә техниканын инсан фәалиjjәтинин һәр бир саһәси илә билаваситә әлагәси олан мүасир истигамәтләриндән биридир. Она көрә дә електрониканыны әсасларынын бу вә ја дикәр һәчмдә өјрәнилмәси техники ихтисасларын чохунун тәдрис планларында нәзәрдә тутулмушдур.

Електрон чиһазларыны бири-бириндән фәргләндирмәjә имкан верән амилләрдән бири ишчи мүһитин характеридир. Чүнки мәһз бу амил чиһазларда баш верән физики просесләри фәргләндирир.

Бу дәрс вәсаитиндә јалныз бәркчисмли електрон чиһазларынын әсас нүмајәндәләри һаггында мә'луматлар чәм олунмушдур. Бунлара јарымкечиричи материаллар әсасында мүхтәлиф технолокиjалар үзрә һазырланан дискрет чиһазлар (диодлар, транзисторлар, тиристорлар, параметрик елементләр) вә интеграл микросхемләр аиддир.

Вәсаитин илк бөлмәләриндә бәрк чисмин зона нәзәриjjәсинин әсаслары һаггында гыса мә'лумат верилир вә јарымкечиричиләр електроникасынын әсасыны тәшкил едән физики просесләр арашдырылыр. Даһа сонра јарымкечиричи електрон чиһазларынын әсасыны тәшкил едән електрон-дешик кечидиндә баш верән просесләр шәрһ едилир, кечидләрин дикәр нөвләринин хүсусиjjәтләри һаггында гыса мә'лумат верилир. Бу мә'луматлар бу чүр кечидләр үзәриндә гурулмуш мүхтәлиф тә'јинатлы чиһазларын өјрәнилмәсини асанлашдырыр.

Һәмин чиһазлара јарымкечиричи диодларын типик нүмајәндәләри, биполјар вә униполјар транзисторлар, тиристорлар, фототранзисторлар, фотошүаландырычы вә фотошүагәбуледичи чиһазлар, онларын комбинасиjасындан јаранмыш оптоелектрон чүтләри, јарымкечиричи параметрик елементләр (фоторезисторлар, варисторлар, терморезисторлар вә с.) аиддирләр.

Електрон техникасы чох бөјүк сүр'әтлә мүкәммәлләшдирилдиjинә көрә мүасир електрон гурғуларында истифадә едилән вә ја јахын кәләчәкдә истифадә олуначаг чиһазларын һамысынын өјрәнилмәси бөјүк чәтинлик јарадыр. Чүнки онлар һаггында мә'луматлары јалныз стандартлардан, сорғу китабларындан, хидмәти тә'лиматлардан көтүрмәк мүмкүндүр.

Она көрә дә електрониканын тәдрисиндә тәләбәләрә чиһазларын ишинин әсасыны тәшкил едән әсас мүддәалары мәнимсәмәк, чиһазларын инкишаф динамикасыны вә онларын практики тәтбиг имканларыны өјрәнмәк вачибдир.

Методик бахымдан електрон техникасынын әсасынын өјрәнилмәсиндә типиклик принсипини рәһбәр тутмаг мәгсәдәујғундур. Бу принсипә көрә елекрон чиһазларынын бүтүн нөвләринин өјрәнилмәси әвәзинә бу гәбилдән олан чиһазларын характерик әламәтләри дәриндән арашдырылыр вә ејни заманда бу вә ја дикәр чиһазларын ишинин әсасларыны тәшкил едән нәзәри мүддәалар өјрәнилир.

Мүхтәлиф тә'јинатлы електрон чиһазларынын һәр бири һаггында әсасән онлар үчүн характерик олан ашағыдакы мә'луматлар верилмишдир:

1) чиһазын гурулушу вә енержини чевирмә имканлары;
2) чиһазын схемләрдәки шәрти ишарәси;
3) чиһазын дөврәјә гошулма схеми;
4) чиһазын иш принсипи (баш верән просесләрин физики әсаслары);
5) чиһазын характерик хүсусијјәтләри;
6) чиһазын статик характеристикалары;
7) чиһазын номинал вә һүдуд режим параметрләри;
8) чиһазын тәтбиг саһәси.

Чиһазлар өјрәниләркән һеч дә бүтүн материалын шәртсиз јадда сахланылмасы вачиб дејилдир, чүнки мә'луматларын бир чоху тәләбәләрә үмуми тәсәввүр вермәк вә онларын техники мәдәнијјәтини артырмаг үчүндүр.

Лакин һәр мөвзу дахилиндә јадда сахланылмасы вачиб олан бир сыра мә'луматлар да верилмишдир. Мәсәлән, електрон нәзәријјәсини өјрәнәркән, електронун сүр'әтини, ишығын сүр'әтини, чиһазлары өјрәнәркән онларын шәрти ишарәләрини, характеристикаларынын көрүнүшүнү билмәк, чиһазларда кедән физики просесләрин маһијјәтини исә баша дүшмәк лазымдыр.

Вәсаитин сонунчу бөлмәси микроелектрон гурғуларына һәср олунмушдур. Бурада електрониканын ән динамик инкишаф едән саһәсинин-микроелектрониканын әсас елементләри һаггында мә'лумат верилир, јарымкечиричи вә һибрид интеграл

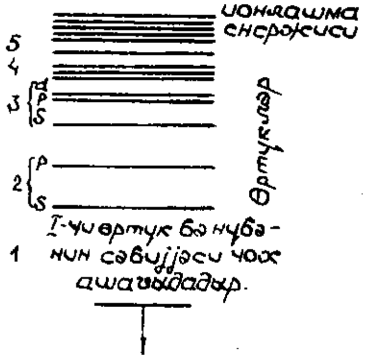
микросхемләрин актив вә пассив елементләринин һазырланма технолокиіалары арашдырылыр.

1. ЈАРЫМКЕЧИРИЧИЛӘР ЕЛЕКТРОНИКАСЫНЫН ӘСАСЛАРЫ

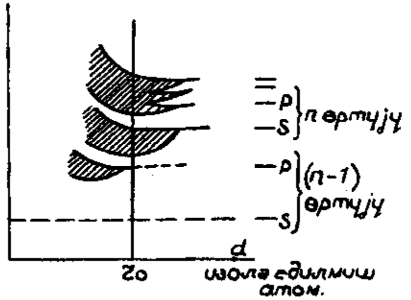
1.1. Бәрк чисмин зона нәзәријјәсинин әсаслары. Енержи зоналары

Зона нәзәријјәси јарымкечиричиләрин кәмијјәтчә тәһлилинин әсасыны тәшкил едир. Һәр һансы изолә олунмуш атом електронлар үчүн ичазә верилмиш дискрет енержи спектри илә характеризә олунур (шәкил 1.1). Енержинин гијмәти артдыгча ардычыл јерләшмиш енержи сәвијјәләри арасында мәсафәләр азалыр. Енержи спектринин "таваны" ионлашма сәвијјәсидир ки, бу сәвијјәдә електрон сәрбәст олур вә атому тәрк едә билир. Долу сәвијјәләр атомун електрон өртүјүнү тәшкил едир вә онлары 1,2,3... рәгәмләри илә ишарә едирләр. Икинчидән башлајараг өртүкләр алт өртүкләрә ($2_s,2_p,3_s,3_p,4_s,4_p$) бөлүнүр. Електронла долу өртүкләрин вә алт өртүкләрин сајы елементин сыра нөмрәсиндән асылы олур. Һәјәчанланмамыш атомда харичи сәвијјәләр һәмишә бош олурлар. Бәрк чисимдә атомлараарасы мәсафәләр чох кичик олдуғундан чисмин атомлары бир-бирилә гүввәтли гаршылыглы тә'сирдә олурлар. Бәрк чисмин һәр һансы бир һиссәсиндә бүтүн атомлар топлусуну бир ваһид ири молекул кими тәсвир етмәк олар. Бу молекул да атом кими бүтөв чисим үчүн ваһид олан һәр һансы бир енержи спектри илә характеризә олунур. Бу спектрин хүсусијјәти ондадыр ки, о дискрет ичазә верилмиш зоналардан ибарәт олур. Һәр бир зонанын мәншәји ујғун атом сәвијјәсидир ки, бу сәвијјә дә бөјүтмәк атомлар бир-биринә јахынлашанда елә бил ки, парчаланыр (шәкил 1.2).

Беләликлә, атомлараарасы мәсафәси r_0 олан кристал үчүн мүәјјән зона диаграмы әлдә едилир. Бу диаграмда ичазә верилмиш зоналарын ардынча гадаған олунмуш зоналар кәлир (шәкил 1.3). Бу зоналарын ени бир нечә електронволт (еВ) һәддиндә олур вә бәрк чисимдә атомларын сајындан (чисмин өлчүләриндән) асылы олмур.



Шәкил 1.1. Изолә олунмуш атомун енержи сәвијјәси



Шәкил 1.2. Ајрыча атомун ичазә верилмиш енержи сәвијјәсинин чисмин ичазә верилмиш енержи сәвијјәсинә чеврилмәси

Ичазә верилмиш зоналар дискрет структура малик олурлар вә онларда сәвијјәләринин сајы чисимдәки атомларын сајына бәрабәрдир. Һәр һансы бир кичик һәчмдә атомларын сајы о гәдәр бөјүкдүр ки, реал шәраитдә зоналарын сәвијјәләри арасындакы енеркетик сәвијјәләр 10^{-17}еВ-дан јүксәк олмур. Она көрә дә ичазә верилмиш зоналарын бүтөв олдуғуну гәбул етмәк олар.

Атомун алчаг енержи сәвијјәләри адәтән зона тәшкил етмир, чүнки дахили електрон өртүкләринин бәрк чисимдә гаршылыглы тә'сири чох зәифдир (онлар харичи өртүкләр тәрәфиндән "екранлашмышлар"-араланмышлар). Буна көрә алчаг сәвијјәләр зона диаграмында пунктирләрлә көстәрилир вә һәр пунктир бир атома ујғун кәлир (шәкил 1.2).

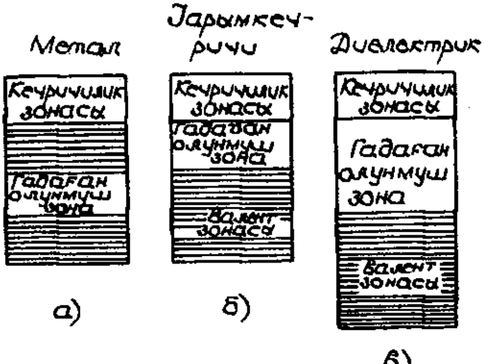
Бир чох һалларда ичазә верилмиш зоналар бир-биринин үзәринә дүшүр вә бу һалда онларын арасында гадаған олунмуш зона мөвчуд олмур. Бу јалныз спектрин јухары һиссәсиндә баш верир, чүнки ајрыча атомда јухары сәвијјәләр бир-биринә чох јахын јерләшир. Бунун нәтичәсиндә бәрк чисмин енержи спектри ваһид јухары зонаја вә һәр һансы бир сонлу сајда (сәвијјәләрин сајындан фәргли олараг) зоналара малик олур.

Бәрк чисимдә кечиричилик о вахт јараныр ки, електрон даһа јүксәк гоншу енержи сәвијјәсинә кечә билсин. Демәли, кечиричиликдә јалныз азад сәвијјәләри олан зоналарын електронлары иштирак едә биләр. Белә азад зоналар јухары ичазә верилмиш зоналарда һәмишә мөвчуд олурлар, чүнки изолә едилмиш атомда јүксәк сәвијјәләр һеч вахт долу олмур.

Она көрә бәрк чисмин мүтләг сыфыр температурда електронларла тутулмајан (вә ја там тутулмајан) зонасына кечиричилик зонасы дејилир. Бу зонаја ән јахын јерләшән зонаја валент зонасы дејилир. Мүтләг сыфыр температурда валент зонасы тамамилә електронларла долу олур вә бу зонанын електронлары кечичириликдә иштирак етмир.

Ашағыда көрәчәјик ки, сыфырдан фәргли температурда валент зонасында азад сәвијјәләр јарана биләр вә бу исә кечиричилијин дәјишмә-синә сәбәб ола биләр. Беләликлә кристалын кечиричилијини ики гоншу зона (валент вә кечиричилик) мүәјјән едир.

Сыфыр температурда бәрк чисмин зона структуру металларын, јарымкечиричиләрин вә диелектрикләрин тәснифатынын әсасыны тәшкил едир (шәкил 1.3). Металларда кечиричилик вә валент зоналары үст-үстә дүшүр вә она көрә сыфыр температурда кечиричилик зонасында мүәјјән сајда електрон олур ки, бу да кечиричилик әмәлә кәтирир. Јарымкечиричиләрдә вә диелектрикләрдә һәмин температурда кечиричилик зонасы бош олур вә кечиричилик јаранмыр.



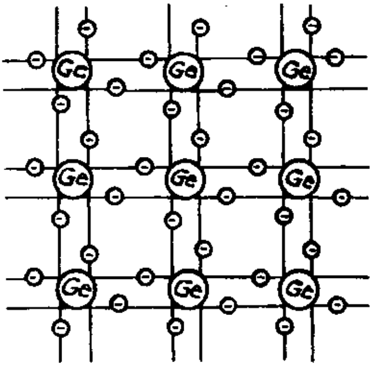
Шәкил 1.3. Метал (а), јарымкечиричи (б) вә диелектрикин (в) $T=0^0K$-дә зона структуру

Диелектрикләрлә јарымкечиричиләрин фәрги ондадыр ки, диелектрикләр-

дә гадаған олунмуш зонанын ени даһа бөјүкдүр. Кечиричилик зонасы демәк олар ки, бүтөв гәбул едилдијиндән бурада електронларын енержиси вакуумда изолә олунмуш електронунку кими арамсыз дәјишә биләр. Она көрә кечиричилик зонасындакы електронлара сәрбәст електронлар дејилир. Сәрбәстлик бу һалда јалныз чисмин дахилиндә јердәјишмә имканыны нәзәрдә тутур.

1.2. Јарымкечиричи материаллар һаггында мә'лумат

Јарымкечиричиләр хүсуси електрик мүгавимәтинин гијмәтинә көрә ($\rho=10^{-4}$-10^{10}Ом·см) кечиричиләр ($\rho=10^{-6}$-10^{-4}Ом·см) вә диелектрикләр ($\rho=10^{10}$-10^{15}Ом·см) арасында хүсуси јер тутурлар. Ону да гејд етмәк лазымдыр ки, бу сәрһәдләр шәрти характер дашыјыр, конкрет шәраитдән асылы олараг, мәсәлән, јүксәк температурда, диелектрик өзүнү јарымкечиричи кими олараг биләр вә с.



Шәкил 1.4. Кеманиумун тетраедрик кристал гәфәсәсинин атомларын валент әлагәләрини көстәрән "мүстәви" еквиваленти

Јарымкечиричиләрдә чәрәјанын ахмасы механизми диелектрикләрдәкинә јахындыр вә кејфијјәтчә кечиричиләрдәкиндән фәргләнир. Јарымкечиричиләрә хас олан хүсусијјәтләрдән бири одур ки, онларын хүсуси кечиричилији електрик саһәсинин, ишыг шүасынын, истилијин вә ашгарларын әлавә едилмәсинин тә'сири алтында дәјишир.

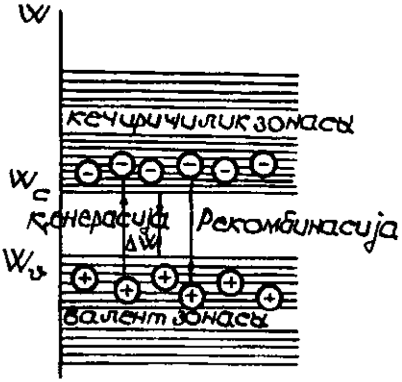
Ән кениш јајылмыш јарымкечиричи материаллар дөври системин IV групуна аид олан кеманиум (Ge) вә силисиумдур (Si). Бунлардан башга селен (Se), галлиум арсенид (GaAs), галлиум

фосфид (GaP), силисиум карбид (SiC) вә башгалары да кениш истифадә олунур. Јарымкечиричинин, мәсәлән керманиумун, кристал гәфәсәси елементар тетраедрләрдән тәшкил олунур. Тетраедрләрин тәпәләриндә вә мәркәзиндә јерләшән атомлар бири-бири илә ики електронла ковалент әлагәдә олур. Бу әлагәни јарадан електронларын һәрәси бир нөв ики атома аид олур (шәкил 1.4.). Нүвәләрин мүсбәт јүкү електронларын јүкү илә компенсасија едилир вә кристал үмумиjјәтлә нејтрал олур.

Мүтләг сыфыр температурда електронларын һамысы атомларла әлагәдә олур, јүк дашымасында иштирак етмир вә кристал өзүнү диелектрик кими апарыр. Мүгајисә үчүн гејд едәк ки, бу температурда металларын мүгавимәти сыфра дүшүр.

1.2.1. Јарымкечиричинин мәхсуси кечиричилији

Јарымкечиричиләрдә електрик кечиричилији механизми бәрк чисмин зона нәзәријјәсинә әсасән изаһ едилә биләр. Дејилдији кими, мүтләг сыфыр температурда вә һеч бир ашгар олмајанда бүтүн електронлар атомлararасы әлагәдә иштирак едирләр. Бу о демәкдир ки, валент зонасындакы бүтүн енержи сәвијјәләри електронларла долудур, кечиричилик зонасы исә бошдур. Ики зона арасындакы гадаған олунмуш зонанын ени керманиум үчүн ΔW=0,7еВ, силисиум үчүн исә ΔW=1,12еВ тәшкил едир. Електронун атомла әлагәсинин гырылмаг вә онун сәрбәст јүкдашыјычысына чеврилмәси үчүн о, кечиричилик зонасына дүшмәлидир. Бунун үчүн електрона ΔW-јә бәрабәр вә ја ондан чох әлавә енержи верилмәлидир.



Шәкил 1.5. Мәхсуси јарымкечиричинин зона диаграмы

Температур мүтләг сыфырдан јухары галхдыгча електронларын бир һиссәси әлавә енержи алдығындан ковалент әлагәләри гырараг, валент зонасындакы енержи сәвијјәсини тәрк едәрәк кечиричилик зонасына кечирләр (шәкил 1.5). Нәтичәдә кечиричилик зонасында сәрбәст електронлар јараныр ки, бунлара да кечиричилик елекронлары дејилир. Валент зонасында әмәлә кәлмиш бош јерләрә дешик (кечиричилик дешији) дејилир. Дешикләр електрик вә магнит саһәләриндә өзләрини јүкү елек-тронун јүкүнә бәрабәр мүсбәт јүклү һиссәчикләр кими апарырлар.

Кристалда бу чүр електрон-дешик чүтүнүн јаранмасы просесинә јүк дашыјычыларынын кенерасијасы дејилир.

Истилик енержисинин тә'сириндән електронлар кечиричилик зонасында, дешикләр исә валент зонасында хаотик һәрәкәт едирләр (һәгигәтдә исә дешикләрин һәрәкәти електронларын бир бош сәвијјәдән дикәринә кечмәси илә әлагәдардыр, дешикләр өзләри һәрәкәт етмирләр). Бу һәрәкәтләр нәтичәсиндә електронларын бир һиссәси изафи енержисини итирәрәк, кечиричилик зонасындан валент зонасына гајыдараг орадакы бош сәвијјәләри тутурлар.

Бу, електрон-дешик чүтүнүн јох олмасына кәтириб чыхарыр вә бу просесә јүк дашыјычылырынын рекомбинасијасы дејилир. Әкәр кристала харичи електрик саһәси тә'сир етсә, онун тә'сириндән електронларын вә дешикләрин һәрәкәтләри истигамәтләнир: електронлар саһә гүввә хәтләринә гаршы, дешикләр исә гоншу атомларын валент електронлары илә тутулдугларындан сычрајышларла саһә гүввә хәтләри истигамәтиндә һәрәкәт едирләр.

Температурун сабит гијмәтиндә кристалын 1см^3 һәчминдә електронларын вә дешикләрин сајына јүкдашыјычыларынын таразлыг консентрасијасы дејилир. Бу консентрасија термокенерасија вә рекомбинасија просесләри арасындакы термодинамики таразлыгла мүәјјән едилир. Електронларын мүвазинәт консентрасијасы n_0, дешикләринки исә p_0-ла ишарә едилир.

Кристалын кечиричилији һәр ики нөв јүк дашыјычылары-нын һәрәкәти илә мүәјјән олунур вә електрон-дешик кенерасијасы просесинин интенсивлијиндән асылы олур. Там чәрәјан сыхлығы електрон вә дешик кечиричилији илә мүәјјән олунан чәрәјанларын сыхлығынын чәминә бәрабәрдир: $J=J_p+J_n$.

Белә ашгары олмајан јарымкечиричи мәхсуси вә ја i типли јарымкечиричи, онун кечиричилији исә мәхсуси кечиричилик адланыр.

Мүвафиг олараг електрон вә дешик кечиричилији белә тә'јин олунур:

$$\sigma_e = q\cdot\mu_n\cdot n; \ \sigma_\partial=q\cdot\mu_p\cdot P$$

Бурада μ_n-електронларын дүјүнлүјү (һәндәси дүз керманиум үчүн 25^0С-дә 3500см^2/Всан); μ_p-дешикләрин јүрүклүјүдүр (керманиум үчүн 1700см^2/Всан). Јүрүклүк 1В/см саһә кәркинлијиндә јүклү һиссәчикләрин истигамәтләнмиш сүр'әтинә дејилир. Бу сүр'әт онларын сәрбәст гачыш мүддәтинә мүтәнасибдир: $\mu=t_{сәрб}=l_{ор}/\upsilon_{ор}$; $l_{ор}\approx1/T$ јолун орта узунлуғу, $v_{ор}$-орта истилик сүр'әтидир $v_{ор}\approx\sqrt{T}$); n-кечиричилик зонасында електронларын консентрасијасы; Р-валент зонасында дешикләрин консентрасијасы; q-електронун јүкүдүр.

Температурун һәр бир гијмәти үчүн мәхсуси јарымкечиричидә сәрбәст електронларын вә дешикләрин консентрасијасы бәрабәр олур: $n_i = p_i$.

Ики кечиричилијин чәми мәхсуси кечиричилијә бәрабәрдир:

$$\sigma=q(\mu_e\cdot n + \cdot\mu_p\cdot p)=q\cdot\mu_{ек}\cdot n_I$$

$\mu_{ек}$-јүк дашыјычыларынын еквивалент јүрүклүјүдүр.

Бәс јарымкечиричинин мүгавимәти (кечиричилији) температурун тә'сириндән нечә дәјишир?

Температур артдыгча атомларын истиликдән һәјәчанланмасы артыр вә әмәлә кәлән һәр ики типли јүкдашыјычыларынын сајы чохалыр. Бунунла әлагәдар олараг рекомбинасија еһтималы да јүксәлир вә бу ики просесин гаршылыглы

тә'сириндән динамик таразлыг јаранып. Таразлыг һалында олур. Бурада *A*-физики сабитләри ифадә едән әмсал, *k*-Болсман сабитидир.

Јүкдашыјычыларынын еквивалент јүрүклүјү температурдан асылы олур вә бу асылылыг тәхминән белә ифадә олунур:

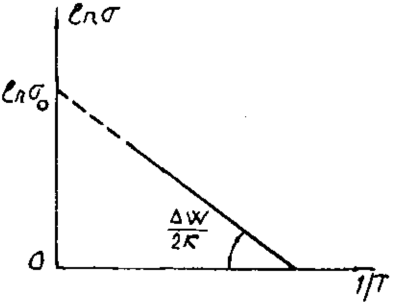
$$\mu_{ек} = \mu_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{3/2}$$

μ_0-отаг температурундакы (T) јүрүклүкдүр.

Буну нәзәрә алмагла кечиричилији тә'јин едәк:

$$\sigma = qAT^{3/2} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}} \mu_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{3/2} \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}$$

σ_0 – $T = \infty$, јә'ни бүтүн ковалент әлагәләрин гырылдығы һалда јарымкечиричинин кечиричилијидир. Бурадан асанлыгла $\ln\sigma = \ln\sigma_0 - \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}$ ала биләрик.



Шәкил 1.6. Мәхсуси кечиричилијин температурдан асылылығы

Көрүндүјү кими температур артдыгча јарымкечиричинин кечиричилији артыр (металларда азалыр). Кечиричилијин температурдан асылылығы шәкил 1.6.-да көстәрилмишдир.

Дүз хәттин маиллији $\Delta W/2k$ бучаг әмсалы илә мүәјјән едилир. Бу әмсалы өлчмәклә гадаған олунмуш зонанын енини һесабламаг олар.

1.2.2. Јарымкечиричинин ашгар кечиричилији

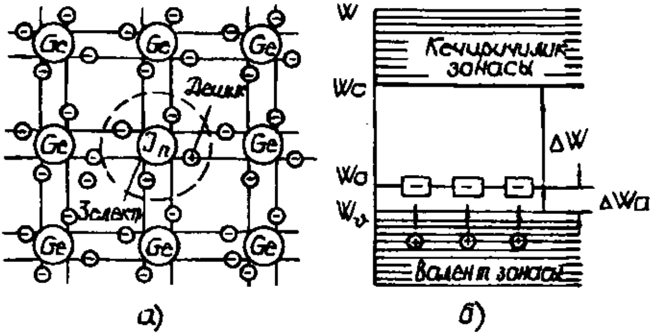
Јарымкечиричи чиһазларын иши бир гајда олараг ашгар кечиричилији һадисәсинә әсасланыр.

Әкәр јарымкечиричи материалын тәркибиндә азачыг да олса ашгар оларса, јарымкечиричинин кечиричилији кәскин дәјишә биләр. Мәсәлән, керманиум кристалына $10^{-5}\%$ арсен әлавә едиләрсә, онун мүгавимәти 200 дәфә азалар (кечиричилији артар).

Керманиум вә силисиум үчүн ашгар ролуну 3 валентли алүминиум, галлиум, индиум вә 5 валентли фосфор, арсен вә сүрмә ојнаја биләр.

Ашгар әлавә едиләркән бу елементләрин атомлары керманиум вә силисиум атомларыны кристал гәфәсиндә әвәз едирләр. Онларын валент електронлары әсас кристалын ичазә верилмиш енержи зоналарынын сәрһәддиндән јухары енержи сәвијјәләринә малик олурлар. Она көрә дә гадаған олунмуш зонада әлавә енержи зоналары әмәлә кәлир. Ашгарлар јарымкечиричинин електрик хәссәләрини мүхтәлиф чүр дәјиширләр.

Әкәр керманиума ашгар кими 5-валентли арсен әлавә едиләрсә, о, керманиумун гоншулугда јерләшән дөрд атому илә ковалент әлагә јарадар, онун 5-чи електрону артыг (сәрбәст) галар (шәкил 1.7*а*) вә о кечиричилијин јаранмасында иштирак едә биләр. Бу һалда кечиричилик зонасынын ашағы һиссәсинин јахынлығында әлавә енержи сәвијјәси-донор сәвијјәси $W_д$ јараныр (шәкил 1.7*б*).



а) *б*)

Шәкил 1.7. 3-валентли ашгар атомунун кристал гәфәсәсиндә керманиум атомуну әвәз етмәси (*а*) вә гадаған олунмуш зонада акцептор сәвијјәсинин јаран-масы (*б*)

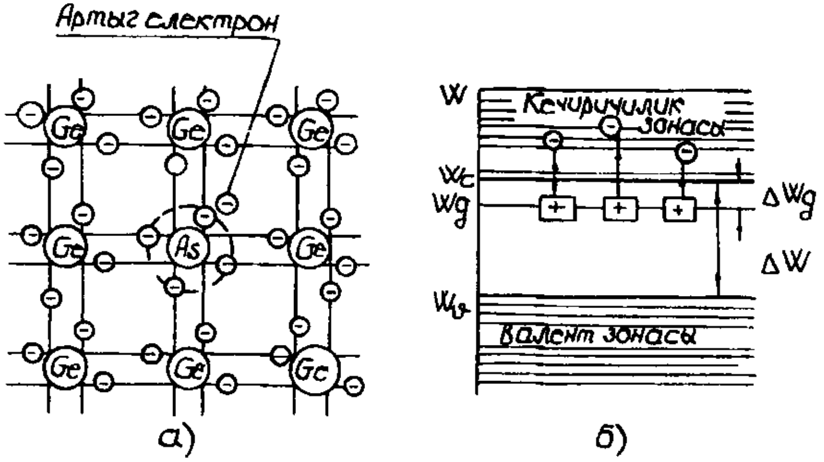
Арсен үчүн гадаған олунмуш зонанын ени $\Delta W_{d}=W_{c}-W_{d}=0,1eB$ олур. Она көрә нормал отаг температурунда әксәр ашгар атомлары ионлаша билир. Ионлашма заманы електрон кристалы тәрк етмәдијиндән јарымкечиричи нејтрал галыр. Беләликлә, әлавә едилән ашгар кристалын кечиричилик зонасында електрон артыглығы јарадыр. Белә ашгара донор ашгары дејилир, бу чүр ашгары олан кристал исә *n* типли јарымкечиричи адланыр (''negative'' сөзүндәндир).

Белә јарымкечиричидә кристал гәфәсәсинин ашгар атому тәрәфиндән тутулмуш учларында һәрәкәтсиз мүсбәт јүклү ионлар јерләшир, кристалын ичәрисиндә исә кечиричилик зонасынын енержиси гәдәр енержијә малик олан сәрбәст електронлар һәрәкәт едирләр. Әкәр азад олмуш електронлар ионларын јахынлығында галырса, онда микроһәчм електрик чәһәтчә нејтрал олур. Електрон микроһәчми тәрк едәрсә, орада мүсбәт фәза јүкү јараныр.

Әкәр кристала ашгар кими 5-валентли елемент әлавә едиләрсә, електронларын сајы дешикләрдән чох олур, чүнки дешикләрин сајы ашгар әлавә едиләндән габаг олдуғу кими мәхсуси кечиричиликлә мүәјјән едилир. n типли јарымкечиричидә електронлар әсас, дешикләр исә гејри-әсас јүк дашыјычылары һесаб олунурлар.

Әкәр керманиума ашгар кими 3 валентли индиум әлавә едиләрсә, индиумун атомлары кристал гәфәсәсинин учларында керманиум атомларыны әвәз едәрләр. Бу һалда 3-валентли индиум атомуна бүтүн дөрд гоншу керманиум атомлары илә ковалент әлагәләри јаратмаг үчүн бир електрон чатышмыр. Бу о демәкдир ки, атомлар арасы әлагәдә вә ја валент зонасында бош јер – дешик вардыр (шәкил 1.8*а*). Она көрә дә валент зонасында бу һалда артыг дешикләр әмәлә кәлир. Һәмин дешикләр асанлыгла гоншу керманиум атомларынын електронлары илә тутулдуғундан индиум атомлары мәнфи ионлара чеврилирләр. Гадаған едилмиш зонада валент зонасынын јухары сәрһәддинин јахынлығында енержи сәвијјәләри-акцептор сәвијјәләри W_a јараныр (шәкил 1.8*б*). Индиум үчүн гадаған олунмуш

зонанын ени $\Delta W_a = W_c - W_v = 0,16eB$ олдуғундан отаг температурунда бу азад енержи сәвијјәләри асанлыгла електронларла тутулур, валент зонасында исә бош сәвијјәләр – дешикләр әмәлә кәлир.



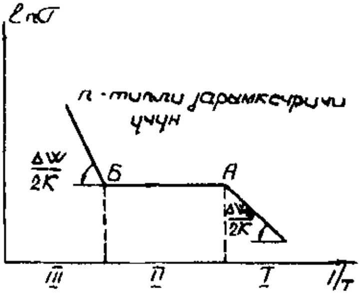
Шәкил 1.8. 5-валентли ашгар атомунун кристал гәфәсиндә керманиум атомуну әвәз етмәси (*а*) вә гадаған олунмуш зонада донор сәвијјәсинин јаранмасы (*б*)

Үчвалентли ашгар әлавә едиләндә кристалда дешикләрин сајы електронлардан чох олур. Бу һалда јарымкечиричидә дешик кечиричилији үстүнлүк тәшкил едир, чүнки електронларын сајы әввәлки кими мәхсуси кечиричиликлә мүәјјән едилир. Белә јарымкечиричидә дешикләр әсас, електронлар исә гејри-әсас јүкдашыјычылары һесаб едилир. Белә артыг дешикләр әмәлә кәтирән ашгара "аксептор", јарымкечичирријә исә *p* типли ("positive" сөзүндән) јарымкечиричи дејилир. Ашгарлы јарымкечиричиләрдә әсас јүкдашыјычыларынын бир һиссәси гејри-әсас јүкдашыјычылары илә рекомбинасија едир. Әсас јүкдашыјычыларынын консентрасијасы артдыгча белә рекомбинасија һадисәләринин еһтималы да артыр. Она көрә дә гејри-әсас јүкдашыјычыларынын консентрасијасы һәмишә ашағы олур.

Инди исə јарымкечиричи кристала нə гəдəр ашгар əлавə едилдијини бир мисалла араштдыраг.

Керманиумун 1см^3 һəчминдə 10^{22} атом олур вə 20^0С-дə 10^{13} сəрбəст електрон вə о гəдəр дə дешик əмəлə кəлир. Көрүнүр ки, јүкдашыјычыларынын сајы атомларын сајынын милјон вə милјардда бир фаизини тəшкил едир. (Гејд едəк ки,металларда сəрбəст електронларын сајы атомларын сајына јахындыр). Јарымкечиричидə ашгар кечиричилијинин үстүнлүк тəшкил етмəси үчүн 1см^3 һəчмдəки ашгар атомларынын сајы мəхсуси јүк дашыјычыларынын сајындан чох олмалыдыр. Мəсəлəн, керманиум үчүн 20^0С-дə ашгар атомларынын сајы 1см^3 һəчмдə 10^{13}-дəн чох олмалыдыр. Бу о демəкдир ки, керманиум милјард атомуна гаршы бир ашгар атому əлавə олмалыдыр. Буна бахмајараг, јарымкечиричинин кечиричилијинин характери вə гијмəти кəскин дəјишир.

Ашгарлы јарымкечиричидə $n \cdot p = n^2$ шəрти өдəнир. Рекомбинасија нəтичəсиндə гејри-əсас јүк дашыјычыларынын сајынын n_i-дəн аз олмасына бахмајараг, ашгарлы јарымкечиричидə јүкдашыјычыларынын үмуми сајы мəхсуси јарымкечиричидəкиндəн ($2n_i$) чох олур. Бу исə ашгарлы јарымкечиричинин мүгавимəтинин азалмасына кəтириб чыхарыр.



Шəкил 1.9. Ашгарлы јарымкечиричинин кечиричилијинин температурдан асылылығы

Ашгарын əлавə олунмасы кечиричилијин температурдан асылылығынын да дəјишмəсинə сəбəб олур (шəкил 1.9).

Əјридə I саһə алчаг температурлар үчүн характерикдир. Бурада кристал гəфəсəсинин рəгслəринин енержиси ΔW_∂-дəн чох, ΔW-дəн аздыр. Бу температурларда анчаг тəк-тəк (јүксəк енержиси олан) електронлар валент зонасындан кечиричилик зонасына кечə билəрлəр. Буна көрə I саһəдə мəхсуси кечиричиликлə əлагəдар олан кечиричилик

Елми китабханасы

донор сәвијјәсиндән кечиричилик зонасына кечән електронлар-ла мүәјјән едилир. "А" нөгтәси о температура аиддир ки, онда бүтүн ашгар електронлары кечиричилик зонасына кечмишдир, анчаг кристал гәфәсәсинин учларынын рәгс енержиси һәлә дә електронлары валент зонасына кечирмәк үчүн кифајәт дејил. Она көрә температурун мүәјјән диапазонунда (II саһә) електронларын консентрасијасы (кечиричилик) сабит олур. "Б" нөгтәсиндә гәфәсәнин учларынын рәгс енержиси ΔW-дән чох олур вә III саһәдә мәхсуси кечиричилик механизми үстүнлүк тәшкил етмәјә башлајыр. Бахылан асылылыг n типли јарымкечиричи үчүн чәкилмишдир.

1.3. Електронларын јарымкечиричиләрдә пајланмасы вә һәрәкәт етмәси ганунлары

Бәрк чисимдә ичазә верилмиш зоналарын һүндүрлүјү бојунча енержи сәвијјәләри бәрабәр пајланмыр: онларын сыхлығы гадаған олунмуш зонанын сәрһәддиндән кечиричилик вә валент зоналарынын ичәрисинә доғру дәјишир. Belә ки, W енержиси олан һәр бир сәвијјәјә мүәјјән P(W) ујғун кәлир. P(W) бәрк чисмин ваһид һәчминә вә ваһид енержијә ујғун кәлән сәвијјәләрин сајыдыр.

Електронун бу вә ја дикәр енержи сәвијјәсини тутмасы еһтималы Ферми-Дирак пајланма функсијасы илә ифадә олунур:

$$f_n(\varphi) = \frac{1}{e^{\frac{\varphi - \varphi_F}{\varphi_T}} + 1}$$

Електронун бу вә ја дикәр енержи сәвијјәсини тутмамасы еһтималы бу сәвијјәнин дешиклә тутулма еһтималына бәрабәрдир:

$$f_n(\varphi) = 1 - f_n(\varphi) = \frac{1}{e^{\frac{\varphi_F - \varphi}{\varphi_T}} + 1}$$

Бурада φ_F - Ферми сәвијјәси адланан сәвијјәјә ујғун потенсиалдыр (Ферми потенсиалы). Ферми енержиси елә сәвијјәјә ујғундур ки, онун електронла тутулма еһтималы 1/2 олсун. $\varphi_T = кT/q$ температур потенсиалы, φ - чари енержини характеризә едән потенсиалдыр.

Мәхсуси јарымкечиричидә Ферми сәвијјәси температурун истәнилән гијмәтиндә гадаған олунмуш зонанын ортасында јерләшир:

$$\varphi_{Fi} = \varphi_v + \frac{\varphi_{г.з}}{2} = \varphi_c - \frac{\varphi_{г.з}}{2}$$

Бурада φ_v-валент зонасынын таванынын енержисинә ујғун потенсиал; φ_c-кечиричилик зонасынын дибинин енержисинә ујғун потенсиал; $\varphi_{г.з}$-гадаған олунмуш зонанын енидир.

n типли јарымкечиричидә Ферми сәвијјәси гадаған олунмуш зонанын јухары јарысында, *p* типли јарымкечиричидә исә ашағы јарысында јерләшир:

$$\varphi_{F_n} = \varphi_E - \varphi_T \ln\frac{n}{n_i}; \qquad \varphi_{F_p} = \varphi_E - \varphi_T \ln\frac{p}{p_i}$$

$\varphi_E = \dfrac{\varphi_c + \varphi_v}{2}$ - гадаған олунмуш зонанын ортасына ујғун потенсиалдыр вә она јарымкечиричинин електростатик потенсиалы дејилир.

Дејилдији кими, јүкдашыјычыларынын истигамәтләнмиш һәрәкәти јарымкечиричидә чәрәјан јарадыр.

Јүкдашыјычыларынын електрик саһәсинин тә'сириндән истигамәтләнмиш һәрәкәти јарымкечиричидә дрејф чәрәјаны јарадыр.

Консентрасијаларын градијенти (фәрги) тә'сири алтында јүкдашыјычыларынын истигамәтли һәрәкәти јарымкечиричидә диффузија чәрәјаны әмәлә кәтирир.

Үмуми һалда јарымкечиричидә чәрәјанын сыхлығы дрејф вә диффузија топлананларынын чәминә бәрабәр олур:

$$J = j_{пдр} + j_{пдиф} + j_{рдр} + j_{рдиф}$$

$j_{\text{пдр}} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$ – електрон чәрәјан сыхлығынын дрејф топлананы;

$j_{\text{пдиф}} = q \cdot D_n \dfrac{dn}{dx}$ – електрон чәрәјан сыхлығынын диффузија топлананы;

$j_{\text{рдр}} = q \cdot n \cdot \mu_p \cdot E$ – дешик чәрәјан сыхлығынын дрејф топлананы;

$j_{\text{рдиф}} = -q \cdot D_p \dfrac{dp}{dx}$ – дешик чәрәјан сыхлығынын диффузија топлананыдыр.

Буну нәзәрә алсаг:

$$J = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + q \cdot n \cdot \mu_p \cdot E + q \cdot D_n \frac{dn}{dx} - q \cdot D_p \frac{dp}{dx}$$ алынар.

Бурада Е-електрик саһә кәркинлији, D_n вә D_p-електронларын вә дешикләрин јүрүклүјүндән асылы олан диффузија әмсалларыдыр: $D = \mu \dfrac{kT}{q}$.

Диффузија әмсалы јарымкечиричинин 1см^2 ен кәсијиндән 1 санијә әрзиндә ваһид консентрасија градијенти тә'сириндән диффузија едән јүкдашыјычыларын сајына дејилир.

4-чү топлананын гаршысындакы мәнфи ишарәси диффузијанын консентрасијанын азалмасы истигамәтиндә баш вердијини көстәрир. Дешикләр мүсбәт јүклү олдуғундан диффузија дешик чәрәјаны јалныз $dp/dx<0$ гијмәтләриндә мүсбәт олмалыдыр.

Јарымкечиричидә јүкдашыјычыларынын консентрасијасы замандан вә Х координатындан асылы олур. Бу асылылыг (*n* типли јарымкечиричидә) дешикләрин ахыны үчүн арасыкәсилмәзлик тәнлији илә ифадә олунур:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p - p_0}{\tau} - \frac{1}{q} div_{jp}$$

Ахынын сыхлыг векторунун диверкенсијасы (div_{jp}) јарымкечиричинин һәр һансы елементар һәчминә кәлән вә орадан кедән јүкдашыјычысы ахынын гејри-бәрабәрлији илә әлагәдар

олан јүкдашыјычыларын бу һәчмә јығылма вә орадан сорулма сүр'әтини характеризә едир. τ-јүкдашыјычыларынын "јашама мүддәти"дир. Бу о мүддәтдир ки, онун әрзиндә гејри-әсас јүкдашыјычыларынын ифрат консентрасијаасы e (натурал логарифмин әсасы) дәфә азалыр. Дашыјычыларын бу мүддәт әрзиндә дәф етдији орта мәсафәјә јүк дашыјычыларын диффузија узунлуғу (L) дејилир. Електронлар вә дешикләр үчүн бу кәмијјәтләрин асылылығы беләә ифадә олунур:

$$L_n = \sqrt{\tau_n D_n}; \qquad L_p = \sqrt{\tau_p D_p};$$

$1/\tau$ кәмијјәти рекомбинасијанын сүр'әтини вә јахуд јарымкечиричинин иш сүр'әтини характеризә едир.

Електрик саһәси олмајан һалда (E=0) арасыкәсилмәзлик ганунунун ифадәси садәләшир: $\frac{dp}{dt} = -\frac{p - p_0}{\tau} + D_p \frac{d^2 p}{dx^2}$. Буна диффузија тәнлији дејилир. n типли јарымкечиричидә електронлар үчүн ифадә дә буна охшар јазылыр.

Белә тәнликләрин көмәји илә бир чох јарымкечиричиләрин ишини арашдырмаг мүмкүндүр.

1.4. Електрон-дешик кечиди

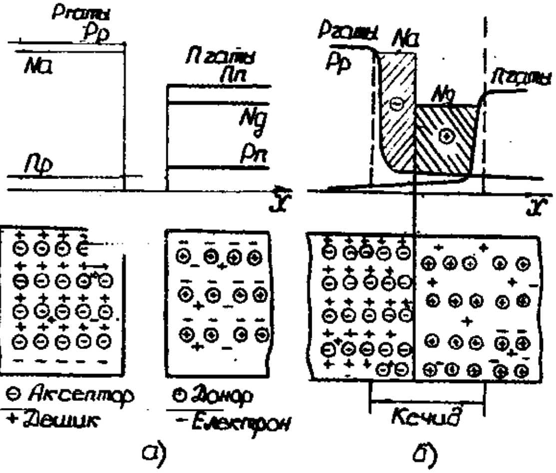
Бир тәрәфи n типли, дикәр тәрәфи p типли кечиричилијә малик олан ики гоншу јарымкечиричи саһәсинин тәмас (контакт) сәрһәддинә електрон-дешик кечиди вә ја p-n кечид дејилир.

Белә кечиди ики јарымкечиричи лөвһәни билаваситә бир-бири илә тәмаса (контакта) кәтирмәклә әлдә етмәк мүмкүн дејилдир. Чүнки бу һалда лөвһәләр арасында назик һава гаты вә ја сәтһи тәбәгәләр әмәлә кәлир. Әсл кечид ваһид јарымкечиричи лөвһәдә бу вә ја башга үсулла p вә n тәбәгәләри арасында кифајәт гәдәр кәскин сәрһәд јаратмагла әлдә едилир.

n вә p тәбәгәләриндә әсас јүкдашыјычыларынын консентрасијасына көрә кечидләр симметрик ($p_p \approx n_n$) вә гејри-

симметрик ($n_n >> p_p$ вә ја $n_n >> p_p$) олурлар. Гејри-симметрик кечидләр чох кениш јајылмышлар. Белә кечидә малик јарымкечиричиләрдә јүкдашыјычыларынын консентрасијалары бир-бириндән 100-1000 дәфә фәргләнир. Муәјјәнлик үчүн белә гәбул едилир ки, *p* тәбәгәси *n* тәбәгәсинә нисбәтән һәмишә даһа кичик мугавимәтә малик олур ($p_p >> n_n$).

Тәмасдан габаг һәр ики тәбәгәдә сәрбәст јүкдашыјычыларынын вә ашгарларын консентрасијалары шәкил 1.10*а*-да көстәрилмишдир. Јахшы тәсәввүр етмәк үчүн консентрасијаларын фәрги һәгигәтдә олдуғундан хејли аз көтүрүлмүшдүр.



Шәкил 1.10. *p-n* кечидин структуру: а) тәмасдан габагкы һал; б) тәмасдан сонракы һал

Һәр ики тәбәгәни тәмаса кәтириб кечид јарадандан сонра $p_p >> p_n$ олдуғундан консентрасија градијентинин тә'сири алтында дешикләрин бир һиссәси *p* гатындан *n* гатына диффузија едәчәкдир. *n* гатында сәрһәд јахынлығында артыг дешикләр әмәлә кәләчәк вә онлар $n \cdot p = n_i^2$ шәрти өдәнәнә гәдәр електронларла рекомбинасија едәчәкләр. Нәтичәдә бу саһәдә сәрбәст електронларын консентрасијасы азалачаг вә донор атомларынын компенсасија едилмәмиш мүсбәт јүкү өзүнү көстәрәчәкдир (шәкил 1.10*б*).

Буна ујғун олараг, консентрасија градијентинин тә'сириндән ($n_n>>p_p$) *n* гатынын електронларынын бир һиссәси *p* гатына диффузија едәчәк вә сәрһәд јахынлығында дешикләрлә рекомбинасијаја кирәрәк бурада дешикләрин консентрасијасыны азалдачагдыр.

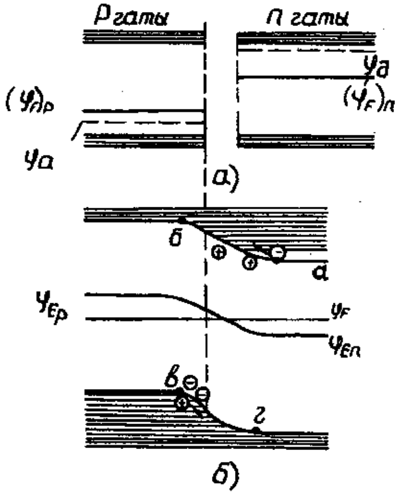
Нәтичәдә сәрһәддин сол тәрәфиндә акссептор атомларынын компенсасија едилмәмиш мәнфи јүкү үстүнлүк тәшкил едәчәкдир. Гејри-симметрик кечиддә електронларын *p* гатына диффузијасы бир о гәдәр дә чох дејилдир, чүнки $p_p-p_n>>n_n-n_p$.

Белә, компенсасија едилмәмиш фәза јүкләринин јарандығы саһәјә кечид саһәси дејилир вә онун ени онда бир микронла өлчүлүр. Мүтәһәррик јүкдашыјычыларынын һәр ики һиссәдә консентрасијасы кәскин азалдығындан бу саһәни һәм дә касыблашмыш вә ја түкәнмиш саһә адландырырлар.

Мүвазинәт үчүн, даһа доғрусу кечидин нејтрал олмасы үчүн үмуми јүк сыфра бәрабәр олмалыдыр - сол тәрәфдәки мәнфи јүк - сағ тәрәфдәки мүсбәт јүкә бәрабәр олмалыдыр. Шәкилдән көрүнүр ки, бу јүкләр тәкчә ашгар ионлары илә јох, һәм дә гоншу гатдан кәлмиш дашыјычыларын сајы илә әлагәдардыр. Анчаг бу јүкдашыјычыларын ролу бир о гәдәр әһәмијјәт дашымыр вә практики олараг фәза јүкләринин ашгар ионлары илә әлагәдар олдуғуну гәбул едирләр.

Кечиддә акссепторларын консентрасијасы донорларын консентрасијасындан чох олдуғундан ($N_a>N_d$), сағдакы вә солдакы јүкләр бәрабәр олдуғундан фәза јүкләринин тә'сир узунлуғу мүхтәлиф олур: *n* гатындан мүсбәт јүк саһәси *p* гатындакы мәнфи јүк саһәсиндән даһа енли олур. Башга сөзлә десәк, гејри-симметрик кечид әсасән јүксәк мүгавимәтли *n* гатында (бу һалда) чәм олур. Бу вәзијјәт мүтәһәррик дашыјычыларын јүкүнү нәзәрә аланда да дәјишмир.

Кечидин ишини зона нәзәријјәси бахымындан араштыраг. *p* вә *n* гатлары тәмасда олмајанда онларын зона диаграмлары шәкил 1.11*a*-да тәсвир олунур. Гатлар бирләшәндән сонра да Ферми сәвијјәсинин һәр ики гат үчүн ејни олмасы зәрурәтиндән зоналар мүтләг әјилир, гатларын електростатик потенсиаллары фәргләнир вә бу да потенсиал сәддинин јаранмасына кәтириб чыхарыр (шәкил 1.11*б*).



Шәкил 1.11. *p* вә *n* гатларынын тәмасда олмадығы (*a*) вә тәмасдан сонра мүвазинәтдә олдуғу (*б*) һаллар үчүн зона диаграмлары

Електронлары кечиричилик зонасынын диби илә һәрәкәт едән күрәчикләрә бәнзәтмәк јолу илә ахырынчы диаграмдан потенсиал фәргини изаһ етмәк олар. Көрүндүјү кими *n* гатындакы електронлара чох кичик илкин енержи лазымдыр ки, а-б саһәсиндәки диклији дәф едиб сол тәрәфә кечсинләр. *p* гатындакы електронлара исә илкин енержи лазым олмур, онлардан һәр бири сәддин сәрһәддинә чатарса, асанлыгла сүрүшүб сағ тәрәфә кечә биләр.

Валент зонасыны маје илә долдурулмуш, дешикләри илә бу зонанын таванына јапышмыш үзкәч кими тәсвир етсәк, көрәрик ки, *p* гатынын дешикләри кифајәт гәдәр илкин енержијә малик олмалыдырлар ки, "мајенин" сыхыб-чыхарма гүввәсини дәф едиб в-г саһәсиндә потенсиал сәддин сәвијјәсинә дүшә билсинләр. *n* гатынын дешикләри исә сәрһәддә чатарларса "үзәрәк" асанлыгла сол тәрәфә кечә биләрләр.

n гатынын аз енержили електронлары вә *p* гатынын аз енержили дешикләри сәдди кечә билмирләр вә елә бил ки, она дәјиб кери гајыдырлар. Бу дашыјычыларын сәрһәдә кирмә

мəсафəси онларын енержисинə мүтəнасибдир. Шəкил 1.11*б*-дə сəрhəд саhəсиндə солда ионлашмыш акцептор атомлары, сағда исə ионлашмыш донор атомлары көстəрилмишдир. Мə'лумдур ки, онларын сəвиjjəлəри уjғун гатын дəринлиjи боjунча jерлəшмишлəр. Онлары jалныз сəрhəд jахынлығында көстəрилмəси илə бу саhəдə ионларын jүкүнүн компенсасиjа олунмадығы геjд олунур. Доғрудан да "а" нөгтəсиндəн солда Ферми сəвиjjəси илə кечиричилик зонасынын диби арасындакы мəсафə кетдикчə артыр. Бу о демəкдир ки, а-б саhəсиндə бу зонанын електронларла тутулма еhтималы азалыр. Она көрə дə əкəр "а" нөгтəсиндəн сағда електронлар донор ионларын мүсбəт jүкүнү компенсасиjа едə билəр вə *n* гаты неjтрал олурса, "а" нөгтəсиндəн солда електронларын консентрасиjасы кəскин азылыр вə белə компенсасиjа баш вермир. Еjни сөзлəри "в" нөгтəсиндəн сағдакы акцептор ионларынын jүкү hагтында да демəк олар.

Кечиди тəhлил едəркəн кечидин ичəрисиндə сəрбəст jүкдашыjычыларынын консентрасиjасынын сыфра бəрабəр, кечиддəн кəнарда исə мүвазинəтдə олдуғу гəбул едилир. Даhа доғрусу hесаб едилир ки, електрик саhəси jалныз кечид саhəсиндə мəhдудлашыр.

Белə идеаллашдырылмыш пиллəвари кечид үчүн мүвазинəт hалында потенсиал сəддинин hүндүрлүjү белə тə'jин едилир:

$$\Delta\varphi = \varphi_{Ep} - \varphi_{En}$$

φ_{Ep} вə φ_{En} - гатларын дəринлиjиндə уjғун електростатик потенсиаллардыр. Бу потенсиаллары гатлардакы сəрбəст електронларын консентрасиjасы илə ифадə етсəк

$$\varphi_{Ep} = -\varphi_T \ln\frac{n_p}{N_c} + \varphi_F - \frac{\varphi_{z.з}}{2}$$

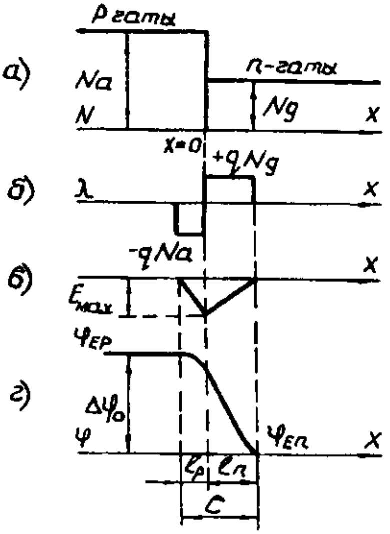
$$\varphi_{En} = -\varphi_T \ln\frac{n_n}{N_c} + \varphi_F - \frac{\varphi_{z.з}}{2}$$

аларыг.

Нәтичәдә потенсиал фәрги кими $\Delta\varphi_0 = \varphi_T \ln\frac{n_n}{n_p}$ тә'јин олунур. Бурада N_c кечиричилик зонасынын 1см^3 һәчминдә еффектив вәзијјәтләр сыхлығыдыр. Физики мә'насына көрә N_c $\varphi_F \to \varphi_c$ һалында јарымкечиричидә електронларын максимал консентрасијасыдыр. $n \cdot p = n_i^2$ васитәсилә електронларын консентрасијасыны дешикләрин консентрасијасы илә әвәз етсәк потенсиал сәддин һүндүрлүјү үчүн дикәр ифадәни аларыг:

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_T \ln\frac{p_p}{p_n}$$

$\Delta\varphi_0$ бә'зән диффузија потенсиалы да адланыр. Чүнки бу потенсиал фәрги бир тәрәфдән јүкдашыјычыларынын кечиддән диффузијасы нәтичәсиндә јараныр, дикәр тәрәфдән исә бу потенсиал дашыјычыларын диффузија селинин әксинә тә'сир көстәрир. $\Delta\varphi_0$-ы бә'зән тәмас потенсиал фәрги дә адландырырлар.



Шәкил 1.12. Пиллавари *p-n* кечиддә мүвазинәт һалында ашгарларын консентрасијасынын (*а*), јүкләрин сыхлығынын пајланмасы (*б*) вә саһә кәркинлијинин (*в*)

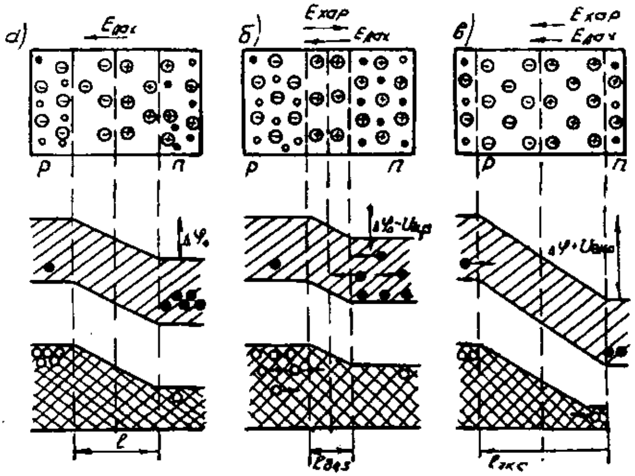
Јухарыдакы мүлаһизәләр тәмамилә кечидин мүвазинәт һалына аиддир. Бу һал үчүн ашгарларын консентрасијасынын, јүкләрин сыхлығынын, саһә кәркинлијинин вә потенсиалын пајланмасы шәкил 1.12-да көстәрилмишдир.

Тәкрар едәк ки, кечидин сәрһәдиндән узагларда һәр ики тәрәфдә електрик саһәси олмур. Она көрә дә бу саһәләрдә енержи зоналары үфүги хәтләрлә тәсвир едилирләр. Дахили електрик саһәси кәркинлији кечиддә *n* гатындан *p* гатына тәрәф јөнәлдијиндән диаграмда *n* саһәсинә ујғун енержи зона-

лары һәмишә p гатына ујғун зоналара нисбәтән ашағыда олмалыдыр.

Шәкил 1.13-дә кечидин таразлыг (*а*) вә гејри-таразлыг (*б*, *в*) һалы үчүн енержи диаграмлары көстәрилмишдир. Гејри-таразлыг һалы кечидә харичи көркинлик мәнбәји гошуланда баш верир. Бу заман кечиддә харичи електрик саһәси јараныр.

Әкәр харичи саһә $E_{хар}$ дахили саһәјә $E_{дах}$ әкс оларса (шәкил 3.10*б*) онда кечиддәки нәтичәви кәркинлик вә потенсиал сәддинин һүндүрлүјү азалар.



Шәкил 1.13. Таразлыг вә гејри-таразлыг һалында кечиддә јүкләрин пајланмасы вә енержи сәвијјәсинин дәјишмәси

Нәтичәдә әсас јүкдашыјычыларынын бөјүк енержијә малик олан һиссәси бу сәдди дәф едәрәк p гатындан n гатына (дешикләр) вә n гатындан p гатына (електронлар) кечә биләр. Бу һалда n гатында сәрһәд јахынлығында дешикләрин вә p гатында сәрһәд јахынлығында електронларын консентрасијалары belә ифадә олунур:

$$p_n = p_{n0} e^{U_{хар}/\varphi_T}; \quad n_p = n_{p0} e^{U_{хар}/\varphi_T}.$$

Бурада p_{n_0} вә n_{p_0} - таразлыг һалына ујғун консентрасијалар, $U_{хар}$ исә кечидә тәтбиг едилән харичи көркинликдир.

Көрүндүјү кими бу һалда сәрһәд јахынлығында һәр ики гатда јүкдашыјычыларынын консентрасијасы мүвазинәт һалына нисбәтән артыр. Башга сөзлә, гатларын һәр бириндә ифрат (артыг сајлы) гејри-әсас јүкдашыјычылары әмәлә кәлир. Гејри-әсас јүкдашыјычыларынын бу јолла јарымкечиричи гата нүфуз етмәси просесинә инжексија дејилир.

Сәрһәддә ифрат консентрасијаларын гијмәтини бу консентрасијаларын чари гијмәтләри илә таразлыг һалына ујғун консентрасијаларын фәргиндән ($p_n - p_{n_0}$) вә ($n_p - n_{p_0}$) тапмаг олар:

$$\Delta p_n = p_{n0}\left(e^{U_{хар}/\varphi_T} - 1\right);$$

$$\Delta n_p = n_{p0}\left(e^{U_{хар}/\varphi_T} - 1\right).$$

Бу ики ифадәни бири-биринә бөлүб вә сағ тәрәфдәки p_{n_0} вә n_{p_0} консентрасијаларыны p_p вә n_n-лә ($n{\cdot}p=n_i^2$-а көрә) әвәз етсәк $\frac{\Delta p_n}{\Delta n_p} = \frac{p_p}{n_n}$ аларыг. Белә гејри симметрик кечиддә әсас јүкдашыјычыларынын консентрасијалары хејли фәргләндијиндән јүксәк мүгавимәтли (бу һалда n типли) гата инжексија едилән гејри-әсас јүкдашыјычыларынын консентрасијасы алчаг мүгавимәтли p гатына инжексија едилән гејри-әсас јүкдашыјычыларынын консентрасијасындан гат-гат чох олачагдыр. Беләликлә, реал гејри-симметрик кечидләрдә инжексија демәк олар ки, биртәрәфли характер дашыјыр: гејри-әсас јүк дашыјычылары әсасән алчаг мүгавимәтли гатдан јүксәк мүгавимәтли гата тәрәф һәрәкәт едир.

Кичик хүсуси мүгавимәтә малик инжексија едән гата емиттер, нисбәтән бөјүк мүгавимәтли, гејри-әсас јүкдашыјычыларынын инжексија едилдији гата исә база дејилир.

Инжексија нәтичәсиндә кечиддән бөјүк чәрәјан ахыр. Кечидин беләә гошулмасына дүз истигамәтдә гошулма дејилир. Харичи кәркинлијин гијмәти артдыгча кечиддәки нәтичәви кәркинлик азалыр вә бу електрик саһәсинин јарымкечиричинин сәрһәдә јахын дәринлијинә тәс'ири азалыр. Она көрә дә кечидин (вә ја һәчми јүк саһәсинин) ени азалыр ($l_{дүз}$).

Әкәр харичи електрик саһәси дахили саһә истигамәтиндә оларса, әсас јүкдашыјычылары үчүн потенсиал сәддинин һүндүрлүјү артар (шәкил 1.13*в*). Бу һалда гејри-әсас јүкдашыјычылары үчүн сәдд олмадығындан онлар кечиддән бу вә дикәр тәрәфә кечирләр вә кечиддән онларын консентрасијасына ујғун чәрәјан ахыр. Бу һалда сәрһәд јахынлығында һәр ики гатда мүвазинәт һалына нисбәтән p_n вә n_p консентрасијалары азалыр. Гејри-әсас дашыјычыларынын *n* вә *p* гатларындан бу чүр "сорулмасы" просесинә екстраксија дејилир. Екстраксија нәтичәсиндә кечиддән ахан кичик чәрәјана әкс чәрәјан дејилир. Тәтбиг едилмиш харичи (әкс) кәркинлијин гијмәти артдыгча кечидин (вә ја фәза јүк саһәсинин) ени чохалыр ($l_{әкс}$).

Кечидин беләә гошулмасына әкс истигамәтдә гошулма дејилир. Кечиддән ахан чәрәјанын аналитик ифадәси беләдир:

$$J = J_0\left(e^{\frac{U_{xar}}{\varphi_T}} - 1\right)$$

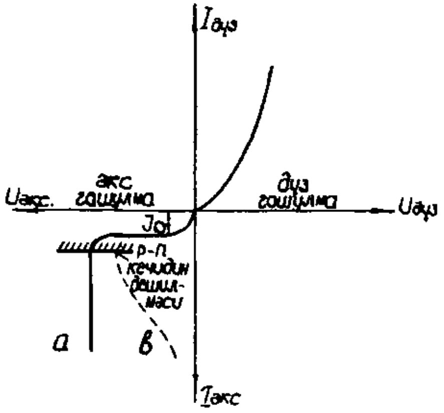
Бурада J_0-кечиддән ахан әкс чәрәјандыр. Она истилик чәрәјаны да дејилир. Онун гијмәти температурун сабит гијмәтиндә јарымкечиричинин физики хүсусијјәтләри илә мүәјјән едилир.

Бу ифадәјә ујғун кәлән графикә електрон-дешик кечидинин волт-ампер характеристикасы (кечиддән ахан чәрәјанын тәтбиг едилән кәркинлијин гијмәтиндән вә ишарәсиндән асылылығы) дејилир.

Кечидин волт-ампер характеристикасы шәкил 1.14-дә көстәрилмишдир. Көрүндүјү кими кәркинлијин мүсбәт гијмәтләриндә (дүз гошулма) $J_0 e^{\frac{U_{xar}}{\varphi_T}}$ һасили артыр, мәнфи гијмәт-

ләриндә исә сыфра гәдәр азалыр вә ҹәрәјан J_0-а бәрабәр олур. Әкс ҹәрәјанын гијмәти дүз ҹәрәјандан чох-чох кичик олдуғундан һесаб олунур ки, кечид ҹәрәјаны биртәрәфли кечирмәк (вентил) хүсусијјәтинә маликдир.

Әкс кәркинлијин јүксәк гијмәтләриндә әкс ҹәрәјанын гијмәти артыр вә әкәр о, мәһдудлашдырылмаса кечид "дешилир" вә бир тәрәфли ҹәрәјан кечирмә хүсусијјәтини итирир. Бу кәркинлијә дешилмә кәркинлији дејилир. Јарымкечиричинин хүсуси мүгавимәтиндән, кечидин нөвүндән, тәтбиг едилән кәркинлијин форма вә гијмәтиндән, әтраф мүһитин температурундан, истилик өтүрмә шәраитиндән, кристалын сәтһинин вәзијјәтиндән вә дикәр амилләрдән асылы олараг дешилмәнин ашағыдакы нөвләри олур: тунел дешилмәси, селвари дешилмә, истилик дешилмәси вә сәтһи дешилмә.



Шәкил 1.14. *p-n* кечидинин волт-ампер характеристикасы.

Тунел вә селвари дешилмә електрик саһәсинин мөвҹудлуғу илә әлагәдардыр. Истилик дешилмәси кечиддә сәпәләнән күҹүн артмасы вә бу заман сәпәләнән истиликлә әкс ҹәрәјан аханда кечиддә ајрылан күч арасында таразлығын позулмасы илә әлагәдардыр. Сәтһи дешилмә кристалын үзәриндә сәтһ јүкүнүн мөвҹуд олмасы илә әлагәдардыр.

Дешилмәнин нөвләри һагтында гыса мә'лумат верәк.

Тунел дешилмәси. Јүксәк електрик саһәсинин тә'сириндән јарымкечиричидә енержи зоналары әјилир вә елә бил ки, гадаған олунмуш зона енсизләшир. Бунун нәтиҹәсиндә електронларын кечид саһәсиндә валент зонасындан кечиричилик зонасына тунелвари кечмәси ("сивишмәси") еһтималы јараныр.

Белә дешилмә керманиумда $E \approx 2 \cdot 10^{-5}$ В/см, силисиумда исә $E \approx 4 \cdot 10^{5}$ В/см кәркинликли саһәдә баш верир. Дешилмәнин башланғычы $J_{экс}=10J_0$ гијмәтинә ујғун кәлир. Дешилмә кәркинлији базанын хүсуси мүгавимәтинә мүтәнасибдир вә кечиричилијин нөвүндән асылыдыр. Бөјүк әкс кәркинлијә дөзә билән кечидләрин јүксәк мүгавимәтли n типли базалары олур.

Бу дешилмәнин механизми белә дә изаһ едилә биләр. Електрик саһәсинин кәркинлији артдыгча атомларла әлагәдә олан електронларын енержиси артыр, онлар атомлардан ајрылмаға һазырлашырлар. Електрик саһәси олмајан һала нисбәтән белә ајрылмалар даһа аз енержили фононларла (даһа кичик температурда) баш верә биләр. Она көрә дә температурун фононларын орта енержисини мүәјјән едән һәр һансы гијмәтиндә белә ајрылмаларын сајы артыр. Зона нәзәријјәси бахымындан бу, һәмин температурда валент зонасындан кечиричи-лик зонасына кечән електронларын сајынын артмасы демәкдир ки, бу да гадаған олунмуш зонанын ениним азалмасына еквивалентдир.

Селвари дешилмә саһә кәркинлијинин кичик гијмәтиндә нејтрал атомларын сүр'әтли јүк дашыјычылар васитәсилә зәрбә ионлашмасы нәтичәсиндә баш верир. Кечид саһәсиндә гејри-әсас јүкдашыјычылары (електрон вә дешикләр) електрик саһәси илә сүр'әтләнәрәк ионлашдырма үчүн кифајәт едән енержи әлдә едирләр вә кечид саһәсиндә јарымкечиричи атомларындан валент әлагәләрини гырырлар. Нәтичәдә јени јүкдашыјычы чүтләр јараныр вә просес бунларын тә'сири алтында даһа да инкишаф едир. Бу һалда кечиддән ахан үмуми чәрәјан ионлашма олмадығы һалдан чох олур, саһә кәркинлијинин бөјүк гијмәтләриндә ионлашма селвари характер дашыјыр (газларда електрик бошалмасына бәнзәр) вә чәрәјан бу һалда харичи мүгавимәтлә мәһдудлашыр.

Гејри-әсас јүкдашыјычыларынын кечид саһәсиндә һәрәкәт вахты кифајәт гәдәр енержи алмасы үчүн онларын дрејф мүддәти мүмкүн гәдәр бөјүк олмалыдыр. Она көрә дә селвари дешилмә енли кечидләрдә (јүксәк мүгавимәтли материалда)

баш верир. Енсиз кечидләрдә (кичик мүгавимәтли материалда) јүкдашыјычылары дрејф вахты һәтта јүксәк саһә кәркинлији оланда да кифајәт гәдәр енержи әлдә едә билмирләр вә belә кечидләрдә тунел дешилмәси баш верир.

Истилик дешилмәси саһә кәркинлијинин чох кичик гијмәтләриндә кечиддән ваһид заманда кәнара верилән истилијин әкс чәрәјанын тә'сириндән кечиддә ајрылан истиликдән аз олмасы һалында баш верир. Истилијин тә'сириндән (һәјәчанланмадан) валент електронлары кечиричилик зонасына кечир вә кечиддә чәрәјаны даһа да артырырлар. Бу әлагә чәрәјанын селвари артмасы вә кечидин дешилмәсинә кәтириб чыхарыр. Әтраф мүһитин температуру артдыгча истилик механизмли дешилмә кәркинлији азалыр. Кичик әкс чәрәјана малик кечидләрдә дешилмә кәркинлији аз олур. Силисиум кечидләриндә J_0 чох кичикдир вә онларда истилик дешилмәси баш вермир.

Сәтһи дешилмә. Саһә кәркинлијинин кечиддә пајланмасы јарымкечиричинин сәтһиндә јығылан јүкләри кәскин дәјишә билир. Сәтһ јүкләри кечидин галынлығыны артырыб азалда биләр. Нәтичәдә сәтһдә саһә кәркинлијинин һәчми дешилмә үчүн тәләб олунандан кичик мүәјјән гијмәтләриндә сәтһи дешилмә баш верә биләр. Белә дешилмәнин баш вермәсиндә јарымкечиричинин сәтһи илә һәмсәрһәд олан мүһитин диелектрик хүсусијјәтләри (өртүјү, чирклији вә с.) мүһүм рол ојнајыр. Белә дешилмәнин баш вермә еһтималыны азалтмаг үчүн јүксәк диелектрик сабитли өртүкләрдән истифадә олунур.

Кечидин хүсусијјәтләри температурдан чох асылыдыр. Температур артдыгча електрон-дешик чүтләринин јаранмасы сүр'әтләнир, гејри-әсас јүкдашыјычыларынын консентрасијасы вә кристалын мәхсуси кечиричилији артыр. Она көрә дә температур артдыгча һәм дүз, һәм дә әкс чәрәјанын гијмәти артыр. Анчаг бу артма ејни олмур, чүнки дүз чәрәјанын гијмәти әсасән ашгарларын консентрасијасындан асылыдыр.

Кечидин хүсусијјәтләри һәм дә тәтбиг олунан кәркинлијин тезлијиндән асылыдыр. Бунун сәбәби *n* вә *p* тәбәгәләри арасында хүсуси тутумун мөвчуд олмасындадыр.

Әкс чәрәјан тәтбиг едиләркән һәр ики ишарәли јүкдашыјычылары кечидин һәр ики тәрәфиндә јығылырлар вә кечидин өзүндә онларын сајы аз олур. Бу һалда кечиди тутум кими тәсвир етмәк олар. Бу тутумун гијмәти кечидин һәчми фәза јүкүндән, башга сөзлә кечидин саһәсиндән, ениндән вә јарымкечиричинин диелектрик нүфузлулуғундан асылыдыр. Бу тутума сәдд тутуму дејилир. Әкс кәркинлијин кичик гијмәтләриндә мүхтәлиф ишарәли јүк дашыјычылары бири-бириндән чох да узагда олмурлар. Она көрә сәдд тутуму чох бөјүк олур (кечид енсиз олур). Әкс кәркинлик артыгча кечидин ени бөјүјүр вә сәдд тутуму азалыр. Бу хүсусијјәт кечиди әкс кәркинлији дәјишмәклә идарә олунан тутум кими истифадә етмәјә имкан верир.

Сәдд тутумунун мөвчудлуғу кечидин хүсусијјәтләринә тә'сир көстәрир. Јүксәк тезликләрдә ишләјәркән кечидин тутум мүгавимәти $X_{сәдд}=1/\omega C_{сәдд}$ азалыр вә әкс гошулмуш кечидин бөјүк мүгавимәтини шунтлајыр. Бу заман кечид бир тәрәфли чәрәјан кечирмә хүсусијјәтини итирир.

Сәдд тутумундан әлавә кечид диффузија тутумуна да малик олур. Бу тутум дүз гошулма режиминдә јүк дашыјычыларын инжексијасы нәтичәсиндә јараныр. Диффузија тутуму кечидин ишинә чох тә'сир етмир, чүнки о һәмишә кечидин кичик дүз мүгавимәти илә шунтланмыш олур.

1.5. Јарымкечиричиләрдә кечидләрин дикәр нөвләри

Јухарыда арашдырылан пилләвари *p-n* кечиддән башга, практикада дикәр кечидләрдән дә истифадә олунур. Бунлара јарымкечиричи-метал, јарымкечиричи-диелектрик кечидләри, һетерокечид вә с. аиддир. Инди дә онларын хүсусијјәтләрини өјрәнәк.

Јарымкечиричи - метал кечиди илк јарымкечиричи чиһазлар (нөгтәви тәмаслы диодлар) јарымкечиричинин металла

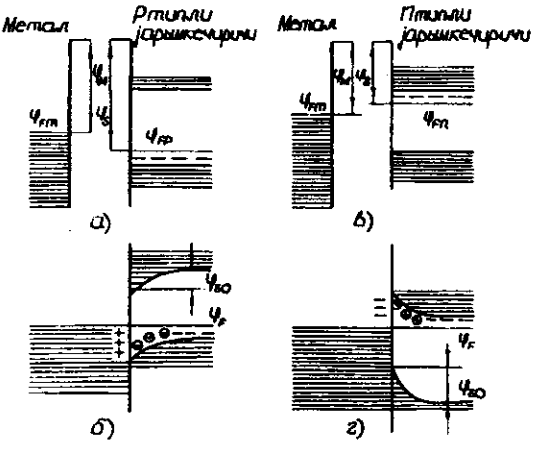
тəмасы əсасында гурулмушдур. Тəчрүби јолла тапылмышдыр ки, метал ијнəни тəбии јарымкечиричи минерал кристалларынын бə′зилəр илə тохундурмаг нəтичəсиндə зəиф дəјишəн сигналлары дүзлəндирмəк олар. Белə чиһазлар чох садə вə е′тибарсыз ишлəмəлəринə бахмајараг мүасир транзистор електроникасынын инкишафына вə даһа мүкəммəл нөгтəви диодлар јарадылмасына тəкан вермишлəр. Интеграл схемлəрдə металын јарымкечиричи илə (силисиумла) тəмасы ики чүр истифадə олунур: 1) интеграл схемин елементлəриндə чəрəјан вə кəркинликлəри тəтбиг едəн гејри-дүзлəндиричи омик тəмаслар; 2) хүсуси дүзлəндиричи тəмаслар (Шоттки диодлары).

Метал-јарымкечиричи тəмасын структуру һəр шејдəн əввəл һəр ики гатда Ферми сəвијјəлəринин гаршылыглы јерлəшмəси илə мүəјјəн едилир.

Шəкил 1.15-дə метал вə јарымкечиричи гатлары тəмасда олмаздан габагкы (*а,в*) вə тəмасдан сонракы (*б,г*) һаллар үчүн зона диаграмлары көстəрилмишдир.

Шəкил 1.15 (*а-в*)-дə көстəрилəн диаграмлар $\varphi_F > \varphi_{F_p}$ һалы үчүн чəкилмишдир. (φ_F-металда Ферми сəвијјəсидир). Бу о демəкдир ки, јарымкечиричинин кечиричилик зонасында јерлəшəн һəр һансы φ сəвијјəсинин електронла тутулма еһтималы металда јерлəшəн ејни сəвијјəнин тутулма еһтималындан аздыр. Башга сөзлə, јарымкечиричинин кечиричилик зонасы металын она ујғун саһəсинə нисбəтəн електронларла пис долур. Она көрə тəмас јаранан кими електронларын бир һиссəси металдан *р* типли јарымкечиричијə кечир.

Јарымкечиричинин сəтһə јахын гатында əлавə електронларын јаранмасы рекомби насијаны сүр’əтлəндирир. Бунун нəтичəсиндə əсас јүкдашыјычыларынын-дешиклəрин сајы азалыр вə металла сəрһəдин јахынлы-ғында акцептор ионларынын компенсасија едилмəмиш јүкү өзүнү бүрузə верир. Електрик саһəси əмəлə кəлир, бу да електронларын сонракы ахынына мане олур вə тəмас саһəсиндə мүвазинəт јараныр. Енержи зоналары ашағы истигамəтдə əјилирлəр.



Шәкил 1.15. Дүзләндиричи метал-јарымкечиричи тәмасынын зона диаграмлары

Шәкил 1.15*б*-дә зона диаграмлары $\varphi_F<\varphi_{Fn}$ һалы үчүн гурулмушдур. Бу заман тәмасдан сонра електронлар *n* типли јарымкечиричидән метала кечирләр вә рекомбинасија нәтичәсиндә металла сәрһәдин јахынлығында донор ионларынын компенсасија едилмәмиш мүсбәт јүкләри өзүнү көстәрир. Бу һалда енержи зоналары јухары истигамәтдә әјилирләр.

Зоналарын әјилмә областы һәчми јүкләрин областына ујғун кәлир, онларын узунлуғу $\ell=\sqrt{\dfrac{2\varepsilon_0\varepsilon|\varphi_s|}{qN}}$ дүстуру илә тә'јин едилир вә һәр ики һалда 0,1-0,2 мкм һәддиндә олур. Бурада N - ионлашмыш ашгарларын консентрасијасы, φ_s - сәтһ потенсиалыдыр (сәтһлә һәчм арасындакы потенсиал фәрги), ε_0 – вакуумун мүтләг диелектрик нүфузлуғу, ε - диелектрик нүфузлуғудур.

Белә тәмаслары реал шәраитдә вакуумда металы јарымкечиричинин үзәринә тоз кими сәпәләмәк јолу илә әлдә едирләр.

Адәтән металла јарымкечиричи арасындакы електрон мүбадиләсини илкин Ферми сәвијјәләринин фәрги илә јох, чы-

хыш ишләринин фәрги илә характеризә едирләр. Зона диаграмларында чыхыш иши Ферми сәвијјәси илә сәрбәст електронун бәрк чисимдән кәнардакы сәвијјәси арасындакы енержи ''мәсафәси''дир. Шәкил 1.15-дә металдан вә јарымкечиричидән чыхыш ишләри $\varphi_м$ вә φ_s -лә ишарә едилмишдир. $\varphi_м$-φ_s=$\varphi_{мs}$ фәргинә (волтларла өлчүлүр) тәмас потенсиал фәрги дејилир.

φ_M вә φ_s чыхыш ишләринин нисбәтиндән асылы олараг, електронлар бир гатдан дикәринә кечирләр. Әкәр $\varphi_м < \varphi_s$-дирсә ($\varphi_{мs} < 0$) (шәкил 1.15*а*) електронларын металдан јарымкечиричијә, $\varphi_м > \varphi_s$ оларса исә ($\varphi_{мs} > 0$) (шәкил 1.15*б*) јарымкечиричидән метала кечирләр.

Енержи зоналарынын сәтһин јахынлығында әјилмә дәрәчәси таразлыг сәтһ потенсиалы φ_{s0} илә характеризә едилир. Әкәр сәтһ вәзијјәтләринин ролу нәзәрә алынмазса $\varphi_{so} = \varphi_{мs}$ олур.

Шәкил 1.15-дә көстәрилән һәр ики тәмас јарымкечиричинин тәмасјаны гатында касыблашмыш гатларын әмәлә кәлмәси илә фәргләнир. Бурада әсас јүкдашыјычыларын консентрасијасы тәмасдан аралыгда мөвчуд олан таразлыг консентрасијасына нисбәтән кичикдир. Она көрә тәмасјаны гатын хүсуси мүгавимәти бөјүкдүр вә бу (*p-n* кечиддә олдуғу кими) бүтүн системин мүгавимәтини мүәјјән едир.

Тәмасјаны гатдакы потенсиал сәддинә Шоттки сәдди дејилир вә онун һүндүрлүјү (φ_{so}) *p-n* кечиддәки $\Delta\varphi$ потенсиалына ујғундур. Тәтбиг олунан харичи кәркинлијин ишарәсиндән асылы олараг φ_s потенсиалы вә ујғун олараг тәмасјаны гатын мүгавимәти дәјишәчәкдир.

Әкәр мүсбәт гүтб метала, мәнфи гүтб исә јарымкечиричијә гошуларса тәмасда потенсиал сәдди (шәкил 1.15а) артачаг, тәмасјаны гат әсас јүкдашыјычыларына-дешикләрә көрә даһа да касыблашачаг вә мүвазинәт һалына нисбәтән даһа бөјүк хүсуси мүгавимәтә малик олачагдыр. Демәли, белә ишарәли кәркинлик бу тәмас үчүн әкс кәркинликдир. Һәмин ишарәли кәркинлик икинчи тәмаса тәтбиг едиләрсә потенсиал сәдди

азалар, тәмасјаны гат әсас јүк дашыјычылары илә електронларла зәнкинләшәр вә онун мүгавимәти таразлыг һалына нисбәтән азалар. Демәли, белә ишарәли кәркинлик бу тәмас үчүн дүз кәркинликдир.

Беләликлә, бахылан тәмаслар дүзләндирмә хүсусијјәтләринә маликдирләр вә белә сәддләрин үзәриндә Шоттки диоду адланан чиһазлар гурулур.

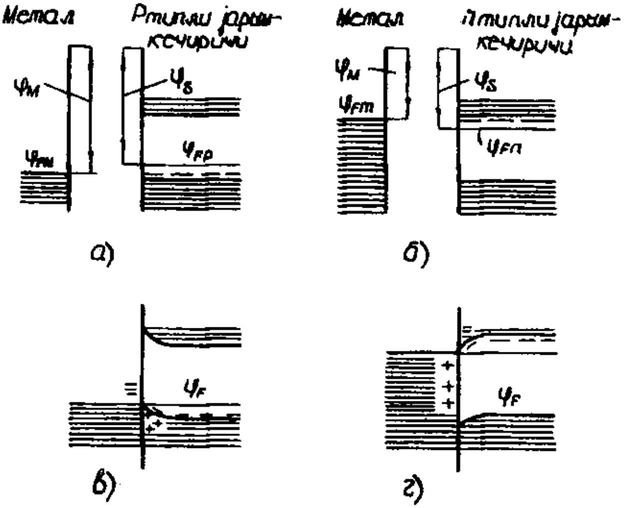
Тутаг ки, металын *p* типли јарымкечиричи илә тәмасында $\varphi_{ms}<0$ (шәкил 1.16 *б,г*). Ајдындыр ки, биринчи һалда електронлар јарымкечиричидән метала кечәчәк вә зоналар јухары истигамәтдә әјиләчәк, икинчи һалда исә електронлар металдан јарымкечиричијә кечәчәк вә зоналар ашағы истигамәтдә әјиләчәкләр. Белә тәмасларда јарымкечиричидә сәрһәд јахынлығында әсас јүк дашыјычылары јығылыр вә зәнкинләшмиш гатлар алыныр. Онларын узунлуғу $\ell=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon\varphi_T}{qN}}$ дүстуру илә тә'јин олунур вә микрометрин јүздә бири гәдәр олур. Шәкил 1.16 -дә тәмас потенсиал фәрги чох көтүрүлдүјүндән зоналарын әјилмәси чох аздыр. Әкәр φ_{ms}=0,1-0,2В көтүрүлсә, зоналарын әјилмәси бөјүк олар вә сәрһәд јахынлығында Ферми сәвијјәси ујғун ичазә верилмиш зонадан кечәр. Бу саһәдә јарымкечиричи чох кичик хүсуси мүгавимәтә малик јарымметала чевирилир.

Зәнкинләшмиш гатын мөвчудлуғу о демәкдир ки, бүтөв системин мүгавимәти нејтрал јарымкечиричи гаты илә мүәјјән едилир вә она көрә тәтбиг олунан кәркинлијин нә гијмәтиндән, нә дә ишарәсиндән асылы олмур. Металын јарымкечиричи илә белә гејри-дүзләндиричи комбинасијасына омик тәмас дејилир.

Омик тәмаслар јарымкечиричи гатлара чыхыш мәфтилләрини гошанда алыныр. Ики тәрәфли кечиричилик хүсусијјәтиндән әлавә омик тәмасын зәнкинләшмиш гатында ифрат јүкдашыјычылар һәддиндән артыг кичик өмүрлү олурлар. Она көрә јарымкечиричи чиһазлар тәһлил едәркән омик тәмасларда ифрат јүкдашыјычыларын консентрасијасынын сыфра бәрабәр олдуғуну гәбул едирләр.

Микроелектроникада һал-һазырда омик тәмаслар үчүн ән чох ишләнән метал алүминиумдур. Ону сәтһә тоз шәклиндә сәпәләјиб, сонра јүксәк температурда кичик дәринлијә ''јандырыб салырлар''. Әкәр силисиум *n* типлидирсә онда алүминиум акцептор олараг сәтһјаны гата гарышыб омик тәмасын кечиричилијини артырыр.

Әкәр силисиум *p* типлидирсә, онда алиминиум акцептор атомлары әсас донор атомларынын артыгламасы илә компенсасија едәчәк вә силисиумун сәтһ јаны саһәси дешик хүсусијјәти әлдә едәчәк. Бунун нәтичәсиндә омик тәмас әвәзинә паразит *p-n* кечид алыначагдыр. Өзү дә донорларын консентрасијасы нә гәдәр кичик оларса, (јә'ни силисиумун хүсуси мүгавимәти јүксәк оланда) белә һалын јаранма еһтималы бир о гәдәр бөјүкдүр. Бунун гаршысыны алмаг үчүн *n* типли силисиумун сәтһини тәмас саһәсиндә донорларла әлавә әртүрләр вә ону n^+ гата чевирирләр. Бу һалда алиминиум атомлары илә артыгламасы илә компенсасија баш вермир.



Шәкил 1.16. Гејри-дүзләндиричи метал-јарым кечиричи тәмасын зона диаграмлары

Јарымкечиричи-диелектрик кечиди јарымкечиричинин һәмсәрһәд олдуғу мүһитин хассәләри сәтһјаны гатын хүсусијјәтинә тә'сир едир. Буну јухарыда араштдырдығымыз тәмасда мүшаһидә етдик: јарымкечиричинин сәтһиндә металын олмасы јарымкечиричидә касыблашмыш вә зәнкинләшмиш гатлары әмәлә кәтирир. Бу чүр просесләр јарымкечиричинин сәтһиндә дә баш верир. Адәтән силисиумун силисиум оксиди (SiO_2) илә сәрһәдди хүсуси мараг доғурур, чүнки бүтүн мүасир јарымкечиричи интеграл схемләрин сәтһини оксид гаты илә өртүрләр.

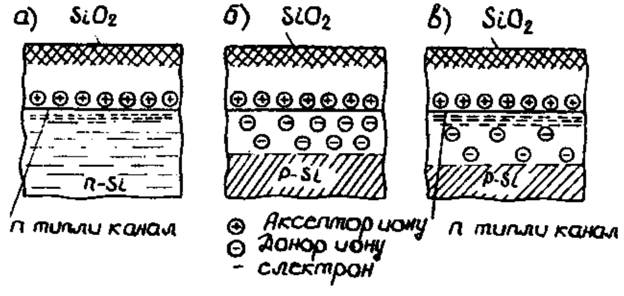
Силисиум оксидиндән олан гатларын әсас хүсусијјәтләри ондадыр ки, онларда һәмишә донор типли ашгарлар олур. Бунлардан ән кениш јајыланлары натриум, калиум вә һидрокендир. Онларын һамысы һәм силисиумун, һәм дә микроелектроника техноложи просесләринин апарылдығы габларын һазырландығы шүшәнин вә кварсын тәркибиндә мөвчуд олур.

SiO_2 тәбәгәсинә хас олан донор ашгарлары адәтән силисиумла сәрһәдин јахынлығында јығылыр. Она көрә SiO_2 тәбәгәсиндә силисиумла сәрһәддә мүсбәт јүкләнмиш донор атомларындан ибарәт назик гат әмәлә кәлир, бу атомларын вердији електронлар исә силисиумун сәтһјаны гатына кечирләр. Бу кечидин нәтичәсиндә баш верән һадисәләр һәм јарымкечиричинин нөвүндән, һәм дә диелектрикдә донор ашгарларынын консентрасијасындан асылы олур. Донор атомлары диелектрикин чох назик гатында јығылдыгларына көрә һәчми консентрасија ($см^{-3}$) әвәзинә сәтһи консентрасијадан ($см^{-2}$) истифадә олунур. Әкәр силисиум *n* типлидирсә оксиддән она кечмиш електронлар онун сәтһјаны гатыны әсас јүк дашыјычыларла зәнкинләшдирир вә *n* типли канал әмәлә кәлир (шәкил 1.17а).

Силисиум *p* типли оланда исә онда оксиддән кечән електронлар ја јарымкечиричинин сәтһјаны гатыны касыблашдырараг мәнфи акцептор ионларыны "ашкар" едирләр (шәкил 1.17*б*), ја да касыблашдырылмыш гатла бәрабәр назик инверсион гат јарадырлар (шәкил 1.17*в*).

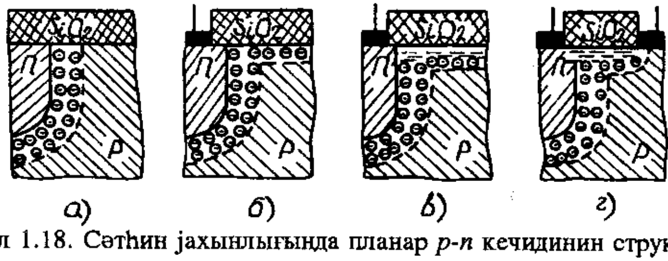
Силисиумда зәнкинләшмиш, касыблашмыш вә инверсион гатларынын јаранмасы јарымкечиричи чиһазларын вә интеграл схемләринин ишинә бөјүк тә'сир көстәрир.

Si - SiO_2 сәрһәддинин харичи саһәләринин бу сәрһәддә бирләшән планар *р-п* кечидинә тә'сирини арашдыраг.



Шәкил 1.17. Силисиум оксидлә һәмсәрһәд олан сәтһјаны гаты:
а) зәнкинләшмиш гат; *б*) касыблашмыш гат; *в*) инверсион каналлы касыблашмыш гат

Шәкил 1.18-дә оксид тәбәгәси олмаѕјан һалда *р-п* кечидин "шагули" (јан) саһәси көстәрилмишдир. Оксид тәбәгәси оланда *р* типли силисиумда јаранан сәтһјаны касыблашмыш гат (шәкил 1.17*б*) илкин "шагули" гатла гарышыр (шәкил 1.18*б*). Касыблашмыш гатын нәтичәви саһәси вә һәчми артыр вә онунла бирликдә термокенерасија чәрәјаны (силисиум кечидләриндә әкс чәрәјанын әсас топлананы) да артыр. Әкс чәрәјанын артмасына сәтһјаны саһәдә дашыјычыларын кичик јашама мүддәти дә тә'сир көстәрир.

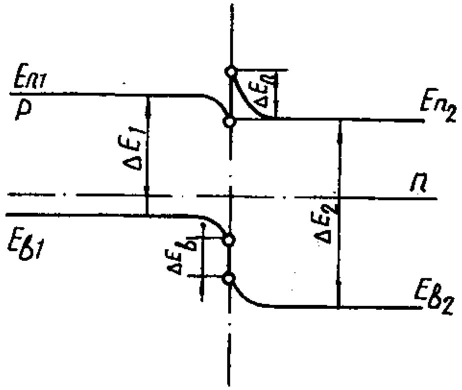


Шәкил 1.18. Сәтһин јахынлығында планар *р-п* кечидинин структуру:
а) оксиддә донор ашгары олмаѕјанда; *б*) оксиддә донор ашгары оланда

Әкәр p типли силисиум касыблашмыш гатла бәрабәр инверсион n типли канал јарадырса (шәкил 1.17*в*), онда канал кечидин n гаты илә бирләшир вә елә бил ки, бу гаты сәтһдә узадыр (шәкил 1.18*в*). Нәтичәдә бундан әввәлки кими касыблашмыш гатын нәтичәви саһәси артыр. Лакин бу һалда касыблашмыш гат сәтһдән чәрәјан бурахан n типли каналла ајрылмышдыр. Касыблашмыш гатын сәтһјаны саһәси термокенерасија чәрәјанына чох тә'сир етмир вә чәрәјан бундан әввәлки һала нисбәтән кичик олур. Буна бахмајараг, n типли каналын олмасы мәнфи рол ојнајыр. Доғрудан да p гатында јерләшән n типли канал n вә p гатларынын омик тәмаслары арасында p-n кечиди гыса гапајан нагил јарадыр (шәкил 1.18*г*).

Һетерокечид. Гадаған олунмуш зоналарынын ени мүхтәлиф олан ики јарымкечиричинин тә'масындан јаранан p-n кечидә һетерокечид дејилир. Белә кечидләрә мисал керманиум-силисиум вә керманиум-галлиум арсенид ола биләр.

Һетерокечид һәм мүхтәлиф кечиричилијә, һәм дә ејни кечиричилијә малик јарымкечиричиләр арасында јарана биләр. Шәкил 1.19*а*-да һетерокечидин зона диаграмы көстәрилмишдир. Кечидин хүсусијјәти ондадыр ки, валент зонасында енержи сәвијјәләри ΔE_1 вә ΔE_2 гырылмыш олур. Кечиричилик зонасында сәвијјәләрин гырылмасы p вә n типли јарымкечиричиләрдә чыхыш ишләринин фәрги илә валент зонасында исә ондан башга $E_{в1}$ вә $E_{в2}$ енержиләринин бәрабәр олмамасы илә әлагәдардыр. Она көрә електронлар вә дешикләр үчүн потенсиал



Шәкил 1.19. Һетерокечидин зона диаграмы

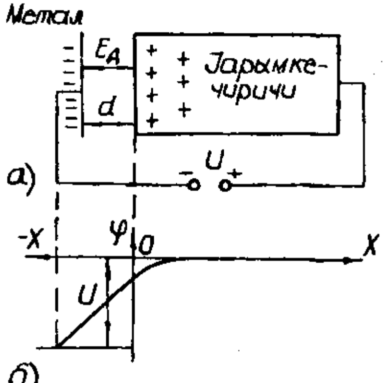
сәддләр мүхтәлиф олур: електронлар үчүн кечиричилик зонасында потенсиал фәрги дешикләр үчүн ва лент зонасындан

аздыр. Кечидә дүз кәркинлик вериләндә електронлар үчүн потенсиал сәдди азалыр вә онлар *n* типли јарымкечиричидән *p* типлијә инжексија едилирләр. Дешикләр үчүн дә потенсиал фәрги азалыр, лакин кифајәт гәдәр јүксәк олур ки, дешикләрин *p* гатындан *n* гатына инжексијасы олмасын. Бу, она кәтириб чыхарыр ки, јүк дашыјычылары јалныз кечидин бир гатына инжексија олунур. Бу исә бир чох јарымкечирици ҹиһазларын иш кејфијјәтинә мүсбәт тә'сир көстәрир.

n-n типли һетерокечидләрдән истифадә олунаркән дүзүнә кечиричиликдә әсас јүкдашыјычылары – електронлар иштирак едирләр. Бу о демәкдир ки, ҹиһазы дүзүнә вәзијјәтдән әксинә гошулма вәзијјәтинә кечирәркән онда гејри-әсас јүкдашыјычыларынын ади *p-n* кечиддә баш верән јаваш сорулмасы һадисәси баш вермир. Бу исә гошма вахтыны 0,1-1 наносанијәјә гәдәр азалтмаға имкан верир.

1.6. Јарымкечиричиләрдә сәтһ һадисәләри

Гејри-мәһдуд өлчүләрә малик кристалда ичазә верилмиш сәвијјәләрин һамысы мәһдуд өлчүлү кристалда да мөвчуд олур. Гәфәсәнин гырылмасы јалныз она кәтириб чыхарыр ки, кристалын сәтһинин јахынлығында гејри-мәһдуд кристал үчүн гадаған олунмуш һәдләрдә ичазә верилмиш дискрет сәвијјәләр вә ја зоналар јаранык. Бу сәвијјәләри тутмуш електронлар кристалын ичинә кирә билирләр вә онун сәтһи јахынлығында јығышырлар. Бу сәвијјәләрә сәтһ сәвијјәләри вә ја Тамм сәвијјәләри дејилир. Сәтһ сәвијјәләри донор, акцептор вә ја-



Шәкил 1.20. Метал-диелектрик-јарымкечиричи структурда саһә ефекти (*а*) вә потенсиал пајланмасы (*б*)

пышма мәркәзләри ола биләрләр. Акцептор сәвијјәләринин тутулмасы електронларын локал јығылмасы, електронларын донор сәвијјәләриндән узаглашмасы исә бу сәвијјәләрдә дешикләрин локал јығылмасы демәкдир. Бунун нәтичәсиндә сәтһин мәнфи вә ја мүсбәт јүкләрлә јүкләнмәси баш верир. Нејтраллыг шәртинин өдәнмәси вачиблијинә көрә белә јүкләнмә сәтһјаны гатда сәтһи јүкү нејтраллашдыран һәчми јүкү әмәлә кәтирмәлидир. Бу, сәтһә онун үзәриндәки јүкләрин әксинә јүкләнмиш дашыјы-чыларын чәкилиб кәтирилмәси вә онларла ејни ишарәли јүкләнмиш дашыјычыларын орадан итәләниб узаглашдырылмасы илә һәјата кечирилир. Нәтичәдә јарымкечиричинин сәтһјаны гаты сәтһдәки јүклә ејни ишарәли дашыјычылара көрә касыблашыр вә онлара әкс ишарәли дашыјычыларла зәнкинләшир.

Тамамилә бунун кими метал-диелектрик-јарымкечиричи структурунда да електрик саһәсинин тә'сириндән јарымкечиричинин сәтһјаны гаты јүк дашыјычыларла зәнкинләшир вә касыблашыр. Бу һадисәјә саһә еффекти дејилир (шәкил 1.20). Метала мүсбәт вә ја мәнфи потенсиал верилир. Метал ләвһәдәки јүкә бәрабәр вә она әкс ишарәли јүк јарымкечиричидә сәтһ үзәриндә јох, онун сәтһјаны гатында јерләшир. Әкәр јүкдашыјычыларын консентрасијасы чох бөјүк олан ($\sim 10^{28}$м$^{-3}$) металларда сәтһ јүкүнүн нејтраллашмасы гәфәсәнин бир нечә параметринә бәрабәр мәсафәдә баш верирсә, јарымкечиричиләрдә һәчми јүк чох дәринә (-10^{-6}м-дән чох) сирајәт едир. Адәтән бу дәринлик екранламанын дебај узунлуғу ($L_Д$) адланан мәсафәјә бәрабәр көтүрүлүр. Бу елә мәсафәдир ки, бу мәсафәдә сәрбәст јүк дашыјычылары олан маддәдә саһә потенсиалы *е* дәфә азалыр (е-натурал логарифмин әсасыдыр $e \approx 2{,}72$). Мәхсуси јарым кечиричи үчүн

$$L_D = \left(\frac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{2q^2 n_i}\right)^{1/2} = \left(\frac{\varepsilon\varepsilon_0 \varphi_T}{2qn_i}\right)^{1/2}$$

Ашгарлы јарымкечиричи үчүн $L_D = \left(\frac{\varepsilon\varepsilon_0\varphi_T}{qN}\right)^{1/2}$.

Бурада N ионлашмыш ашгарларын консентрасијасыдыр.

$N >> n_i$ олдуғундан ашгар јарымкечиричиләриндә L_D мәхсуси јарымкечиричиләрдә олдуғундан аздыр.

Јарымкечиричинин сәтһинин јүкләнмәси онун сәтһи илә һәчми арасында потенсиал фәрги јарадыр. Сәтһ мәнфи јүкләнәндә енержи зоналары јухары истигамәтдә әјилирләр, чүнки електрон һәчмдән сәтһә доғру һәрәкәт едәндә онун енержиси чохалыр. Сәтһ мүсбәт јүкләнәндә зоналар ашағы истигамәтдә әјилирләр. Әјилмә јарымкечиричинин дәринлијиндә L_D гәдәр мәсафәдә өзүнү көстәрир.

Јарымкечиричинин сәтһјаны гатында електронларын вә дешикләрин консентрасијасы белә тә'јин олунур:

$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}; \quad p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}.$$

E_i - гадаған олунмуш зонанын ортасына, E_F - Ферми сәвијјәсинә ујғундур.

Бу ифадәләрдән көрүнүр ки, әкәр $E_F > E_i$ оларса $n > n_i > p$ олур. Демәли јарымкечиричинин сәтһјаны гатында n типли кечиричилик үстүнлүк тәшкил едир. $E_i = E_F$ саһәсиндә $n = p = n_i$ олур вә јарымкечиричи өзүнү мәхсуси јарымкечиричи кими апарыр. $E_F < E_i$ оланда $p > n_i > n$ вә јарымкечиричи p типли кечиричилијә малик олур.

Беләликлә, јарымкечиричинин сәтһјаны саһәсиндә түкәнмә, зәнкинләшмә вә инверсија просесләри мүшаһидә олунур.

Касыблашмыш саһә јарымкечиричинин сәтһиндә әсас јүкдашыјычылар илә ејни ишарәли јүк әмәлә кәләндә јараныр.

Инверс саһә әсас јүкдашыјычылар илә ејни ишарәјә малик олан јүксәк сыхлыглы сәтһи јүк оланда әмәлә кәлир.

Әкәр сәтһи јүкүн ишарәси јарымкечиричидәки әсас јүкдашыјычыларынын ишарәсинин әксинә оларса, онда зәнкинләшмиш саһә јараныр.

1.7. Јарымкечиричиләрдә електромагнит шүаланмасы. Дахили фотоеффект һадисәси

Фотоелектрон чиһазларынын иши шүа енержисинин тә'сири алтында електрик режиминин дәјишмәси илә әлагәдардир. Бу чиһазларда дахили фотоеффект һадисәсиндән истифадә олунур. Бу еффектин маһијјәти ондадыр ки, јарымкечиричи шүа енержиси илә ишыгландырылырса, онун електронлары атомлараррасы әлагәләри гырмаг үчүн кифајәт едән әлавә енержи әлдә едирләр. Нәтичәдә кристалда сәрбәст јүкдашыјычыларын сајы артыр, маддәнин кечиричилији чохалыр вә дахили е.һ.г. јараныр.

Ејнштејн нәзәријјәсинә көрә фотоеффект о вахт јарана биләр ки, оптик шүаланманын квантларынын енержиси електронлары валент зонасынын јерли сәвијјәләриндән кечиричилик зонасына кечирә билсин. Квантын енержиси $h\nu$, електронун чыхыш иши $q\varphi$ вә онун башланғыч сүр'әти v арасында асылылыг Ејнштејн тәрәфиндән беле ифадә олунур:

$$h\nu=q\varphi_0+mv^2/2,$$

бурада m-електронун күтләсидир.

Беләликлә, кечиричилик зонасына кечмәк үчүн електрон јарымкечиричинин гадаған олунмуш зонасынын ениндән бөјүк енержи артымы әлдә етмәлидир. Сәс рәгсләринин $h\nu_0=q\varphi_0$ шәртинин өдәнмәсини тә'мин едән ν_0 тезлијинә фотоеффектин сәрһәд тезлији дејилир. Буна ујғун олан далға узунлуғу $\lambda_0=c/\nu_0$ (c ишыг сүр'әтидир) һүдуд далға узунлуғу адланыр. $\nu<\nu_0$ тезликли рәгсләр фотоеффект јарада билмир.

Јарымкечиричинин сәтһинә дүшән ишыг квантларынын һамысы електронларла удулмур. Онларын бир һиссәси сәтһдән әкс олунур вә ја електронларын чыхышынын мүмкүн олмадығы дәринликләрдә удулур. Она көрә дә еффектив тә'сир едән квантларын сајынын сәтһә дүшән квантларын үмуми сајына нисбәти (буна квант чыхышы дејилир) бир фаиз тәшкил едир.

Дахили фотоеффект гадаған олунмуш зонанын ениндән кичик енержијә малик квантларын тә'сириндән дә баш верә биләр. Белә вәзијјәт електрон ејни вахтда шүа селинин квант енержисини вә истилик фононунун енержисини уданда јараныр. Бу һадисә фотоеффектин температурдан асылылығыны характеризә едир.

Фотоеффект заманы кечиричилик зонасында сәрбәст јүк дашыјычыларын сајынын артмасы белә тә'јин олунур:

$$\Delta n = \beta k \tau_n (1-R) \Phi; \quad \Delta p = \beta k \tau_p (1-R) \Phi$$

Бурада β-квант чыхышы, Φ-шүа сели, κ-монохроматик шүаланманын удулма әмсалыдыр.

Ионлашдырычы шүаланманын тә'сириндән јарымкечиричи материалларын кечиричилијинин артмасы фотоелектрон чиһазларын имканларыны даһа да артырыр.

Шүаланманын тәбиәтинин бу просес үчүн әһәмијјәти јохдур. Әсас шәрт одур ки, шүаланма јарымкечиричидә електрон-дешик чүтү јаратсын. Шүаланма мәнбәји кими һәм фотон мәнбәләри (күнәш енержиси, γ-шүаланма, рентген шүаланмасы), һәм дә јүксәк енержили һиссәчикләрин мәнбәји (електрон топу, β-шүаланма, α-һиссәчикләр, протонлар вә с.) истифадә олуна биләр.

Мүхтәлиф узунлуға малик далғаларын шүаландырмасы чүрбәчүр үсулларла һәјата кечирилир, лакин һәјәчанланма просесинин тәбиәти бүтүн һалларда ејни олур.

Һал-һазырда електроникада дахили фотоеффектә әсасланан бир чох фотоелектрон чиһазлары (фоторезисторлар, фотодиодлар, ишыг диодлары, фототиристорлар, фототутумлар, фотоваристорлар вә с.) кениш истифадә олунур.

1.8. Јарымкечиричи елементләрин һазырланма технолоҝијасы

Јарымкечиричи чиһазларын әсасыны *p-n* кечидләр тәшкил едир. Електрон-дешик кечидләри әсасән әритмә вә диффузија

үсуллары илә һазырланыр. Мүвафиг олараг онлара әридилмиш вә диффузија кечидләри дејилир.

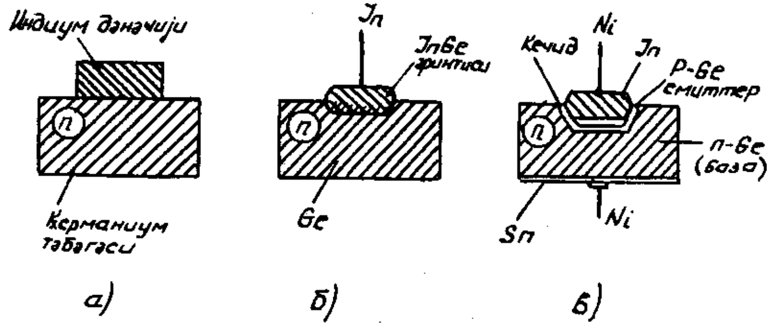
Әритмә үсулунда әсас олараг галынлығы 0,1-0,2 мкм олан *n* типли керманиум тәбәгәси көтүрүлүр. Онун үзәринә акцептор материалындан (адәтән индиумдан) ибарәт дәнәчик гојулур (шәкил 1.21*а*). Сонра тәбәгә вә дәнәчији вакуум вә ја һидрокен собасына јерләшдириб 450-550^{0}С температура гәдәр гыздырырлар ки, бу температурда дәнәчик вә тәбәгәнин она јахын олан гаты әријир вә мүәјјән тәркибли әринти әмәлә кәлир (шәкил 1.21*б* вә *в*). Бир нечә дәгигә бу температурда сахландыгдан сонра истилик кәсилир вә әринти сојудулур. Бу заман әринмиш дамланын дибиндә назик рекристаллашмыш *p* типли керманиум гаты јаныр, бәркимиш дамланын галан һиссәси исә тәмиз индиумдан ибарәт олуб *p* гаты илә омик тәмас әмәлә кәтирир. Бу тәмаса харичи никел мәфтил галајланыр. Ләвһәнин алт һиссәсинә гурғушун гаты чәкилир, бу гат *n* типли керманиум илә омик тәмас јарадыр вә она да харичи мәфтил галајланыр.

Индиум-керманиум мәһлулу вә илкин тәбәгә арасындакы сәлис сәрһәд сојујуб бәркидикдән сонра дәјишилмәмиш галыр. Она көрә әритмә үсулу пилләвари *p-n* кечидләрин алынмасында истифадә олунур. Рекристаллашмыш гатын хүсуси мүгавимәти чох кичик олур (0,001-0,1 Ом·см) вә о, даһа јүксәк мүгавимәтә малик илкин тәбәгәјә (базаја) нисбәтән емиттер ролуну ојнајыр.

Әкәр *p* типли емиттер алмаг тәләб олунурса, әсас олараг *p* гаты көтүрүлүр вә донор материалдан, әсасән сүрмә дәнәчији истифадә олунур.

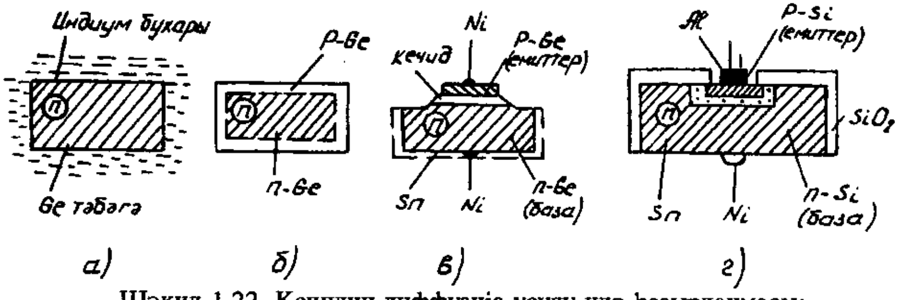
Диффузија үсулу ашгар маддәсинин илкин јарымкечиричи тәбәгәјә диффузија едилмәсинә әсасланыр.

Мәсәлән, *p* типли керманиум емиттерли *p-n* кечид алмаг үчүн *n* типли назик керманиум тәбәгәси көтүрүлүр. Бу тәбәгә акцептор маддәсинин бухары илә долу собаја јерләшдирилир. Тәбәгә керманиумун әримә температуруна гәдәр (900°С) гыздырылыр.



Шәкил 1.21. Әритмә үсулу илә кечидин һазырланмасы: *а*) илкин вәзијјәт; *б*) әритмә просеси; *в*) сон нәтичә

Бу заман акцептор атомлары интенсив сүрәтдә бухар фазасындан тәбәгәнин дәринликләринә кирир вә тәбәгәдә *p* типли назик сәтһи гат јарадырлар (шәкил 1.22). Сонра кимјәви үсул илә бу гаты тәбәгәнин башга тәрәфләриндән көтүрүр вә јалныз бир тәрәфиндә сахлајырлар. Бу үсул керманиум кечидләри үчүн характерикдир, о меза-структура адланан конусшәкилли структур әмәлә кәтирир (шәкил 1.22*в*).



Шәкил 1.22. Кечидин диффузија үсулу илә һазырланмасы: *а*) диффузија просеси; *б*) аралыг структур; *в*) сон меза-структур; *г*) планар структур

Силисиум кечидләри үчүн исә кристалын башга һиссәләрини маска (үзлүк) илә өртмәклә масканын јалныз бир һиссәсиндә олан дешикдән газ вә ја маје фазадан диффузија һәјата кечирилир. Маска кими силисиум оксидиндән истифадә олунур. Бу оксид һәм дә *p-n* кечидинин әтраф мүһитин тә'сириндән горујур. Белә структура планар структур дејилир (шәкил 1.22*г*).

Ашгарын кристала диффузијаетмә дәринлији температурдан вә диффузија мүддәтиндән (адәтән 10-20 дәг) асылы олур.

Диффузија үсулунун бир чох вариантлары мөвҹуддур.

Бу ҹүр һазырланан *p-n* кечидләр өртүкләрә салынараг диод шәклини алыр.

2. ЈАРЫМКЕЧИРИЧИ ПАРАМЕТРИК ЕЛЕМЕНТЛӘР

Бу чүр елементләрин иши харичи тә'сирдән јарымкечиричинин өз хассәләринин дәјишмәсинә әсасланыр. Онларда истифадә олунан әсас һадисә харичи амилләрин тә'сириндән електрон-дешик чүтләринин кенерасија едилмәсидир.

Јарымкечиричи параметрик чиһазларда *p-n* кечидләр олмур, онлары һәтта кечидсиз елементләр адландырырлар. Бунларын ән кениш јајылмыш нөвү јарымкечиричи резисторлардыр.

Јарымкечиричи резисторларын иш принсипи температурун, електромагнит шүаланмасынын, тәтбиг едилән кәркинлијин вә с. тә'сириндән јарымкечиричинин өз мүгавимәтинин дәјишмәсинә әсасланыр.

Терморезистор (термистор) һәчми вә ја тәбәгәли јарымкечиричи ибарәтдир. Онун мүгавимәтинин гијмәти температурдан асылы олараг дәјишир. Онлары кечид металларын (титандан синкә гәдәр) оксидләриндән ибарәт поликристал јарымкечиричи материаллар әсасында һазырлајырлар.

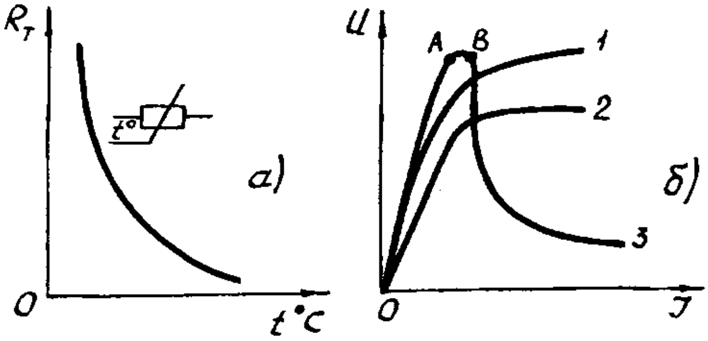
Термисторлар өз мүгавимәтләрини харичдән гыздырма вә термистордан ахан чәрәјанла гыздырма нәтичәсиндә дәјиширләр. Биринчи груп термисторлары әтраф мүһитин температуруну өлчмәк үчүн температур веричиси кими истифадә едилир. Икинчи груп елементләр исә електрик дөврәләриндә кедән просесләри тәнзим етмәк үчүн истифадә олунурлар.

Ән кениш јајылмыш термисторлар мәнфи температур әмсалына маликдирләр: температур артдыгча онларын мүгавимәти азалыр. Бу, температурун тә'сириндән терморезисторун дахилиндә сәрбәст јүкдашыјычыларынын консентрасијасынын вә онларын јүрүклүјүнүн артмасы илә әлагәдардыр. Терморезисторун мүгавимәтинин температурдан асылылығы беләдир:

$$R_T = A e^{B/T}$$

Бурада *A*-термисторун ишчи көвдәсинин өлчүләриндән вә јарымкечиричинин хүсуси мүгавимәтиндән асылы әмсал, *B*-јарымкечиричинин хүсусијјәтләри илә мүәјјән едилән температура һәссаслыг әмсалыдыр.

$R_T=f(T)$ асылылығы вә термисторун шәрти ишарәси шәкил 2.1*а*-да көстәрилмишдир. Бу асылылыға терморезисторун температур характеристикасы дејилир. Терморезистордакы көркинлијин чиһаздан ахан чәрәјандан асылылығына исә статик волт-ампер характеристикасы дејилир (шәкил 2.1*б*). Бурада бири-бириндән формасы, өлчүләри вә сојутма шәраити илә фәрг-



Шәкил 2.1. Термисторун температур (*а*) вә волт-ампер (*б*) характеристикалары

ләнән үч терморезисторун характеристикалары көстәрилмишдир. Көрүндүјү кими характеристикаларын башланғыч һиссәләри (ОА) хәтти характер дашыјыр. Чүнки чәрәјанын кичик гијмәтләриндә термисторда ајрылан күч кичикдир вә онун температуруна тә'сир көстәрмир. Чәрәјан артдыгча термисторун температуру артыр, мүгавимәти азалыр вә БС саһәсиндә көркинлик ашағы дүшүр. Бурада мүгавимәтин азалмасы чәрәјанын артмасыны габаглајыр вә бу көркинлијин азалмасына кәтириб чыхарыр (3 әјриси).

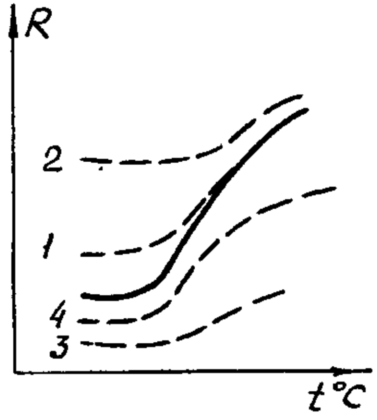
Терморезисторлар јухарыда сајыланларындан башга 20^0С-дә номинал мүгавимәт R_{THOM}; ишчи температурлар диапазону ΔT; бурахыла билән сәпәләнмә күчү P_{max} вә бир чох дикәр параметрләрлә характеризә олунурлар.

Термисторлар температурун өлчүлмәси вә тәнзим едилмәси, електрик схемләриндә кениш температур диапазонунда ишләјән мүхтәлиф елементләрдә температур дәјишмәләринин

компенсасија едилмәси, сабит вә дәјишән чәрәјан дөврәләриндә кәркинлијин стабилләшдирилмәси үчүн вә автоматика дөврәләриндә тәнзим едилән тәмассыз мүгавимәтләр кими кениш истифадә олунурлар.

Бә'зи хүсуси гурғуларда ики термистордан ибарәт вә јарымкечиричи болотометр адланан чиһазлар истифадә олунур. Бурада термисторлардан бири (актив термистор) нәзарәт едилән амилин (температурун, шүаланманын) тә'сиринә мә'руз едилир, дикәри исә (компенсасијаедичи термистор) әтраф мүһитин температурун тә'сирини компенсасија едир.

Мүсбәт температур әмсалына малик олан јарымкечиричи термисторлара позистор дејилир. Бунлар үчүн јарымкечиричи кими хүсуси ашгарлары олан бариум титан көтүрүлүр. Температур артдыгча позисторун мүгавимәти дә артыр. Позисторун температур характеристикалары шәкил 2.2-дә көстәрилмишдир. Позистору ади хәтти резисторла ардычыл вә паралел гошмагла онун характеристикасынын формасыны дәјишмәк олар. Шәкилдә бүтөв хәтлә позисторун өзүнүн характеристикасы көстәрилмишдир. 1 вә 2 әјриләри мүвафиг олараг позисторун 10 кОм вә 100 кОм мүгавимәтли резисторла ардычыл, 3 вә 4 әјриләри исә һәмин резисторла паралел гошулдуғу һала ујғун кәлир.



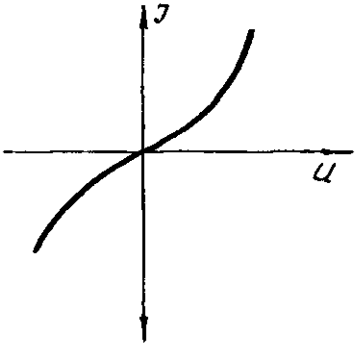
Шәкил 2.2. Позисторун температур характеристикалары

Позисторларын характеризә олундуғу әсас параметрләр термисторлара ујғундур.

Позисторлар 100 һс тезлијә гәдәр ишләјән дәјишән вә сабит чәрәјан дөврәләриндә температурун вә күчләнмәнин автоматик тәнзим едилмәси, температурун компенсасија едилмәси, гурғулары вә чиһазлары артыг гыздырылмадан мүһафизә

үчүн, чәрәјаны мәһдудлашдырычы вә стабилләшдиричи схемләрдә вә тәмассыз ачыб-бағлајычы елементләр кими истифадә олунур.

Бу нөв чиһазлардан бири дә силисиум карбиддән һазырланан варисторлардыр. Варисторун мүгавимәти тәтбиг олунан кәркинликдән асылы олур. Онун волт-ампер характеристикасы гејри-хәтти характер дашыјыр (шәкил 2.3). Характеристика симметрик олдуғундан варистор һәм дәјишән, һәм дә сабит чәрәјан дөврәләриндә ишләдилә билир.



Шәкил 2.3. Ваписторун волт-ампер характеристикасы

Чиһазын әсас параметрләри ашағыдакылардыр: чәрәјанын вә кәркинлијин сабит гијмәтләриндә статик мүгавимәт *($R_{cm}=U/J$)*, дәјишән чәрәјана көрә динамик мүгавимәт *($R_{\partial}=\Delta U/\Delta J$)*, гејри-хәттилик әмсалы-характеристиканын верилмиш нөгтәсиндә R_{cm}-нин R_{∂}-јә нисбәти *($\beta=R_{cm}/R_{\partial}$)*, гејри-хәттилик көстәричиси *($\alpha=1/\beta=R_{\partial}/R_{cm}$)*, импулс кәркинлијинин ән бөјүк амплитуду, бурахыла билән сәпәләнмә күчү .

Варисторун ишчи кәркинлијини ахырынчы ики параметрә көрә тә'јин едирләр.

Варисторлар електрик кәмијјәтләринин тәнзим едилмәси, чәрәјанын вә кәркинлијин стабилләшдирилмәси, чиһазларын вә схемләрин артыг кәркинликдән мүһафизә едилмәси үчүн истифадә олунур.

3. ЈАРЫМКЕЧИРИЧИ ДИОДЛАР

Бир *p-n* кечидинә малик олан вә ики електрик чыхышы олан чиһаза јарымкечиричи диод дејилир. Јарымкечиричи диодлар тә'јинатларына, конструктив техноложи хүсусијјәтләринә вә материалынын нөвүнә көрә тәснифатлашдырылыр.

Тә'јинатларына көрә диодлар ашағыдакы нөвләрә бөлүнүрләр: дүзләндиричи диодлар, импулс диодлары стабилитронлар (дајаг диодлары), варикаплар, тунел диодлары, шоттки диодлары вә с.

Конструктив-техноложи хүсусијјәтләринә көрә мүстәви вә нөгтәви диодлар олур.

Диодлар керманиумдан, силисиумдан, селендән, силисиум карбиддән, галлиум арсениддән һазырланырлар.

Әксәр диодларын иш принсипи кечиддә баш верән һадисәләрә әсасланыр. Електрон-дешик кечиди, метал-јарымкечиричи тәмасы вә һетерокечидләр ән чох истифадә олунур. Јарымкечиричи диода електрик дөврәсиндә гејри-хәтти волт-ампер характеристикасына малик икигүтблү кими бахмаг олар.

Диодлар електрик сигналлары үзәриндә мүхтәлиф чеврилмәләр (дүзләндирмә, детектә етмә, тезлијин чохалдылмасы, ишыг енержисинин електрик енержисинә чеврилмәси вә с.) апарырлар.

3.1. Дүзләндиричи диодлар

Ади дүзләндиричи диодлар мәһдуд тезлик диапазонунда (50һс-100кһс) дәјишән чәрәјаны сабит чәрәјана чевирмәк үчүн истифадә олунурлар.

Диодлар дүзүнә чәрәјанын орта гијмәтинә көрә алчаг күчлү $(J_{дүз.ор}<0,3A)$, орта $(0,3<J_{дүз.ор}<10A)$ вә бөјүк күчлү $(J_{дүз.ор}>10A)$ диодлара бөлүнүрләр.

Һал-һазырда силисиумдан вә керманиумдан һазырланан мүстәви диодлар кениш истифадә олунур. Силисиум диодлары гадаған олунмуш зонанын ени бөјүк олдуғуна көрә кичик әкс

чәрәјана малик олурлар вә керманиум диодларына нисбәтән даһа јүксәк әкс кәркинлијә дөзүрләр. Силисиум диодларында база гатынын мүгавимәти бөјүк олдуғундан јүк чәрәјанынын ејни гијмәтиндә керманиум диодуна нисбәтән дүз гошулма режиминдә кәркинлик дүшкүсү даһа бөјүк олур.

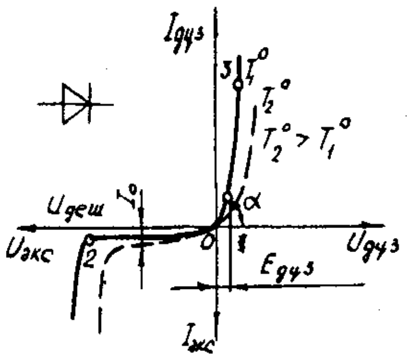
Дүзләндиричи диодларын база (адәтән n типли) гатынын мүгавимәти $(r_б)$ онларла Ом һәддиндә олур. Дүзүнә чәрәјанын тә'сириндән бу мүгавимәтдә $J_{дүз}\cdot r_б$ кәркинлик дүшкүсү јараныр вә бу да p-n кечидинә тәтбиг едилән дүзүнә кәркинлији азалдыр. Она көрә волт-ампер характеристикасынын дүз голу (шәкил 3.1, I квадрант) бу шәкилдә ифадә

$$J_{дүз} = J_o\left(e^{\frac{U_{дүз}-J_{дүз}r_б}{\varphi_T}} - 1\right)$$

олунур:

Реал дүзләндиричи диодун волт-ампер характеристикасы p-n кечидинин нәзәри характеристикасына нисбәтән кичик чәрәјанлар саһәсинә тәрәф сүрүшмүш олур.

Әкс кәркинлик саһәсиндә дә (III квадрант) реал характеристика p-n кечидинин нәзәри характеристикасындан фәргләнир. Реал диодда әкс чәрәјан кечидин әкс чәрәјаны J_0, јарымкечиричинин һәчминдә термокенерасија чәрәјаны J_T вә кечидин сәтһиндәки сызма чәрәјанынын J_c чәминә бәрабәр олур:



Шәкил 3.1. Дүзләндиричи диодун волт-ампер характеристикасы

$$J_{экс} = J_0 + J_T + J_c$$

Диодун волт-ампер характеристикасынын ишчи һиссәси дүз гошулма һалына ујғун кәлән хәтти (омик) һиссәдир (шәкил 3.1, 1-3 һиссәси). Бу

һиссәдә характеристиканын дүз голуну сыныг хәтлә (0-1 вә 1-3 һиссәләри) аппроксимасија едирләр:

$$U_{дүз} > E_{дүз} \text{ оланда } J_{дүз} = \frac{U_{дүз} - E_{дүз}}{r_б}$$

$$U_{дүз} \leq E_{дүз} \text{ оланда } J_{дүз} = 0$$

Бурада $r_б = 1/tg\alpha$; $E_{дүз} \approx (0{,}5\text{-}0{,}7)\Delta\varphi_0$

Дүзләндиричи схемләрдә диодларын иши ашағыдакы параметрләрлә характеризә олунур:

$J_{дүз.ор}$ - орта дүз чәрәјан (диодун һәддиндән чох гызмамасы шәртилә узун мүддәт ахан дүзләндирилмиш чәрәјанын орта гијмәти);

$U_{дүз.ор}$ - орта дүз кәркинлик ($J_{дүз.ор}$-нын верилмиш гијмәтиндә волт-ампер характеристикасындан биргијмәтли тә'јин едилән дүзүнә кәркинлик дүшкүсүнүн орта гијмәти);

$J_{әкс}$ - диодун сабит әкс чәрәјаны;

$U_{әкс}$ - диодун әкс кәркинлији;

Δf - диодун чәрәјанын верилән һәддән ашағы дүшмәмәси тә'мин едилән ишчи тезлик диапазону;

$C_{д\ әкс}$ - әкс гошулмада диодун тутуму.

Диодлар һәм дә ашағыдакы һүдуд електрик режими параметрләрилә дә характеризә олунурлар:

$U_{әкс\ max}$ - чиһазын нормал ишини позмајан максимал бурахыла билән әкс кәркинлик (дешилмә кәркинлијиндән 20% аз көтүрүлүр);

$J_{дүз\ max}$ - диодун максимал бурахыла билән дүз чәрәјаны;

$T_{к.max}$ - чиһазын көвдәсинин бурахыла билән һүдуд температуру;

P_{max} - максимал бурахыла билән сәпәләнмә күчү;

f_{max} - ишчи тезлијин максимал гијмәти.

Бөјүк күчлү дүзләндиричи диодлара күч вентилләри дејилир. Бурахыла билән әкс кәркинлији артырмаг үчүн бир нечә диоду ардычыл гошурлар (бунлара јүксәкволтлу сүтунлар деји-

лир), $J_{дүз.ор}$ -ы артырмаг үчүн исә бир нечә дүзләндиричи диоду паралел гошурлар.

Јүксәк тезликли диодлар 600 Mhc тезлијә гәдәр диапазонда дүзләндирмә, детектә етмә вә сигналларын гејри-хәтти чеврилмәләри үчүн истифадә олунур. Онлар әсасән керманиумдан вә силисиумдан һазырланыр вә нөгтәви структура малик олурлар. Белә структур *p-n* кечидинин тутумунун чох кичик олмасыны (1 пФ-а гәдәр) тә′мин едир вә бу исә јүксәк тезликләрдә ишләмәјә имкан верир. Кечидин *n* вә *p* гатларынын тәмас саһәси чох кичик олдуғундан кечид саһәсиндә бөјүк күч сәпәләнмәси мүмкүн олмур вә бу сәбәбдән белә диодлар бөјүк кәркинликли вә чәрәјанлы схемләрдә ишләдилә билмирләр. Онлар алчаг кәркинликли вә зәиф чәрәјанлы дүзләндиричиләрдә вә өлчмә гурғуларында истифадә олунур. Бунларын мүсбәт хүсусијјәти ондадыр ки, мүстәви диодлара нисбәтән әкс чәрәјан температурдан аз асылыдыр, онларын әсас параметрләри ади диодлара ујғундур. Әлавә олараг бу чиһазлар ашағыдакы параметрләрлә характеризә олунурлар:

$C_д$ - үмуми тутум (сүрүшмә кәркинлијинин вә тезлијин верилмиш гијмәтиндә сыхачларда өлчүлән тутум);

$r_{диф}$ - диференсиал мүгавимәт (диоддакы кәркинлик артымынын бу артымы јарадан чәрәјан артымына нисбәти);

Δf - тезлик диапазону.

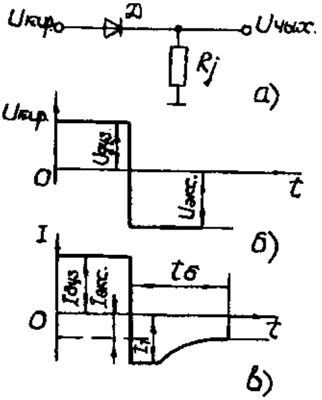
Јүксәк тезликли диодлар детектор, мәһдудлашдырычы, ачар схемләриндә, гејри-хәтти мүгавимәт схемләриндә истифадә олунур.

3.2. Импулс диодлары

Бу диодлар гошулма мүддәти бир микросанијәдән кичик олан ити сүр’әтли импулс схемләриндә истифадә олунур. Белә иш режимини тә′мин етмәк үчүн диодлар бә’зи конструктив-техноложи хүсусијјәтләрә малик олмалыдырлар. Диодларын әталәтлилији сәдд тутуму вә јүк дашыјычыларын кечид јахынлығында јығылан јүкү илә мүәјјән едилир. Импулс диодларыны

фәргләндирән чәһәт ондадыр ки, онларда електрик кечидинин саһәси вә базада гејри-таразлыг јүкдашыјычыларын јашама мүддәти аздыр.

Диодун гошулма схеми, чәрәјан вә кәркинлик диаграмлары шәкил 3.2-дә көстәрилмишдир. Диод ачыг оланда (дүз гошулмада) $J_{дүз} = U_{кир}/R_j$ олур. Әкс кәркинлик пилләвари дәјишәндә диод ани бағлана билмир. Илк анда әкс чәрәјан J_l кәскин артыр вә сонра дајанықлы вәзијјәтә $J_{әкс}$ кәлиб чыхыр. Бу һадисә ачыг p-n кечидинин јүкдашыјычыларыны топлама еффектинә малик олмасы илә әлагәдардыр. Бу еффектин маһијјәти белә изаһ олуна биләр. p-n кечиддән дүз чәрәјан аханда јүкдашыјычыларынын инжексијасы баш верир вә кечид јахынлығында гејри-әсас таразлыгсыз јүкдашыјычыларын консентрасијасы кечид саһәсиндә гејри-әсас таразланмыш јүкдашыјычыларын консентрасијасындан хејли артыг олур. Дүз чәрәјан нә гәдәр бөјүк олса гејри-әсас јүкдашыјычыларын консентрасијасы вә кәркинлик әкс истигамәтдә дәјишилән анда әкс чәрәјан бир о гәдәр чох олур. Таразлыгсыз дашыјычыларын өмрү мәһдуд олдуғундан рекомбинасија нәтичәсиндә вә кечиддән кетмәк һесабына онларын консентрасијасы тәдричән азалыр. Она көрә дә мүәјјән $t_б$ мүддәтиндән сонра таразлыгсыз гејри-әсас јүкдашыјычылары тамамилә јох олурлар вә әкс чәрәјан нормал гијмәтини алыр (бәрпа олунур).



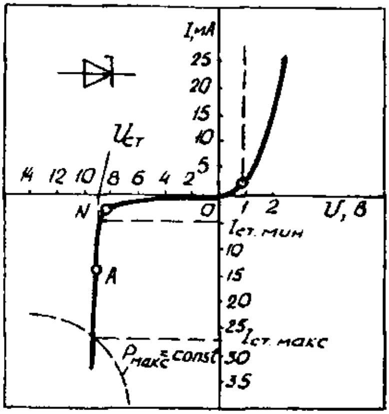
Шәкил 3.2. Импулс диодунун гошулма схеми, чәрәјан вә кәркинлик диаграмлары

Диод әсасән кечид характеристикасы, бәрпа мүддәти $t_б$, үмуми тутум $C_д$, дүз импулс кәркинлији $U_{дүзи}$, дүз импулс чәрәјаны $I_{дүзи}$ вә дүз чәрәјанын истигамәти әксә дәјишиләндә харичи дөврәјә ахан ифрат јүклә $Q_д$ характеризә олунур.

3.3. Стабилитронлар

Стабилитронлар електрик схемләриндә кәркинлији сабит сахламаг үчүн истифадә олунур. Онларын волт-ампер характеристикасынын дешилмә һиссәсиндә кәркинлијин гијмәти чәрәјандан зәиф асылы олур. Бу чиһазларын характеристикаларынын ишчи һиссәси әкс гошулма режиминә ујғун кәлән әкс голдур (шәкил 3.3). Бурада характеристика демәк олар ки, чәрәјан охуна паралел олур вә ишчи кәркинлик исә дешилмә кәркинлији һесаб олунур. Әкәр чиһаздан ахан чәрәјан мәһдудлашдырыларса дешилмә вәзијјәти стабилитронларда 10 минләрлә саат әрзиндә сахланыла вә бәрпа олуна биләр.

Бу чиһазлар әввәлләр һәм дә дајаг диодлары адланмышдыр. Стабилитронун иш принсипи *p-n* кечидиндә електрик дешилмәси һадисәсинә әсасланыр. Јухарыда дејилдији кими база гатында ашгарларын нисбәтән кичик консентрасијасында кечиддә селвари дешилмә, ашгарларын јүксәк консентрасијасында исә тунел дешилмәси баш верир. Биринчи һал јүксәк кәркинликли ($U_{ст}$>6,3в), икинчи исә алчаг кәркинликли ($U_{ст}$<6,3в) стабилитронларда истифадә олунур.



Шәкил 3.3. Стабилитронун волт-ампер характеристикасы

Силисиум диодларынын характеристикасынын дүз голунда да кәркинлик сабит галдығындан (гырыг хәтт) бу еффект стабилиторларын ишиндә истифадә олунур.

Стабилитронлар бир чох параметрләрлә характеризә олунурлар. Бунлардан номинал стабиллəшдирмә кәркинлијини $U_{ст.ном}$, $J_{ст.min}$, $J_{ст\ мах}$, P_{max}, $J_{ст.ном} \approx \frac{J_{ст.max} - J_{ст.min}}{}$ диференсиал мүга-

виміэти $r_\partial = dU_{ст}/dJ_{ст}$, стабилләшдирмә кәркинлијинин температур әмсалыны ($J_{ст}$=const оланда) көстәрмәк олар.

Тунел дешилмәсиндә $\alpha_{ст}$ мәнфи, селвари дешилмәдә мүсбәт олур. $\alpha_{ст}$-и азалтмаг үчүн стабилитрона паралел олараг әкс ишарәли әмсала малик диодлар гошулур.

Јарымкечиричи стабилитронлар әсасән параметрик вә компенсасија типли стабилизатор схемләриндә истифадә олунур. Сәпәләнмә күчүнүн бурахыла билән гијмәтинә көрә кичик күчлү (P_{max}<0,3Вт), орта (0,3<$P_{max} \leq$5Вт) вә бөјүк күчлү (P_{max}>5Вт) стабилитронлар мөвчуддур.

3.4. Тунел диоду

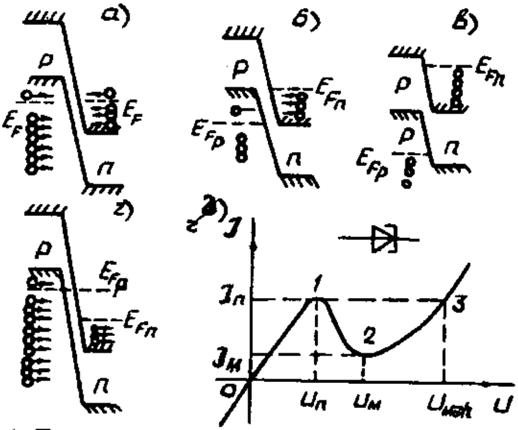
Тунел диодларынын иш принсипи електрон-дешик кечидиндә баш верән тунел еффектинә әсасланыр. Тунел еффекти чиһазын волт-ампер характеристикасында дүз гошулма һалында мәнфи мүгавимәтли һиссәнин јаранмасына кәтириб чыхарыр (шәкил 3.4*д* 1-2 һиссәси).

Дејилдији кими тунел еффекти ондан ибарәтдир ки, саһә кәркинлијинин јүксәк гијмәтиндә вә *p-n* кечидин ени кифајәт гәдәр кичик оланда потенсиал сәддинин һүндүрлүјүндән аз енержијә малик олан електронларын валент зонасындан кечиричилик зонасына «сивишмәси» баш верир. Бу заман електронун енержиси дәјишмир.

Көрүнүр ки, *p* гатынын валент зонасы вә *n* гатынын кечиричилик зонасы үст-үстә дүшдүјүндән бу зоналарын електронлары ејни енержи сәвијјәләриндә олурлар. Ферми сәвијјәси мүвафиг ичазә верилмиш зоналар дахилиндә олур. Бу сәвијјәдән јүксәк енержијә малик олан електронларын сајы чох олмур. Харичи кәркинлик олмајанда гаршылыглы "сивишән" електрон ахынлары бәрабәр, диоддан кечән чәрәјан исә сыфра бәрабәр олур.

Әкәр диода кичик дүз кәркинлик верилсә потенсиал сәддинин һүндүрлүјү азалыр вә зоналарын аз һиссәси үст-үстә дүшүр. Бу заман *n* гатындан *p* гатына "сивишән" електронларын

ахыны дәјишмир, әкс истигамәтдәки ахын исә кифајәт гәдәр азалыр (шәкил 3.4*б*). Нәтиҹәдә *p* гатындан *n* гатына јөнәлмиш ҹәрәјан јараныр вә онун гијмәти кәркинлик артдыгҹа максимал гијмәтә $J_п$ чатыр (0-1 һиссәси). $U_п$ кәркинлијиндә *n* гатынын Ферми сәвијјәси *p* гатынын валент зонасынын өн јухары сәрһәдинә ујғун кәлир. Дүз кәркинлијин даһа да артырылмасы нәтиҹәсиндә диодун ҹәрәјаны минимал J_m гијмәт алыр (1-2 саһәси). Бу, "сивишән" електронларын сајынын азалмасы илә әлагәдардыр. Бунун сәбәби исә ондадыр ки, зоналарын үст-үстә дүшмә дәрәҹәси азалдыгҹа *n* гатынын кечириҹилик зонасында *p* гатынын валент зонасынын јухары сәрһәдинин енержисиндән аз енержиси олан електронларын сајы азалыр. $U_м$ кәркинлијиндә *p* гатынын валент зонасынын јухары сәрһәди *n* гатынын кечириҹилик зонасынын ашағы сәрһәди илә үст-үстә дүшүр (шәкил 3.4*в*). Кәркинлијин сонракы артымы дүз ҹәрәјаны артырыр (шәкил 3.4*д*). Бу ади диодда олдуғу кими кечидин потенсиал сәддинин азалмасы илә әлагәдардыр.



Шәкил 3.4. Тунел диодунун енержи диаграмлары (*а-г*) вә волт-ампер характеристикасы (*ғ*)

Әкәр тунел диодуна әкс кәркинлик тәтбиг едиләрсә *n* гатындан p гатына "сивишән" електрон ахыны демәк олар ки, дәјишмир, гаршы истигамәтдәки ахын исә зоналарын үст-үстә

дүшмә дәрәчәси чохалдығындан артыр (шәкил 3.4*г*). Нәтичәдә әкс кәркинлијин кичик артымындан әкс чәрәјан артмаға башлајыр.

Тунел диодлары зирвә чәрәјаны $J_п$, минимал чәрәјан $J_М$, зирвә кәркинлији $U_п$, $J_м$ -ә ујғун кәркинлик $U_в$, $J_п/J_в$ нисбәти, араланма кәркинлији тутум $U_м$, $C_д$ вә дикәр параметрләрлә характеризә олунурлар.

Бу диодлар күчләндиричиләрдә, кенераторларда вә ачар гурғуларында истифадә олунур.

3.5. Варикаплар

Хүсуси конструксијаја малик олан вә дәјишән тутумлу конденсатор кими истифадә едилән јарымкечиричи диода варикап дејилир. Варикапын иш принсипи електрон-дешик кечидинин тутумунун тәтбиг едилән кәркинликдән асылылығына әсасланыр.

Варикапын тутуму *p-n* кечидинин тутуму илә характеризә олунур. Мә'лумдур ки, кечидин һәчми јүкү кәркинликдән асылы олараг дәјишир. Она көрә мүстәви *p-n* кечидинин јүкләри сајча бәрабәр ишарәчә әкс олан ики кечиричи сәтһдән ибарәт систем кими, башга сөзлә мүстәви конденсатор кими тәсәввүр етмәк олар.

Кечидин һәчми јүкүнүн дәјишмәсинин бу дәјишмәни әмәлә кәтирән кәркинлијин дәјишмәсинә нисбәтинә кечидин сәдд (јүк) тутуму дејилир:

$$C_к = \frac{\Delta q}{\Delta u}$$

Мүстәви конденсатор үчүн $C=\varepsilon\varepsilon_0 S/l$ –дир.

Кечидин ени исә белә тә'јин едилир:

$$l_k = \sqrt{\frac{2\,\varepsilon\varepsilon_0\,|\Delta\varphi_0 - U|}{qN_д}}$$

Буну нәзәрә алсаг:

$$C_k = S\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 qN_\partial}{2\,|\Delta\varphi_0 - U\,|}}$$ аларыг.

Бурада S - кечидин саhәси, U - тәтбиг едилән кәркинликдир.

Көрүндүјү кими, тутумун гијмәти кәркинликдән асылыдыр. Бу асылылыға волт-фарад характеристикасы дејилир (шәкил 3.5).

Шәкил 3.5. Варикапын волт-фарад характеристикасы

Сәдд тутуму һәм дә хүсуси мүгавимәтдән, дашыјычыларын јүрүклүјүндән, кечидин ениндән, саһәсиндән дә асылыдыр. Хүсуси мүгавимәт вә јүрүклүк чох олдугча тутум азалыр. Дүз кәркинликдә кечидин ени азалыр вә тутум артыр. Әкс кәркинлик артанда һәчми јүк саһәси артыр вә сәдд тутуму азалыр.

Дүз кәркинликдә дүз чәрәјан артыр вә базада дешикләрин гејри-таразлыг консентрасијасы чохалыр. Бу конденсаторун лөвһәләриндә кәркинлијин тә'сириндән јүкләрин мүтәнасиб артмасына бәнзәјир.

Базаја инжексија едилмиш јүкүн дәјишмәсинин кәркинлијин дәјишмәсинә нисбәтинә кечидин диффузија тутуму дејилир:

$$C_\partial = \frac{\Delta Q_{инж}}{\Delta U}$$

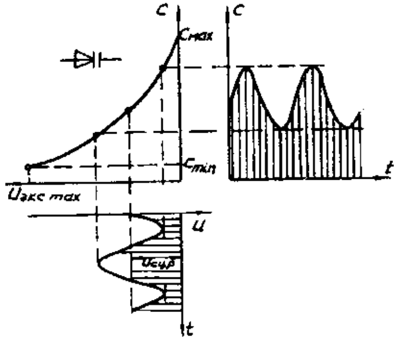
Бу тутум дүз чәрәјандан асылыдыр:

$$C_\partial = \frac{1}{\varphi_T \left(J + J_0\right) \tau_{p_n}}$$

Дүз кәркинликдә сәдд тутуму диффузија тутумундан аздыр. Әкс кәркинликдә (0,1В-а гәдәр) $C_\partial = 0$ олур вә јалныз $C_к$ нәзәрә алыныр.

Варикапларда кечидин әкс истигамәтдә гошулмасы заманы онун сәдд тутумунун дәјишмәсиндән истифадә олунур. Әкс

кәркинлији дәјишмәклә сәдд тутумуну демәк олар ки, әталәтсиз олараг узаг мәсафәдән дәјишмәк олар (шәкил 3.6). Белә идарә олунан тутум рәгс контурларынын резонанс тезликләринин дәјишмәси, јүксәк тезликли сигналларын күчләндирилмәси вә кенерасија едилмәси, амплитуд вә тезлик модулјасијасы үчүн истифадә едилир.



Шәкил 3.6. Кәркинлијин дәјишмәси илә варикапда сәдд тутумунун идарә олунмасы диаграмы

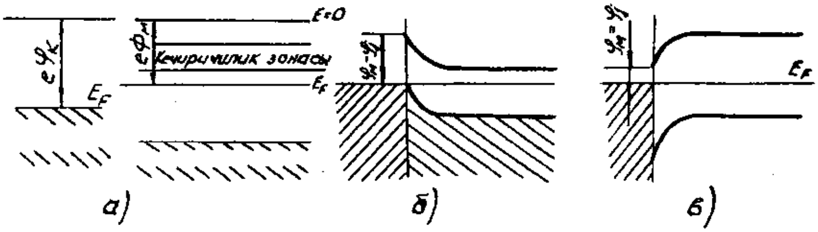
Варикапын параметрләри: $C_{ном}$- верилмиш сүрүшмә кәркинлијиндә кечидин тутуму, C_{min}, C_{max}, (минимал вә максимал сүрүшмәјә ујғун), тутума көрә өртүлмә әмсалы $K_c=C_{max}/C_{min}$, тутумун температур әмсалы $Т.Т.Ә=\frac{\Delta C}{C_{ном}}\cdot\frac{1}{\Delta T}$ (1^0С температурдан тутумун нисби дәјишмәсини көстәрир), P_{max}, U_{max} вә с.

3.6. Шоттки диоду

Шоттки диодларыны фәргләндирән чәһәт одур ки, онларын кечидләриндә гејри-әсас јүкдашыјычыларын инжексијасы олмур вә бу диодлар әсас јүкдашыјычылары илә ишләјирләр. Белә кечид металын *n* типли јарымкечиричи илә тәмасындан јарана биләр. Шоттки кечидиндә јүк дашыјычыларынын јығылмасы вә сорулмасы илә әлагәдар олан диффузија тутуму олмур, бу исә диодун дүз истигамәтдән әксә гошулма сүр'әтини артыр. Белә гошулманын мүддәти јалныз сәдд тутуму илә мүәјјән едилир вә кичик саһәли диодлар үчүн наносанијәнин онда бири-јүздә бири һәддиндә олур. Ујғун олараг диодларын ишчи тезлији 3-15 Ғһс сәрһәдиндә олур. Ачыг Шоттки кечидиндә кәркинлик дүшкүсү *p-n* кечидинә нисбәтән кичик олур. Бунун сәбәби одур ки, бөјүк мүгавимәтли тәмасдан һәтта кичик илкин чәрә-

јан аханда да ајрылан истилик енержисинин тә'сириндән әлавә термоелектрон емиссијасы баш верир вә дүз чәрәјанда иштирак едән јүкдашыјычыларынын сајы артыр.

Шәкил 3.7*а*-да вакуумда јерләшдирилмиш вә бир-бириндән изолә едилмиш метал вә *n* типли јарымкечиричинин зона диаграмлары көстәрилмишдир. Електрона металдан вакуума чыхмаг үчүн $q\varphi_M$ гәдәр, јарымкечиричидән вакуума чыхмаг үчүн исә $q\varphi_j$ гәдәр енержи вермәк лазымдыр. Әкәр металын чыхыш иши јарымкечиричининкиндән чох оларса, тәмас јарананда електронларын јарымкечиричидән метала ахыны үстүнлүк тәшкил едәчәкдир. Нәтичәдә метал мәнфи, јарымкечиричи мүсбәт јүкләнәчәк вә тәмас сәрһәддиндә онларын арасында тәмас потенсиал фәрги јаранаҹагдыр.



Шәкил 3.7. Метал *n*-типли јарымкечиричи кечидин зона диаграмлары

Електронларын истигамәтләнмиш һәрәкәти (ахыны) Ферми сәвијјәләри бәрабәрләшәнә кими давам едәчәкдир (шәкил 3.7*б*). Електронларын тәмасјаны саһәдән кетмәси нәтичәсиндә јарымкечиричинин бу саһәсиндә түкәнмә баш верир вә онун мүгавимәти чохалыр. Јарымкечиричидә фәза јүкү саһәсинин ени бир нечә микрометр, металда исә 10^{-4}мкм-дән аз олдуғуна көрә тәмасјаны саһәдә јарымкечиричинин енержи зоналары јухары әјилир. Әмәлә кәлмиш сәдди дәф етмәк вә бир маддәдән дикәринә кечмәк үчүн електрон Ферми сәвијјәсинин енержисиндән әлавә $q(\varphi_M-\varphi_j)$ енержисинә малик олмалыдыр. Јарымкечиричинин түкәнмиш тәмасјаны гаты тәмасдан чәрәјан

ахмасына мане олур вә сәрһәди бағлајычы рол ојнајыр. Бу һалда харичи кәркинлик дахили саһә илә ејни истигамәтдә оларса, һәчми јүк саһәсинин ени чохалыр. Харичи кәркинлик әкс истигамәтдә оланда исә бу саһәнин ени азалыр. Беләликлә, түкәнмиш гат јарананда металын јарымкечиричи илә тәмасы дүзләндиричи хүсусијјәтә малик олур вә белә тәмасын характеристикасы ади *p-n* кечидин характеристикасына ујғун олур.

Әкәр металын чыхыш иши јарымкечиричидән аз оларса, електронлар әсасән металдан јарымкечиричијә ахачаглар вә зоналарын әјилмәси әкс истигамәтдә олачагдыр (шәкил 3.7*в*). Тәмасјаны гат дашыјычыларла зәнкинләшир, јарымкечиричидә електронларын консентрасијасы чохалыр вә онун мүгавимәти азалыр. Бу мүгавимәт кәркинлијин ишарәсиндән асылы олмајараг һәмишә кичик олур. Она көрә белә тәмаслар дүзләндирмә хүсусијјәтләринә малик олмур вә онлар омик кечидләр вә микросхемләрин елементләрини харичи дөврәјә бирләшдирмәк үчүн истифадә едилир. Шоттки диодларынын хүсусијјәтләриндән бири дә одур ки, онларын волт-ампер характеристикасы експоненсиал характер дашыјыр ($J = J_0(e^{U/\varphi_T} - 1)$). Бу, диодлары пресизион (дәгиг) логарифмләјичи елементләр кими ($U = \varphi_T \ln J/J_0$ олдуғуна көрә) истифадә етмәјә имкан верир.

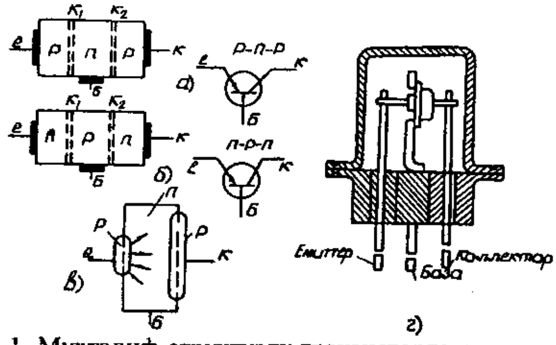
Шоттки сәдләри силисиум илә молибден, нихром, гызыл, алүминиум вә башга металларда тәмас јарадыланда алыныр. Ачыг кечиддә кәркинлик дүшкүсүнүн кичик олмасы вә ити сүр'әтли гошулманын мүмкүнлүјү белә кечиддә гурулмуш чиһазлары рәгәм схем техникасында, мәнтиг елементләриндә истифадә етмәјә имкан верир.

4. БИПОЛЈАР ТРАНЗИСТОРЛАР

Ики *p-n* кечидә малик олан вә үч гатлы јарымкечиричи гурулушундан ибарәт чиһаза биполјар транзистор дејилир. Гатларын бир-биринин ардынча јерләшмәси ардычыллығындан асылы олараг онларын ики нөвү *p-n-p* (шәкил 4.1*а*) вә *n-p-n* (шәкил 4.1*б*) олур. Бу чүр транзисторлар әритмә вә ја диффузија үсулу илә јухарыда изаһ едилән технолокија әсасында әсасән силисиумдан вә керманиумдан һазырланырлар.

"Биполјар" сөзү чиһазда чәрәјанын һәр ики ишарәли јүкдашыјычыларын (електрон вә дешик) һәрәкәти нәтичәсиндә јаранмасы илә әлагәдардыр.

Јарымкечиричи структурда әсас (база) ролуну орта гат ојнајыр. Кәнар гатлар донор вә ја акцептор ашгарларынын диффузијасы (вә ја әридилмәси) јолу илә јарадылыр. Бу гатларын бири емиттер, дикәри исә коллектор адланыр. Мүвафиг кечидләр дә һәмин адлары дашыјырлар. Емиттер кечиди јүк дашыјычыларыны базаја инжексија едир, коллектор кечиди исә базадан кечиб кедән јүкдашыјычыларыны јығыр (екстраксија едир). Еммитерин инжексија етдији базадан кечән дашыјычыларын һамысыны јығымаг үчүн коллектор кечидинин саһәси емиттер



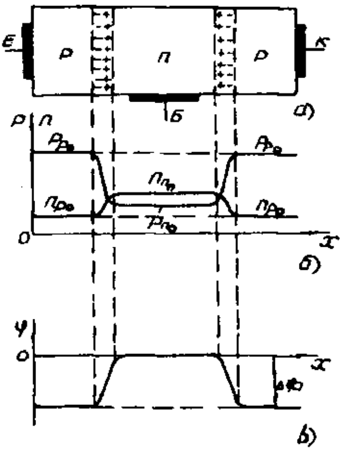
Шәкил 4.1. Мүхтәлиф структурлу транзисторларда гатларын јерләшмә ардычыллығы, онларын шәрти ишарәләри (*а*, *б*), емиттер вә коллектор кечидләринин гаршылыглы јерләшмәси (*в*) вә транзисторун үмуми көрүнүшү

кечидинин саһәсиндән чох олур (шәкил 4.1*в*).

4.1 Транзисторун иш принсипи

Транзисторун иш принсипини *p-n-p* типли чиһазын мисалында өјрәнәк. Харичи кәркинлик мәнбәји олмајанда јүкдашыјычыларынын консентрасијасынын вә һәчми јүкләрин јаратдығы потенсиал фәргинин пајланмасы шәкил 4.2-дә көстәрилмишдир.

Көрүндүјү кими p_{po} >> n_{no}, јә'ни база даһа јүксәк мүгавимәтә маликдир. Билдијимиз кими харичи мәнбә олмајанда гатларын сәрһәдләриндә дахили електрик саһәси јараныр вә гатлар арасында потенсиал фәрги тә'сир көстәрир.

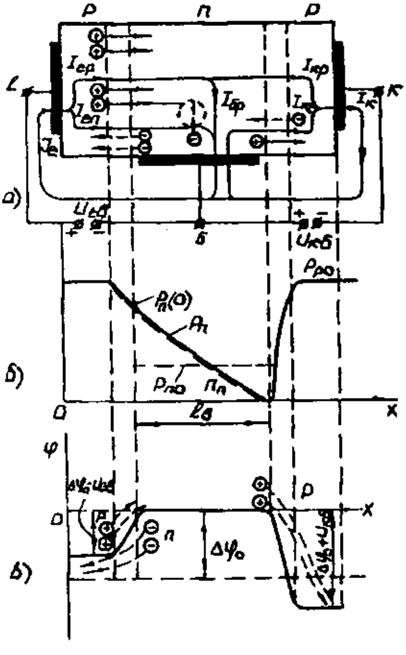


Шәкил 4.2. Харичи кәркинлик мәнбәји олмајан һалда транзисторун гатларында јүкдашыјычылаырнын консентрасијасынын (*б*) вә кечидләрдә потенсиал фәргинин (*в*) пајланмасы

Бу сәдд һәр ики кечиддә елә гијмәт алыр ки, диффузија вә дрејф селләри таразлыгда олур вә кечиддән кечән чәрәјан сыфра бәрабәр олур. Базанын потенсиалы шәрти олараг сыфра бәрабәр көтүрүлдүјүндән потенсиалын пајланмасы мәһз шәкилдә көстәрилән кими олачагдыр, чүнки кәнар гатларда јүкдашыјычыларынын консентрасијасы бәрабәрдир (p_{p0}= p_{p0}).

Харичи кәркинлик мәнбәләри ($U_{еб}$ вә $U_{кб}$) мүвафиг олараг емиттер кечидинә дүз, коллектор кечидинә исә әкс истигамәтдә гошулур (шәкил 4.3*а*). $U_{еб}$ кәркинлијин тә'сириндән дешикләр үчүн емиттер кечидиндә потенсиал сәдди азалыр ($\Delta\varphi_0$ -$U_{еб}$) вә онларын бөјүк бир һиссәси диффузија тә'сириндән емиттердән базаја инжексија едилир.

Ејни заманда електронларын да базадан емиттерә диффузија сели чохалыр. Дүз гошулмуш кечидин дрејф чәрәјанынын чох кичик олдуғуну нәзәрә алсаг, емиттер чәрәјаны белә тә'јин едилә биләр: $J_е=J_{ер}+J_{еn}$. $J_{ер}$-дешикләрин, $J_{еn}$ исә електронларын һәрәкәти илә јаранан чәрәјандыр. $J_{еn}$ кириш дөврәсиндә гапаныр вә чыхыш дөврәсиндә коллектор чәрәјаныны јаратмаг үчүн истифадә едилир. Емиттер кечидинин иши јүкдашыјычыларын базаја инжексија едилмәсиндән ибарәтдир. Кечидин иши инжексија әмсалы илә гијмәтләндирилир: $\gamma = J_{ер}/J_е$. Кечидин кејфијјәтинин јахшы олмасы үчүн $J_{ер}>>J_{еn}$ олмалыдыр ки, буну да $p_{рo}>>n_{по}$ шәртини өдәмәклә тә'мин едирләр. Адәтән γ=0,97-0,995 һәддиндә олур.



Шәкил 4.3. Харичи кәркинлик мәнбәләри гошуланда транзисторун гатларында јүкдашыјычыларынын консентрасијасынын (*б*) вә кечидләрдә потенсиалын (*в*) пајланмасы

Базаја дахил олан дешикләр орада сәрһәдјаны саһәдә дешикләрин консентрасијасыны илкин $p_{по}$-а нисбәтән артырырлар. Базада емиттер кечиди сәрһәддиндә дешикләрин консентрасијасынын гијмәти ($p_n(0)$) тәтбиг едилән $U_{еб}$ кәркинлијиндән асылыдыр:

$$p_n(0)= p_{по}e^{U_{еб}\,/\,\varphi_T}$$

$p_n(0)$ консентрасијанын градијентинин тә'сириндән дешикләр аз консентрасија истигамәтиндә коллектора тәрәф һәрәкәт едирләр. Базада коллектор сәрһәдди јахынлығында дешикләрин консентрасијасы сыфра дүшүр, чүнки сәрһәддә чатан һәр бир дешик әкс гошулмуш коллектор кечидинин

мәнфи електрик саһәсилә сүр'әтләндириләрәк коллектор гатына кечирилир.

Базанын ени $L_б$ дешикләрин базадакы диффузија узунлуғундан хејли аз көтүрүлдүјүндән дешикләрин консентрасијасынын базада пајланмасы $p_n(x)$ хәтти асылылыға јахын олур (шәкил 4.3*б*).

Гејд етмәк лазымдыр ки, дешикләрин белә һәрәкәти јалныз базанын нејтрал олдуғу һалда: база һәчминдә дешикләрин вә електронларын консентрасијасы бәрабәр, консентрасија пајланмасы ејни оланда вә дешикләрин һәчми јүкүнүн електронларын һәчми јүкүнү компенсасија едәндә мүмкүндүр. Дешикләрин һәчми јүкүнү компенсасија етмәк үчүн тәләб олунан електронлар $U_{еб}$ вә $U_{кб}$ мәнбәләри гошуларкән үмуми електродла базаја кәлирләр. Таразлыг һалында електронларын (n_n) вә дешикләрин (p_n) пајланма әјриләри бири-биринә јахын олур (шәкил 4.3*б*).

Дешикләрин бир һиссәси базада рекомбинасијаја мә'руз галдығындан коллектора чатан дешикләрин сајы емиттердән базаја кечән дешикләрдән вә коллектор чәрәјанынын дешик топлананы $J_{кр}$ емиттер чәрәјанын дешик топлананындан $J_{ер}$ аз олачагдыр $(J_{кр}<J_{ер})$. Базада баш верән рекомбинасија нәтичәсиндә дешикләрин сајынын азалмасы онларын консентрасија градијентинин азалмасына вә $p_n(x)$ әјрисинин хәтти ганундан фәргләнмәсинә кәтириб чыхарыр.

Рекомбинасија просеси базаја емиттердән даими кәлән дешикләри компенсасија етмәк үчүн електрон чатышмазлығы јарадыр ки, бунлар да база дәврәси илә дахил олараг $J_{бр}$ чәрәјаныны јарадырлар. Бу о демәкдир ки, емиттер вә коллектор чәрәјанларынын дешик топлананларынын фәрги рекомбинасија илә әлагәдар олан база чәрәјанына бәрабәрдир: $J_{бр}=J_{ер}-J_{kр}$.

Транзисторун чәрәјанын дешик топланы: $J_{ер}=J_{kр}+J_{бр}$ кими тапылыр.

Дешикләрин емиттердән коллектора кечән һиссәсини тә'јин етмәк үчүн дешикләрин базадан дашынма әмсалындан истифадә олунур $\delta=J_{kр}/J_{ер}$. Бу әмсал ваһиддән чох фәргләнмә-

мəлидир. Бунун үчүн рекомбинасијада итирилəн дешиклəрин сајыны азалтмаг лазымдыр. Буну дешиклəрин базада јашама мүддəтини узатмаг вə онларын базада олма мүддəтини азалтмаг ($\ell_б$-ни азалтмагла вə базадан кечмə сү'рəтини артырмагла) јолу илə тə'мин едирлəр. δ=0,96-0,996 һəддиндə олур.

Дешиклəрин һəрəкəти илə əлагəдар олан коллектор чəрəјаны $J_{кр}$ вə емиттер чəрəјаны $J_е$ чəрəјана көрə өтүрмə əмсалы илə бағлыдыр: $\alpha = J_{kp}/J_e$

Бу ифадəнин сурəт вə мəхрəчини $J_{ер}$-јə вураг:

$$\alpha = \frac{I\ ep}{I\ e} \bullet \frac{I\ kp}{I\ ep} = \gamma\delta \quad \text{аларыг.}$$

α-ны ваһидə јахынлашдырмаг үчүн γ вə δ-ны бөјүтмəк лазымдыр. Бунун үчүн емиттердə вə базада əсас јүкдашыјычыларын консентрасија фəргини бөјүтмəк, дешиклəрин базада өмүр мүддəтини узатмаг, базанын енини азалтмаг вə базада сүр'əтлəндиричи саһə јаратмаг лазымдыр.

Əкс истигамəтдə гошулмуш коллектор кечидиндə коллектор чəрəјанынын идарəолунмајан топлананы да јараныр. Бу чəрəјан коллектор кечидинин əкс чəрəјаныдыр ($I_{ко}$) вə гејри-əсас јүкдашыјычыларын дрејфи илə əлагəдардыр. Бизим мисалда бу чəрəјан $p_{по}$ вə $n_{по}$ консентрасијалы дашыјычыларын кечидə јахын гатлардан гоншу гата дрејфиндəн јараныр. Гејри-əсас јүк дашыјычыларынын дрејфи температурдан асылы олдуғундан $I_{ко}$ да температурдан асылыдыр, о, емиттер чəрəјанындан асылы олмур вə она һəм дə истилик чəрəјаны дејилир. Буна əсасəн $I_к = I_{кр} + I_{ко}$ алырыг.

База чəрəјаны емиттер чəрəјанынын електрон топлананы, рекомбинасијаја сəрф олунан дешик топлананы вə истилик чəрəјанларынын чəбри чəминə бəрабəрдир : $I_б = I_{еп} + I_{бр} - I_{ко}$.

Транзисторун идарəетмə хүсусијјəти ондан ибарəт олур ки, чыхышда коллектор чəрəјаны $I_к$ кириш $I_{еп}$ чəрəјанынын (вə ја кəркинлијинин) тəсирилə дəјишилир. Бу исə $I_{ер}$ чəрəјаны һесабына $I_{кр}$-нин дəјишмəси илə əлагəдардыр. Белəликлə би-

полјар транзисторун иш принсипи јүк дашыјычыларынын емиттердән башлајыб базадан (транзит) кечмәсилә коллектора тәрәф ахынын јарадылмасындан вә коллектор чәрәјанынын емиттер чәрәјаныны дәјишмәклә идарә олунмасындан ибарәтдир. Она көрә дә дејирләр ки, биполјар транзистор чәрәјанла идарә олунур.

Кирһофун I ганунундан истифадә етсәк транзисторун чәрәјанлары үчүн белә ифадәләр аларыг: $I_е = I_к + I_б$

$J_{к_0}$ нәзәрә алынса, $J_к$ вә $J_б$ $J_е$ васитәсилә ифадә едилсә:

$I_к = \alpha I_е + I_{к0}$ вә $I_б = (1 - \alpha) I_е - I_{к0}$ алыныр.

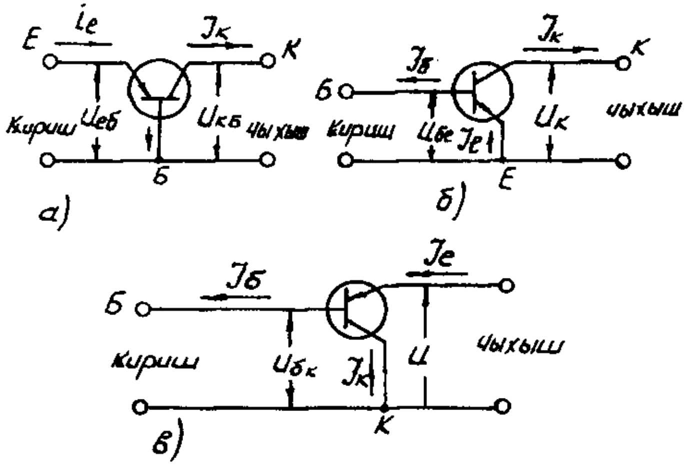
Бурадан көрүнүр ки, әкәр емиттер дөврәсинин кәркинлијини замана көрә һәр һансы мәнбәнин сигналына ујғун дәјишсәк, онда коллектор чәрәјаны да һәмин ганунла дәјишәчәкдир.

Транзистор електрик сигналларынын күчүнү артырмаг үчүн ишләдилир. Күчләнмә кәнар гида мәнбәјиндән көтүрүлән енержи һесабына әлдә едилир. Кириш дөврәсинин чәрәјаныны һәр һансы бир ганунла дәјишмәклә чыхышда һәмин формада күчләндирилмиш сигнал алмаг мүмкүндүр.

4.2. Биполјар транзисторун гошулма схемләри вә статик характеристикалары

Електрик дөврәсиндә транзистор адәтән елә гошулур ки, онун електродларындан бири кириш, икинчиси чыхыш електроду, үчүнчүсү исә кириш вә чыхыш дөврәләри үчүн үмуми електрод олур. Кириш електродунун дөврәсинә дәјишән сигнал мәнбәји, чыхыш електродунун дөврәсинә исә јүк мугавимәти гошулур. Һансы електродун кириш вә чыхыш дөврәләри үчүн үмуми олмасындан асылы олараг, транзисторун үч гошулма схеми мөвчуддур: үмуми база илә гошулма, үмуми емиттерлә гошулма, үмуми коллекторла гошулма (шәкил 4.4). Һәр бир гошулма схеми ики статик характеристикалар аиләси илә характеризә олунур. Бу характеристикалар електродларын дөврәсиндән ахан чәрәјанларын електродлара тәтбиг едилән кәркинликләриндән

асылылығыны ифадә едир. Характеристикалардан бири кириш ($J_{кир}$= f ($U_{кир.}$), $U_{чых.}$= const оланда), дикәри исә чыхыш ($J_{чых.}$= f ($U_{чых.}$), $U_{кир.}$= const оланда) статик характеристикасы адланыр. Статик характеристикалар һәм аналитик ифадә олуна биләр, һәм дә графикләр шәклиндә чәкилә биләрләр.



Шәкил 4.4. Биполјар транзисторун үмуми базалы (*а*), үмуми емиттер (*б*) вә үмуми коллекторлу (*в*) гошулма схемләри

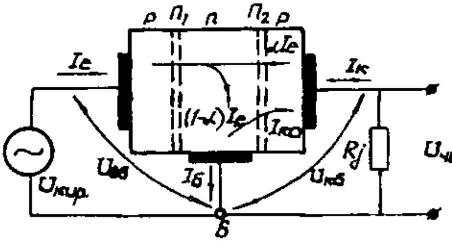
Характеристикалар кәркинликләрин вә чәрәјанларын кичик дәјишмәләриндә (сабит чәрәјан үчүн) чыхарылдығындан онлара статик характеристикалар дејилир.

Гошулма схемләри һәм дә күчләндирмә әмсалларына, чыхыш мүгавимәтләринә, температур вә тезлик хүсусијјәтләринә көрә дә бир-бириндән фәргләнирләр.

Үмуми базалы гошулма схеми (шәкил 4.5). Әкәр емиттер базалы $U_{кир}$ дәјишән кәркинлик мәнбәји, коллектор дөврәсинә исә јүк мүгавимәти R_j гошуларса онда дүз истигамәтдә гошулмуш емиттер кечидиндә емиттер чәрәјанынын дәјишән топлананы јаранар. α әмсалы ваһидә јахын олдуғундан демәк олар ки, бу чә-

рәјанын һамысы коллектор дөврәсиндән ахачагдыр вә јүк мүгавимәтиндә кәркинлијин дәјишән топлананы әмәлә кәләчәкдир.

Әкәр R_j бир нечә кОм һәддиндә оларса бу һалда ондакы дәјишән кәркинлијин амплитуду $U_{кир}$-дән чох олачагдыр. Даһа доғрусу, схем кәркинлијә көрә күчләндирмә верәчәкдир. Бу схемдә емиттер дөврәсинин ишләтдији күч $P_{кир}= 1/2\ U_{кирm} \cdot J_{em}$ олур.



Шәкил 4.5. Биполјар транзисторун үмуми базалы илә гошулма схеми

Чыхыш күчү исә $P_{чых}= 1/2\ U_{чых} \cdot J_{km}$ кими тәјин олунур. Бурада $U_{кирm}$, $U_{чыхm}$, J_{em}, J_{km} киришдә вә чыхышда кәркинлик вә чәрәјанларын дәјишән топлананларынын амплитуд гијмәтләридир. $J_{km} = J_{em}$ вә $U_{кирm} << U_{чыхm}$ олдуғуну нәзәрә алса $P_{чых} >> P_{кир}$ олдуғуну көрәрик. Демәли, схем күчә көрә дә күчләндирмә тә'мин едир. $\alpha < 1$ олдуғундан бу схемдә чәрәјана көрә күчләндирмә олмур.

Схемин чыхыш статик характеристикалары емиттер чәрәјанынын сабит гијмәтләриндә коллектор чәрәјанынын коллектор-база кәркинлијиндән асылылығыны ифадә едир: $J_к=f(U_{кб})_{Je=const}$ (шәкил 4.6*а*). Гејри-хәтти I һиссәдә $J_к$-нын $U_{кб}$-дән асылылығы гүввәтли, хәтти II һиссәдә бу асылылыг зәифдир, III һиссә исә коллектор кечидинин дешилмәси һалына ујғун кәлир. Характеристикаларын башланғыч һиссәләринин чәрәјан охундан солда јерләшмәси онунла изаһ едилир ки, бу схемдә коллектор кечидиндәки кәркинлик тәмас потенсиал фәрги ($\Delta\varphi_0$) вә $U_{кб}$-нин чәми илә мүәјјән едилир. $U_{кб}= 0$ оланда вә $J_е$-нин верилмиш гијмәтиндә дешикләр базадан коллектора $\Delta\varphi_0$-ын тә'сириндән кечирләр вә она көрә $J_к\neq0$. $J_к$-ны азалтмаг үчүн $U_{кб}$-нин ишарәсини дәјишмәклә коллектор кечидини инжексија режиминә кечирмәк лазымдыр. Көрүндүјү кими, 0,1-0,5В

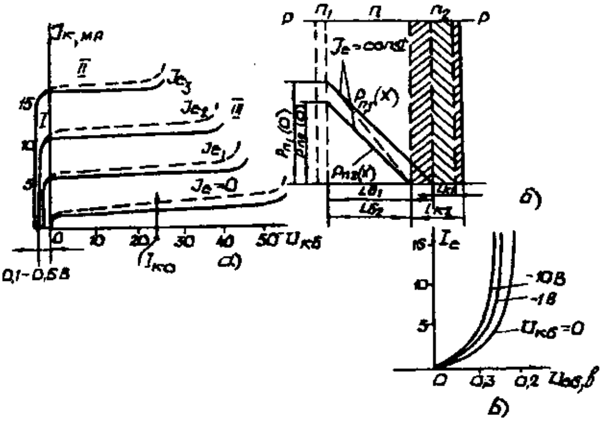
һәддиндә мүсбәт $U_{кб}$ кәркинлији вериләндә коллектор кечидиндә дешикләрин сели бири-бирини компенсасија едәчәк вә $J_к=0$ олачагдыр. Тәбиидир ки, $J_е$ чәрәјанынын гијмәти артдыгча $U_{кб}$ чәрәјанынын мүсбәт гијмәтини артырмаг лазым кәләчәкдир. Характеристиканын II һиссәсиндә $J_к$ кәркинликдән асылы олараг бир гәдәр артыр. Бу, транзисторун чәрәјана көрә өтүрмә әмсалы α-нын база гатынын галынлығынын модулјасијасы нәтичәсиндә бөјүмәси вә $J_{ко}= f(U_{кб})$ чәрәјанынын артырылмасы сајәсиндә баш верир.

Базанын модулјасија еффекти (буна Ерли еффекти дә дејилир) $U_{кб}$-нин артмасындан коллектор кечидиндә һәчми јүкләрин чохалмасы нәтичәсиндә кечидин кенишләнмәси илә әлагәдардыр (шәкил 4.6*б*).

Кечид әсасән база гаты һесабына кенишләндијиндән $U_{кб}$ -нин артмасы базанын галынлығыны азалдыр вә нәтичәдә базада рекомбинасијаларын сајы азалыр, мүвафиг олараг α вә $J_к$ артыр.

Кечидә $U_{кб1}$ вә $U_{кб2}$ кәркинликләри тәтбиг едилән һаллар ($U_{кб2}>U_{кб1}$) үчүн базанын модулјасија еффекти беләизаһ олунур. Чыхыш характеристикаларыны чыхараркән $J_е$=const олмасы емиттер-база кечидиндә дешикләрин консентрасијасынын градијентинин dp/dX сабит олмасыны тәмин едир. Она көрә дә һәр ики һалда базада консентрасијаларын пајланма әјриләри ($p_{n2}(X)$ вә ($p_{n1}(X)$) паралел олурлар. Шәкилдән көрүнүр ки, емиттер-база сәрһәддиндә дешикләрин консентрасијаларынын илкин гијмәтләри ејни дејилдир ($p_{n1}(0) > p_{n2}(0)$). Бу ($p_n(0) = p_{n0}\, e^{U_e/\varphi_T}$ -јә көрә) јалныз емиттер кечидиндә кәркинлик азаланда мүмкүндүр.

Беләликлә, $U_е$=const һалында $U_{кб}$-нин дәјишмәсиндән $J_к$-нын (базанын модулјасијасы еффекти нәтичәсиндә α-нын дәјишмәсиндән) дәјишмәси емиттер кечидиндә кәркинлијин дәјишмәси илә дә мүшајәт едилир. Башга сөзлә, базанын модулјасијасы транзисторда кәркинлијә көрә дахили әкс әлагә јарадыр.



Шәкил 4.6. Үмуми базалы гошулма схеминин чыхыш (*а*), кириш (*в*) характеристикалары вә базанын модулјасија еффектинин схеми (*б*).

Әкәр транзисторда J_e-нин јох, $U_{eб}$ кәркинлијинин верилдијини нәзәрдә тутсаг ($U_{eб}$=const) онда $U_{кб2}>U_{кб1}$ кәркинлији вериләркән дешикләрин базада консентрасијасы дәјишмәјәчәкдир ($p_{n2}(0) = (p_{n1}(0))$ вә $p_{n2}(X)$ әјриси гырыг хәтлә көстәрилмиш вәзијјәт алачагдыр. Бу хәттин маиллијинин бөјүк олмасы J_{e2} чәрәјанынын (һәм дә $J_к$-нын) J_{e1}-лә мүгајисәдә артмасыны көстәрир. Бурада базанын модулјасијасы нәтичәсиндә $J_к$-нын дәјишмәси тәкчә α-нын дәјишмәси илә дејил, һәм дә емиттер чәрәјанына тә'сир көстәрән әкс әлагәнин һесабына баш верир. $J_к$-нын белә артмасы коллектор кечидинин диференсиал мүгавимәти илә характеризә олунур.

$$r_{к(б)} = \left.\frac{dU_{кб}}{dJ_{кб}}\right| J_e = const$$

Бу мүгавимәт коллектор (чыхыш) характеристикаларындан кәркинлијин вә чәрәјанын артмасынын нисбәти кими тапыла биләр. Аз күчлү транзисторлар үчүн $r_{к(б)}$= 0,5-1,0 МОм һәддиндә олур.

$J_e = 0$ һалы үчүн алынмыш чыхыш характеристикасы (шәкил 4.6*а*) *p-n* кечидин волт-ампер характеристикасынынын әкс ганунуну тәсвир едир. Коллектор кечидинин әкс чәрәјаны транзисторун коллектор чәрәјанынын J_{ko} топлананыны тәшкил едир.

Характеристикаларын II һиссәсиндә онлары хәтти, $r_{k(б)}$ мүгавимәтини исә сабит һесаб етмәк олар. Онда бу һиссәдә $J_k = f(U_{кб})$ асылылығы белә ифадә олунар:

$$J_к = \alpha J_e + U_{кб} / r_{к(б)} + J_{k0}.$$

Бу ифадә базанын модулјасија еффектинин тә'сирини дә нәзәрә алыр. Бурада J_{k0}-ын олмасы транзисторун чыхыш (коллектор) характеристикаларынын температурдан асылы олмасына тә'сир көстәрир. Температурун тә'сириндән J_{ko} дәјишир вә характеристикалар јухары (температур артыгча) (шәкил 4.6*а*) вә ашағы (температур азалдыгча) сүрүшүр. α әмсалынын температурдан асылылығы да характеристикалара бу чүр тәсир көстәрир, чүнки ишчи температур диапазонунда температур артдыгча α-нын гијмәти артыр.

α әмсалы һәм дә J_e чәрәјанындан асылыдыр. Аз күчлү транзисторлар үчүн α-нын максимал гијмәти J_e=0,8-3,0 mA гијмәтләриндә әлдә едилир.

Коллектор көркинлијинин гијмәти мәһдудлашдырылмалыдыр, чүнки кәркинлијин һәддән чох артырылмасы електрик дешилмәсинә вә бунун ардынча исә истилик дешилмәсинә кәтириб чыхарар (III һиссә).

Үмуми база илә гошулма схеминин кириш статик характеристикалары $U_{кб}$ кәркинлијинин сабит гијмәтиндә емиттер чәрәјанынын емиттер-база кәркинлијиндән асылылығыны ифадә едир: $J_e = f(U_{еб})_{Uкб=const}$. Бу характеристикалар *p-n* кечидин волт-ампер характеристикаларынын дүз голуна бәнзәјир. $U_{кб}$ артдыгча характеристикалар сола сүрүшүр (шәкил 4.6*в*). Буна сәбәб базанын модулјасијасынын дешикләрин базада консентрасијасынын градијентини вә J_e чәрәјаныны артырмасыдыр.

Схемин мүсбәт хүсусиjjәтләриндән бири онун кениш тезлик диапазонунда сабит күчләндирмә тә'мин етмәсидир. Чәрәjана көрә күчләндирмәнин мүмкүн олмамасы вә кичик кириш мүгавимәти (50 Ом-дан аз) схемин тәтбиг саһәсини мәһдудлашдырыр ($R_{кир}=U_{ебm}/ J_{еm}$).

Чәрәjана көрә статик күчләндирмә әмсалы $R_j=0$ һалында белә тә'jин едилир:

$$\alpha = \frac{\Delta i_k}{\Delta i_e}\Big|_{U_{kб}=const}$$

Дејилдиjи кими, һәмишә $\alpha<1$ олур. α ваһидә нә гәдәр jахын оларса, транзисторун иши бир о гәдәр сәмәрәли олар.

Дәjишән сигнал режиминдә исә (киришдә $U_{кир}$, чыхышда исә R_j оланда) чәрәjана көрә күчләндирмә әмсалы $K_I=J_{km}/ J_{em}$ олур, чүнки $I_{кm}< I_{em}.K_i<\alpha$, чүнки R_j гошуланда I_k азалыр.

Кәркинлиjә көрә күчләндирмә әмсалы ($K_u = U_{кбm}/ U_{ебm}$) онларла вә jүзләрлә өлчүлүр. Күчә көрә күчләнмә әмсалы $K_p= K_i \cdot K_u$

Схемин чыхыш мүгавимәти 100 кОм-а гәдәр ола биләр. $U_{чых}$ вә $U_{кир}$ арасында фаза фәрги олмур. Схем ән кениш jаjылмыш үмуми емиттерли гошулма схеминә нисбәтән сигналы даһа аз тәһриф едир.

Үмуми емиттерли гошулма схеми (шәкил 4.7). Бу схемдә емиттер електроду кириш вә чыхыш дөврәләри үчүн үмуми олур.

$E_{бе}$ вә $E_{ке}$ мәнбәләри мүвафиг олараг база - емиттер вә коллектор - емиттер аралығына, кириш сигнал мәнбәjи $U_{кир}$ исә база дөврәсинә гошулур. R_j бундан әввәлки кими коллектор дөврәсинә гошулур. База гатындакы кәркинлик дүшкүсү нәзәрә алынмаса, емиттер кечидиндәки кәркинлик емиттер мәнбәjинин кәркинлиjинә бәрабәр көтүрүлә биләр. Коллектор кечидиндәки кәркинлик исә ($U_{ке}$-$U_{бе}$) фәргинә бәрабәрдир.

Јухарыда көстәрилмишди ки, $J_к=2J_е+J_{ко}$; $J_б=(1\text{-}2)J_е\text{-}J_{ко}$. Бурадан колектор чәрәјаныны база чәрәјанындан асылы функсија кими ифадә едә биләрик:

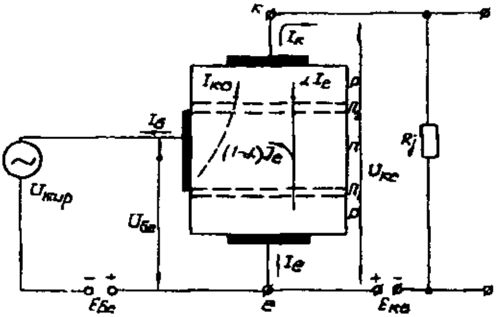
$$J_k = J_{ko}\frac{\alpha}{1-\alpha}J_{ko} + \frac{\alpha}{1-\alpha}J_б$$

Бурада $\frac{\alpha}{1-\alpha}=\beta$ үмуми емиттерлә гошулмуш схемин күчләндирмә (чәрәјана көрә өтүрмә) әмсалыдыр. $\alpha\approx0,92\text{-}0,99$ олдуғу нәзәрә алынса $\beta\approx10\text{-}100$ һәддиндә олар.

Беләликлә, $J_k=(1+\beta)J_k+J_б$ алыныр. Бурадан көрүнүр ки, база чәрәјанынын азачыг дәјишмәси коллектор чәрәјанын бөјүк дәјишмәләринә кәтириб чыхарыр. Бу исә коллектор чәрәјаныны сәмәрәли идарә етмәјә имкан верир.

Үмуми емиттерли схемдә $U_{кир}$-ин дәјишмәси база чәрәјаныны, о исә коллектор чәрәјаныны дәјишдирир. Ахырынчы ифадәјә әсасән коллектор чәрәјанынын дәјишән топлананы база чәрәјанынын дәјишән топлананындан чох-чох бөјүк олур. R_j-үн кифајәт гәдәр бөјүк гијмәтләриндә ондакы кәркинлик кириш кәркинлијиндән бөјүк олур, јә'ни схемдә кәркинлијә көрә күчләндирмәнин мөвчудлуғу күчә көрә дә күчләндирмәнин олмасыны көстәрир. Бу схем үчүн чыхыш (коллектор) статик характеристикалары $J_б$=const оланда $J_к$-нын коллектор–емиттер кәркинлијиндән асылылығыны ($J_к=f(U_{ке})_{Jб=const}$) көстәрир (шәкил 4.8а). Бу характеристикаларда да илкин (I) $J_к$-нын $U_{ке}$-дән зәиф асылылығы (II) вә коллектор кечидинин дешилмәси (III) һиссәләрини гејд етмәк олар.

Бу характеристикалар координат башланғычындан башлајыр вә I квадрантда јерләширләр. $U_{ке}$=0 оланда коллектор кечидиндәки кәркинлик $U_{бе}$-ә бәрабәр олур, кечид ачылыр вә дешикләри базаја инжексија едир. Коллектор кечидиндә емиттердән коллектора вә коллектордан базаја ахан дешик селләри таразлыға кәлир вә $J_к$ олур. I һиссәдә $U_{ке}$ артдыгча коллектор кечидиндә дүз кәркинлик азалыр. Коллектордан базаја инжексија азалыр вә $J_к$ артыр.



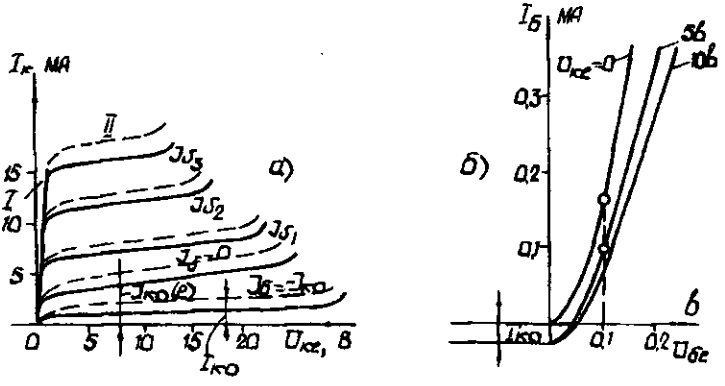
Шәкил 4.7. Биполјар транзисторун үмуми емиттерлә гошулма схеми

II һиссә илә сәрһәддә коллектор кечидиндән дүз кәркинлик тамамилә көтүрүлүр, II һиссәдә исә кечиддә јалныз әкс кәркинлик тә'сир кәстәрир. I һиссәдә II һиссәјә кечид нөгтәси $U_{кe}$=0,5-1,5В һәддиндә олур.

Әкәр $r_{к(б)}$ мүгавимәтинин тә'сири нәзәрә алынарса

$$J_k = \frac{\alpha}{1-\alpha}J_б + \frac{U_{кe}}{r_{к(б)}(1-\alpha)} + \frac{1}{1-\alpha}J_{к0} = \beta J_б + \frac{U_{кe}}{r_{к(б)}(1+\beta)} + (1+\beta)J_{к0}$$

аларыг. Бурада $\beta = J_к / J_б = \alpha/(1-\alpha)$.



Шәкил 4.8. Үмуми емиттерли гошулма схеминин чыхыш (а) вә кириш (б) характеристикалары

Коллектор чәрәјанынын јухарыдакы ифадәсини башга чүр дә јазмаг олар:

$$J_к=\beta\, J_б+U_{кә}/\, r_{к(е)}+\, J_{ко(е)}.$$

Бурада

$$r_{k(е)}=\frac{r_{к(б)}}{1+\beta}; \qquad J_{ко(е)}=(1+\beta)J_{ко}$$

Бу схемин чыхыш характеристикалары да кәркинлик охуна нисбәтән мүәјјән маиллијә маликдирләр ки, бунун да сәбәби базанын модулјасија еффектидир. Маиллијин дәрәчәси бу һалда даһа чохдур, чүнки коллектор кечидиндәки кәркинлијин тә'сириндән α-нын кичик дәјишмәләри $\beta=\alpha/(1-\alpha)$-ја әсасән β-нын бөјүк дәјишмәләринә кәтириб чыхарыр. Бу һадисә $U_{кә}/r_{к(е)}$ топлананы илә нәзәрә алыныр. Бу схемдә коллектор кечидинин диференсиал мүгавимәти $r_{к(е)}$ үмуми базалы схемин $r_{к(б)}$ мүгавимәтиндән $(1+\beta)$ дәфә аз олур.

Транзисторун иш принсипиндән мә'лумдур ки, база хәтти илә ики гаршы-гаршыја јөнәлмиш топланан ахыр (шәкил 4.7): коллектор кечидинин әкс чәрәјаны $J_{ко}$ вә емиттер чәрәјанынын бир һиссәси $((1-\alpha)/J_е)$. Буна көрә дә $J_б=0$ һалы бу чәрәјанларын бири-биринә бәрабәрлијини мүәјјән едир: $(1-\alpha)\; J_е=\; J_{ко}$. Кириш (база) дөврәсинин чәрәјанынын сыфыр олмасы һалында емиттер вә коллектор чәрәјанлары белә ифадә олунур:

$$J_е=\; J_{ко}/(1-\alpha)=(1+\beta)J_{ко}\,;$$
$$J_к=\alpha\; J_е+\; J_{ко}=\alpha J_{ко}/(1-\alpha)+J_{ко}=(1+\beta)J_{ко}\;.$$

Демәли $J_б=0$ оланда үмуми емиттерли схемдә транзистордан илкин вә ја башдан-баша $J_{ko(e)}=(1+\beta)J_{ко}$ чәрәјаны ахыр. Бу чәрәјан коллектор чәрәјанынын ифадәләриндә үчүнчү топланан кими нәзәрә алыныр. Беләликлә, кириш чәрәјанынын сыфра бәрабәр һалында үмуми емиттерли схемин коллектор чәрәјаны үмуми базалы схемдәкиндән $(1+\beta)$ дәфә чохдур.

Әкәр емиттер кечидинә мүсбәт кәркинлик $E_{бе}>0$ вериб ону бағлы вәзиjjәтә кечирсәк онда коллектор чәрәjаны $J_{ко}$ гиjмәтинә гәдәр азалачаг (шәкил 4.8*а*) вә коллектор кечидинин база-коллектор истигамәтинә ахан әкс чәрәjаны илә муәjjән едиләчәкдир. $J_б=0$ һалына уjғун характеристикадан ашағы jерләшән характеристикалар саһәсинә аjырма (кәсилмә) саһәси деjилир.

Бу схемин дә чыхыш характеристикалары температурун тә'сириндән сүрүшүрләр (гырыг-гырыг хәтләр). Лакин бурада температурун тә'сири даһа да гүввәтлидир. Бу, бир тәрәфдән $J_{ко}$-ын $(1+\beta)$-jа вурулмасы илә, дикәр тәрәфдән α исә α әмсалынын температурдан кичик дәjишмәләриндә $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ әмсалынын температурдан кәскин дәjишмәләри илә әлагәдардыр.

Бу схемдә коллектор кечидинин дешилмәси үмуми базалы схемә нисбәтән 1,5-2 дәфә кичик кәркинликдә баш верир.

Схемин кириш характеристикалары $U_{ке}=const$ һалында база чәрәjанын база-емиттер кәркинлиjиндән асылылығыны көстәрир (шәкил 4.8*б*): $J_б=f(U_{бе})/U_{ке}$=const.

$U_{ке}=0$ оланда кириш характеристикасы паралел гошулмуш ики *p-n* кечидин (коллектор вә емиттер кечидләринин) волт-ампер характеристикасына уjғун кәлир. Бу һалда база чәрәjаны емиттер режиминдә ишләjән коллекторун вә емиттерин чәрәjанларынын чәминә бәрабәрдир.

$U_{ке}<0$ оланда база чәрәjаны емиттер чәрәjанынын аз бир һиссәсини тәшкил едир. Бу һалда $U_{бе}$-нин муәjjән гиjмәтиндә $U_{ке}<0$ кәркинлиjи $J_б$-ны азалдыр вә характеристикалар $U_{ке}=0$ һалында олдуғундан ашағы тәрәфә сүрүшүрләр. $U_{ке}$-нин гиjмәтинин артырылмасы да базанын модулjасиjасы тә'сириндән $J_б$-нин азалмасы нәтичәсиндә характеристикалары ашағы тәрәфә сүрүшдүрүр.

База чәрәjанынын тәркибиндә $J_{ко}$ дә вардыр. Она көрә $U_{ке}<0$ һалына уjғун кириш характеристикалары база чәрәjанынын гиjмәтчә $J_{ко}$-а бәрабәр, ишарәчә мәнфи олан нөгтәсиндән башлаjырлар (шәкил 4.8б).

Ҹәрәјана көрә күҹләнмә әмсалы $\kappa_i = J_{чыхм}/J_{кир\ м} = J_{км}/J_{бм}$ онларла өлчүлүр.

$$(R_j = 0)\beta = \left.\frac{\Delta i_k}{\Delta i_e}\right|_{U_{ke} = const}$$

Статик режимдә, $i\kappa_i < \beta$ чүнки R_j -үн гошулмасы $i_к$ -ны азалдыр.

$$K_u = U_{чыхт} / U_{кирт} = U_{кет} / U_{бем}$$

κ_u әмсалы R_j-үн E_{ke} мәнбәјинин кифајәт гијмәтләриндә онларла вә јүзләрлә өлчүлүр. Бу о демәкдир ки, $\kappa_p = \kappa_I \cdot \kappa_u = 100\text{-}1000$ һәддиндә ола биләр.

Схемин кириш мүгавимәти $R_{кир} = \frac{U_{mкир}}{J_{mкир}} = \frac{U_{em}}{J_{m}}$

$R_{кир}$ кириш мүгавимәти үмуми базалы схемә көрә чох бөјүкдүр вә 100 Омдан бир нечә килоома гәдәр гијмәт ала биләр. Схемин чыхыш мүгавимәти 10 кОм һәддиндә олур.

Үмуми емиттерлә гошулма схеми чыхышда кәркинлији киришә нисбәтән 180^0 чевирир ($U_{чых}$ вә $U_{кир}$ арасында фаза фәрги 180^0 олур). Әкәр $U_{кир}$ мәнфи оларса о $E_{бе}$-лә топланар, нәтиҹәдә$U_{бе}$, $J_б$ вә онун нәтиҹәсиндә $J_к$ артар. $U_{кир}=0$ оланда R_j-дәки кәркинлик дүшкүсү мүсбәт олур. $J_к$-нын артмасы исә R_j-дә әлавә мүсбәт кәркинлик дүшкүсү јарадыр, јә'ни чыхышда киришә көрә әкс ишарәли кәркинлик алыныр.

Схемин мүсбәт ҹәһәти коллектор вә база дөврәләринин бир мәнбәдән гида алмасыдыр, чүнки һәр ики дөврәјә ејни ишарәли кәркинлик верилир.

Мәнфи ҹәһәтләр ондадыр ки, тезлијин јүксәк гијмәтләриндә үмуми базалы схемә нисбәтән күҹләндирмә даһа аз вә схемин иши температурдан чох асылы олур.

Үмуми емиттерли схем ән кениш јајылмыш гошулма схемидир.

Үмуми коллектор илә гошулма схеми үмуми емиттерли гошулма схемилә бир чох ејни хүсусијјәтләрә маликдир. Бурада кириш ҹәрәјаны $J_б$, чыхыш ҹәрәјаны исә $J_е$-дир (о исә демәк олар ки $J_к$-ја бәрабәрдир). Бурада да кириш сигнал мәнбәји емиттер-база аралығына гошулур. Үмуми емиттерли схемдән

фәргләндирән чәһәт јүк мүгавимәтинин емиттер дөврәсинә гошулмасыдыр.

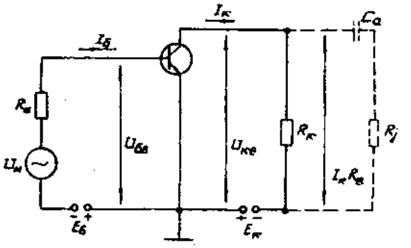
Чыхыш статик характеристикалары үмуми емиттерли схемә ујғундур, јалныз коллектор чәрәјаныны емиттер чәрәјаны илә əвəз етмәк лазымдыр. Кириш характеристикалары да үмуми емиттерли схемдәки илә ејнидирләр, лакин онлар кириш кәркинлији ролуну ојнајан коллектор кечидиндәки кәркинлијин гијмәти гәдәр сағ тәрәфә сүрүшдүрүлүрләр. Схемин кечид вә тезлик хүсусијјәтләри үмуми емиттерли схемә ујғундур.

Схем чәрәјана вә күчә көрә күчләндирмә верир, кәркинлијә көрә исә күчләндирмә вермир, чүнки чыхыш кәркинлијинин дәјишән топлананы кириш кәркинлијинин дәјишән топлананындан һәмишә аз олур. Схемин чәрәјана көрә өтүрмә әмсалы $J_e/J_б$-дыр. Бу схемә бә'зән емиттер тәкрарлајычысы да дејилир вә онун хүсусијјәтләри сонракы бөлмәләрин бириндә тәфсилатилә вериләчәкдир.

n-p-n типли транзисторларын ујғун гошулма схемләриндә кәркинлик мәнбәләринин ишарәләри һәр јердә әксинә дәјишдирилмәлидир.

4.3. Биполјар транзисторун динамик режими вә динамик характеристикалары

Бундан әввәл гејд едилмишди ки, гошулма схемләринин ичәрисиндә ән кениш јајыланы үмуми емиттерли схемдир.



Шәкил 4.9. Биполјар транзистора сигнал мәнбәјинин вә јүк мүгавимәтинин гошулмасы.

Биполјар транзисторун динамик режимини белә схем әсасында арашдыраг. Динамик режимдә кириш сигнал мәнбәји $U_и$ база дөврәсинә, R_k исә коллектор дөврәсинә гошулур (шәкил 4.9).

Нәзәрдә тутмаг лазымдыр ки, јалныз чыхыш дөврәсиндә јүк мүгавимәтинин олмасы кәр-

кинлијә вә күчә көрә күчләндирмә әлдә етмәјә имкан верир. Схемдән көрүнүр ки, база чәрәјанынын дәјишмәси нәинки коллектор чәрәјаныны, һәм дә коллектордакы кәркинлији дәјишдирир. Чүнки коллектордакы кәркинлик вә чәрәјан бири-бириле ашағыдакы ифадә илә бағлыдырлар: $U_к=E_к-J_кR_к$.

Транзисторун белә режими динамик режим, бу режимдә чәрәјанларла кәркинликләр арасындакы асылылыглары көстәрән характеристикалара исә динамик характеристикалар дејилир.

Динамик характеристикалар $E_к$ мәнбәјинин кәркинлијинин вә $R_к$ мүгавимәтинин верилмиш гијмәтләриндә статик характеристикалар аиләси (сорғу китабларында һәр бир транзистор үчүн верилир) үзәриндә гурулур. Чыхыш (коллектор) динамик характеристикасыны гурмаг үчүн јухарыдакы дүз хәттин тәнлијиндән истифадә едилир. Бу дүз хәттин чәрәјан вә кәркинлик охларындан ајырдығы парчалары тапмаг үчүн тәнликдә мувафиг олараг $J_к=0$ вә $U_к=E_к$ јазараг $U_{кe}=E_к$ вә $J_к=E_к/R_к$ тапылыр.

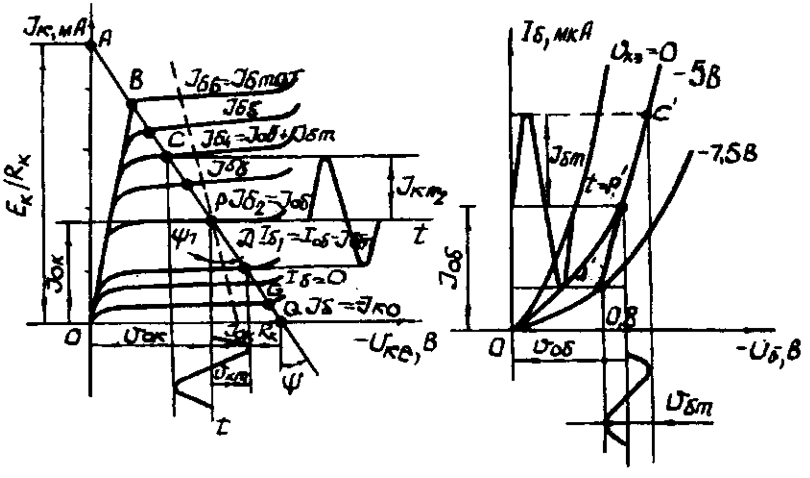
Мүвафиг охларда $E_к$ вә $E_к/R_к$ парчаларыны ајырараг алынан нөгтәләрдән AG хәтти чәкилир. Бу дүз хәттә јүк хәтти, онун статик характеристикаларла кәсишмә нөгтәләринин һәндәси јеринә исә динамик чыхыш характеристикасы дејилир (шәкил 4.10*а*). Бу характеристиканын көмәји илә коллектор чәрәјанынын истәнилән гијмәтинә ујғун коллектор кәркинлијинин вә онунла әлагәдар олан база чәрәјанынын гијмәтини тапмаг олар. Јүк хәттини һәм дә $\varphi=argtgR_к$ бучағы алтында G нөгтәсиндән чәкмәк олар.

Базадакы $U_{бe}$ (кириш) кәркинлијини тапмаг үчүн кириш динамик характеристикасы гурулур.

Бунун үчүн чыхыш динамик характеристикасы үзәриндәки нөгтәләрә ујғун $J_б$ вә $U_{кe}$-нин гијмәтләрини кириш статик характеристикалары аиләси үзәринә көчүрмәк лазымдыр (шәкил 4.10*б*). Бу нөгтәләрин абсисләри мүвафиг база кәркинликләрини верир. C′D′ хәтти кириш динамик характеристикасынын бир һиссәсидир.

Јүк хәттинин $J_{б2}=J_{об}$ чәрәјанына ујғун статик характеристика илә кәсишдији нөгтәјә (шәкил 4.10*а*) ишчи нөгтә вә бу нөгтәнин киришдә сигнал олмајанда илкин һалдакы вәзијјәтинә исә сакитлик нөгтәси (Р) дејилир. Бу нөгтәнин вәзијјәти сүрүшмә мәнбәјинин ($E_б$) кәркинлији илә мүәјјән едилир. Сакитлик нөгтәсинә көрә коллектор (чыхыш) дөврәсинин $J_{ок}$ сакитлик чәрәјаны вә $U_{ок}$ сакитлик кәркинлији тә'јин едилир. Бу һалда динамик режим тәнлији $U_{ок}= E_к- J_{ок}\ R_к$ кими ифадә едилир.

Сакитлик нөгтәсинин вәзијјәти схемин тә'јинаты илә, кириш сигналынын гијмәти вә формасы илә мүәјјән едилир.



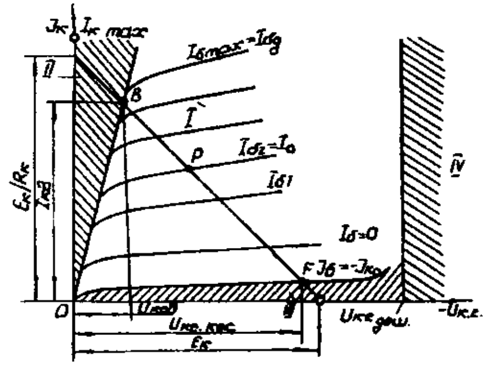
Шәкил 4.10. Транзисторун динамик характеристикаларынын гурулмасы

Әкәр кириш сигналы симметрикдирсә, (мәсәлән шәкил 4.10*б*-дә синусоидал $U_{бm}$) онда сакитлик нөгтәсини јүк хәттинин тәхминән ортасында сечирләр. Бу заман коллектор дөврәсиндән $J_{кm}$ чәрәјаны ахыр вә коллектордакы кәркинлијин амплитуду $U_{кm}$ олур.

Әкәр транзисторун чыхыш дөврәсинә харичи јүк R_j гошулса (шәкил 4.9-да гырыг-гырыг хәтлә көстәрилиб) коллектор дөврәсинин дәјишән чәрәјана көрә үмуми мүгавимәти $R_j = R_к R_j/(R_к + R_j)$ олачагдыр. Бу һалда динамик характеристиканын сакитлик нөгтәсиндән $\varphi' = arctg R_j$ бучағы алтында кечирмәк лазымдыр (шәкил 4.10*а* гырыг хәтт).

Әкәр транзисторун иш режиминдә ишчи нөгтә јүк хәттинин BF саһәсиндән кәнара чыхмырса, белә режимә хәтти вә ја күчләндирмә режими дејилир. Бу режимдә база (кириш) чәрәјаныны дәјишмәсиндән коллектор (чыхыш) чәрәјаны мүтәнасиб дәјишир (шәкил 4.11, I һиссә).

Әкәр кириш чәрәјаны $J_{бmax}$ (В нөгтәси) гијмәтини аларса, онун сонракы артымы коллектор чәрәјаныны артырмыр, коллектор чәрәјаны дојма J_{kg} гијмәтини алыр. Бу һалда коллектордакы кәркинлик $U_{кед}$=0,1-0,3В һәддиндә олур вә она көрә $U_{кед} \ll E_k$ алыныр. Бу транзисторун дојма режиминә ујғун кәлир, бу һалда транзисторун һәр ики кечиди дүз гошулмуш олур вә транзистору гапалы ачар кими тәсвир етмәк олар.



Шәкил 4.11. Биполјар транзисторун иш режими.

Транзисторун дојмасы үчүн $J_б \geq J_{бд}$ олмалыдыр. Дојма режиминдә коллектор чәрәјаны јалныз харичи дөврәнин параметрләри илә тә'јин едилир:

$$J_{кд} = \beta\, J_{бд} = (E_к - U_{кед})/\, R_к \approx E_к/\, R_к$$

Дојма саһәси (II) статик коллектор характеристикаларынын идарә олунмајан һиссәсиндән солда јерләшир. Нормал

истилик режимини тә'мин етмәк үчүн дојма чәрәјаны J_{kd} коллекторун максимал бурахыла билән чәрәјанындан чох олмамалыдыр.

Әкәр транзисторун һәр ики кечиди әкс истигамәтдә сүрүшдүрүләрсә (гошуларса) онлардан јалныз әкс (идарә олунмајан) чәрәјанлар ахачагдыр. Бу һалда коллектор дөврәсиндән $J_к=J_{ко}$, база дөврәсиндән исә $J_б=-J_{ко}$ чәрәјанлары ахыр. Коллектордакы кәркинлик $J_{ке\ кәс}$ демәк олар ки, $E_к$-ја бәрабәр олур. Бу режимә ајырма (кәсилмә) режими дејилир вә бу һалда транзистору ачыг ачар кими тәсвир етмәк олар (III һиссә).

Кәркинлик $J_{кеһүд}$ гијмәтини ашанда коллектор кечидиндә јүкдашыјычыларын чохалмасы селвари характер алыр (IV һиссә). Бу режимдә јалныз хүсуси транзисторлар ишләјә биләр.

4.4. Иш режиминин вә температурун биполјар транзисторун параметрләринә тә'сири

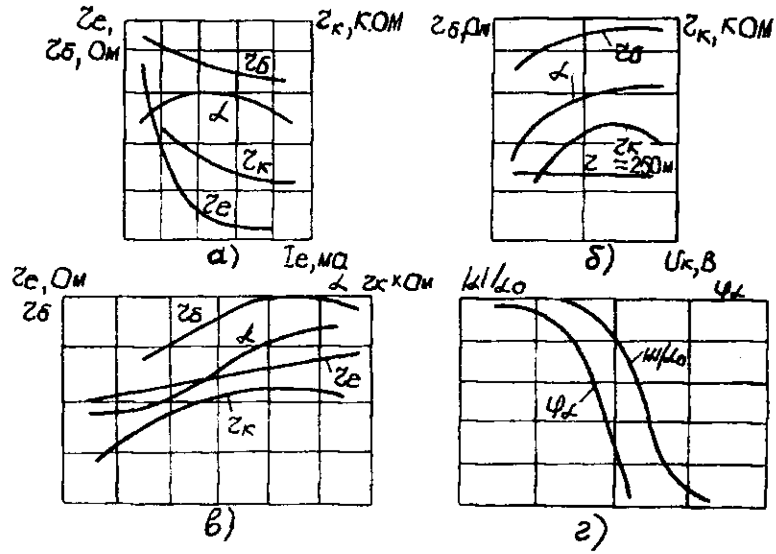
Транзисторун әсас параметрләринә онун иш режимини характеризә едән кәмијјәтләр (коллектор чәрәјаны вә кәркинлији, сигналын тезлији) вә әтраф мүһитин температуру мүәјјән тә'сир көстәрир.

Емиттер чәрәјанынын емиттер кәркинлијинин чохалмасындан артмасы нәтичәсиндә емиттер кечидинин инжексија әмсалы γ-нын гијмәти артыр. Бунун сәбәби емиттер кечидиндә потенсиал сәддин азалмасы вә орада рекомбинасија едән јүкдашыјычыларын сајынын азалмасыдыр. α әмсалы γ илә әлагәдар олдуғундан бу заман α һәр һансы бир максимал гијмәт алыр. $J_е$-нин сонракы артымы базада гејри-әсас јүкдашыјычыларын консентрасијасыны артырыр вә бу да γ-нын азалмасына сәбәб олур. Нәтичәдә α да азалыр вә транзисторун күчләндирмә хүсусијјәтләри писләшир. α-нын $J_е$-дән асылылығы ($U_к$=const) шәкил 4.12*а*-да көстәрилмишдир.

Коллектор кәркинлијини ($J_к$=const) артыраркән (мүтләг гијмәтинә көрә) коллектор кечиди кенишләнир вә базанын ени

азалыр (Ерли еффекти). Бу һалда база гатында јүкдашыјычыларын рекомбинасија еһтималы азалыр вә ујғун олараг јүкдашыјычыларын дашыма (өтүрмә) әмсалы δ артыр. $U_к$ артдыгча ејни заманда коллектор кечидинә јүкдашыјычыларынын селвари чохалма әмсалы вә бунун нәтичәсиндә α әмсалы да артыр (шәкил 4.12*б*).

Мүсбәт температурда α артыр, мәнфи температурда исә азалыр (шәкил 4.12*в*). Бу онунла изаһ олунур ки, температур артдыгча дашыјычыларын енержиси артыр, рекомбинасија еһтималы азалыр вә онларын өмрү узаныр. Сигналын тезлијинин α әмсалына тәсири τ_α мүддәти әрзиндә $J_е$-нин дәјишмәсиндән $J_к$-нын дәјишмәсинин кечикмәси илә изаһ олунур.



Шәкил 4.12. Транзисторун параметрләринин иш режиминдән вә температурдан асылылығы

τ_α мүддәти әрзиндә инжексија едилмиш дашыјычылар база гатында һәрәкәт едәрәк коллектор кечидинә чатырлар:

$$\tau_\alpha \approx \ell_б^2 / 2D$$

α-нын тезликдән асылылығы $\alpha = \alpha_0 / (1 + j\omega / \omega_\alpha)$ олур. Бурада α_0 -f=0 тезлијиндә емиттер чәрәјаныны өтүрмә әмсалы; $\omega_\alpha = 1/\tau_\alpha = 2\pi f_\alpha$; f_α - емиттер чәрәјанынын өтүрмә әмсалы |α|-нын $\alpha_0/\sqrt{2}$ гијмәтинә гәдәр азалдығы һүдуд тезлијидир.

α-нын ифадәсиндән үмуми базалы гошулма схеми үчүн амплитуд-тезлик вә фаза–тезлик харастеристикалары (шәкил 4.12 г) тә'јин едилир: $\alpha = \alpha_0 / \sqrt{1 + (\omega/\omega_\alpha)^2}$; $\varphi_\alpha = -arctg(\omega/\omega_\alpha)$

Бурада φ_α J_k-нын J_e-ә көрә кечикмәсини көстәрән фаза сүрүшмәси бучағыдыр.

Базанын чәрәјана көрә өтүрмә әмсалынын тезликдән асылылығы беләдир: $\beta = \beta_0/(1 + j\omega/\omega_\beta)$.

Бурада β_0- $f=0$ оланда база чәрәјанынын өтүрмә әмсалы: $\omega_\beta = 2\pi f_\beta$; f_β - база чәрәјанынын өтүрмә әмсалы $/\beta/$-нын $\beta_0/\sqrt{2}$ гијмәтинә гәдәр азалдығы һүдуд тезлијидир.

f_α вә f_β бир-бириндән асылыдыр: $f_\beta = f_\alpha/(1 + \beta_0)$.

Бурадан көрүнүр ки, үмуми базалы схем үмуми емиттерли схемә нисбәтән даһа кениш тезлик бурахма золағына маликдир.

Емиттер кечидинин мүгавимәти J_e-дән гејри-хәтти асылыдыр $r_e = \varphi_T/J_e$ (шәкил 4.12*а*) вә демәк олар ки, коллектор кәркинлијиндән асылы дејил (шәкил 4.12*б*). Температурун тә'сириндән r_e хәтти олараг тәхминән 0,33%/1°C дәјишир (шәкил 4.12*в*).

Коллектор кечидинин мүгавимәти r_e-јә аналожи олараг J_e-јә мүтәнасиб дәјишир (шәкил 4.12а), $|U_k|$ артанда исә $\sqrt{|U_k|}$ -ја мүтәнасиб олараг артыр (шәкил 4.12б).

Лакин сәтһи сызмаларын вә зәрбә илә ионлашдырманын тә'сириндән $r_k = f(|U_k|)$ әјрисиндә максимум мүшаһидә олунур вә $|U_k|$ -нын сонракы артмасы r_k-ны азалдыр. Температурун r_k-ја тә'сири (r_e-дән фәргли олараг) әлавә амилләрлә, әсасән кәр-

кинликлә характеризә олунур. Она көрә $r_к$=f(T) гејри-хәтти олур вә максимума малик олур (шәкил 4.12 *в*).

$J_е$-нин артмасы илә база мүгавимәти $r_б$ азалыр (шәкил 4.12*а*). Бунун сәбәби дүз чәрәјан ахаркән базада гејри-әсас јүкдашыјычыларын консентрасијасынын артмасыдыр (база мүгавимәтинин модулјасијасы). Базан мүгавимәти базанын енинә тәрс мүтәнасибдир, она көрә дә $|U_к|$ артанда Ерли еффекти нәтичәсиндә мүгавимәт дә артыр (шәкил 4.12*б*).

$r_б$-нин температурдан асылылығы (шәкил 4.12*в*) јарымкечиричинин хүсуси електрик кечиричилијинин температурдан дәјишмәси илә әлагәдардыр вә бу дәјишмәләр дә база гатында ашгарларын консентрасијасындан асылыдыр.

$J_{к0}$ чәрәјанынын дәјишмә сәбәбләри јарымкечиричи диодун әкс чәрәјанынын дәјишмә сәбәбләри илә ејнидир.

Иш режиминин вә температурун тә'сириндән емиттер кечидинин әкс чәрәјаны $J_{е0}$, коллектор вә емиттер кечидләринин тутумлары ($C_к$ вә $C_е$), електродларын максимал бурахыла билән кәркинликләри ($U_{бemax}$, $U_{кбmax}$, $U_{ебmax}$), коллекторун максимал бурахыла билән сәпәләнмә күчү вә дикәр параметрләр дә дәјишир.

Сајыланларла бәрабәр чиһазларын иш режиминә күјләр мүәјјән тә'сир көстәрир. Күјләрин үч әсас нөвү олур: истилик күјләри, гырма күјләри вә алчаг тезликли күјләр (Фликекүјләр). Истилик күјләри бүтүн кечиричиләрдә, јарымкечиричиләрдә вә диелектрикләрдә мүшаһидә олунур вә јүкдашыјычыларын хаотик һәрәкәти илә әлагәдар олур. Истилик күјүнүн орта квадратик кәркинлији белә тә'јин олунур:

$$\overline{U}^2 = \varphi rTR\Delta T,$$

бурада R – јарымкечиричинин вә ја диелектрикин мүгавимәти; Δf – бурахма зонасынын енидир.

Гырма күјләри јарымкечиричи чиһазларын әксәријјәтиндә олур. Онларын әсас мәнбәји p-n кечидидир. Јүкдашыјычылар кечидин потенсиал сәддинин дәф едәркән потенсиал сәддинин

һүндүрлүјүнүн дәјишмәси вә дашыјычыларын истилик һәрәкәтинин хаотиклији нәтичәсиндә чәрәјанларын дрејф вә диффузија топлананларынын флуктуасијасы баш верир. Бу һадисә електронларын емиссија чәрәјанынын флуксијасына бәнзәрдир вә она көрә дә бу гырма еффекти адланыр. Кечидин гырма күјүнүн орта квадратик кәркинлији белә тә'јин олунур:

$$\overline{U}^2 = 2qJR^2_{p-n}\Delta f$$

Алчаг тезликли күјләр $1/f^n$-ә, мүтәнасиб олан характерик спектрал пајланмалары илә фәргләнирләр (n ваһидә јахын көстәричидир). Јарымкечиричи чиһазларда алчаг тезликли күјләрин мәншәји оксид-јарымкечиричи сәрһәдиндә баш верән просесләрдир. Белә күјләрин орта квадратик кәркинлији белә тә'јин олунур:

$$\overline{U}^2 \approx URf^n .$$

4.5. Биполјар транзисторун еквивалент схемләри вә параметрләр системи

Транзисторун характеристикаларындан әсасән иш режимини тә'јин етмәк вә схемләрин ишини бөјүк сигналлар һалында график анализ етмәк үчүн истифадә едилир. Схемләрин ишини кәмијјәтчә гијмәтләндирмәк үчүн транзистор схемләринин аналитик һесабат үсулларында еквивалент схемләрдән истифадә олунур. Бу схемләр дәјишән чәрәјан режиминдә транзисторун кичик сигналлы параметрләринин структур әлагәләрини тәсвир едирләр.

Транзисторун кичик сигналлы еквивалент схемләри хәтти дөврәләрдән ибарәт олуб ики бөјүк група бөлүнүрләр:

1) транзисторун физики хүсусијјәтләрини, структуруну вә һәндәси моделини нәзәрә алмагла гурулан еквивалент схемләр;

2) транзисторун хүсусијјәтләрини актив дөрдгүтблү кими тәсвир едән еквивалент схемләр (формал еквивалент схемләр).

Биринчи груп схемләр транзисторун дахили (физики) параметрләри, икинчи груп схемләр исә дөрдгүтблүнүн характеристик параметрләри илә характеризә олунур. Һәр ики груп схем актив режимдә ишләјән транзистор схемләринин тәһлилиндә истифадә олунур.

Транзисторун дахили параметрләринә әсасланан еквивалент схемләр транзисторун параметрләринин транзисторлу схемин ишинә тә'сирини чох ајдын вә тәсвирли шәкилдә өјрәнмәјә имкан верир.

Күчләндирмә режиминдә ишләјән транзисторун үмуми базалы вә үмуми емиттерли гошулма схемләриндә чәрәјан вә кәркинликләрин дәјишән топлананлары үчүн еквивалент схеми араштыраг. Белә схемләр транзисторун кириш вә чыхыш характеристикаларынын хәтти һиссәләри үчүн тәртиб олунур. Бу һалда транзисторун параметрләри дәјишмәз һесаб олунур вә транзисторун кәркинлик вә чәрәјанынын кичик артымларына аид олан диференсиал параметрләриндән истифадә едилир. Белә һалда транзисторун структуруну ән дәгиг тәсвир едән Т-шәкилли еквивалент схемдир.

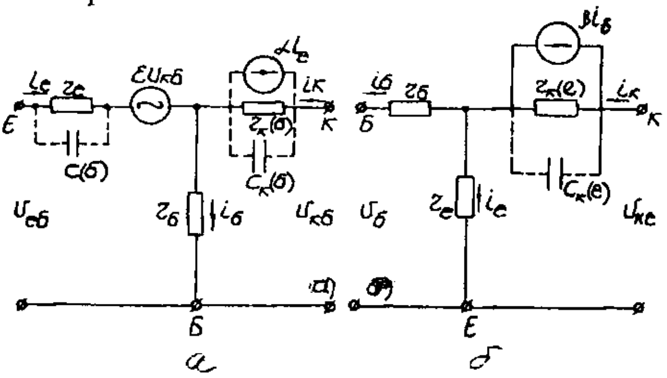
Үмуми базалы гошулма схеминин Т-шәкилли еквивалент схеми (шәкил 4.13*а*) ики контурдан ибарәтдир: кириш (емиттер-база) дөврәсинә аид сол вә чыхыш (коллектор-база) дөврәсинә аид сағ контур. $r_б$ мүгавимәтли база дөврәси һәр ики контур үчүн үмуми олур.

Еквивалент схемә дахил олан параметрләр ашағыдакы кими характеризә олунур. Дүз истигамәтдә гошулмуш емиттер кечидинин диференсиал мүгавимәти:

$$r_e = \frac{dU_e}{dI_e}\Big|_{U_{кб}=const}$$

r_e емиттер кечидиндәки кәркинликлә кечиддән ахан чәрәјан арасында әлагәни нәзәрә алмаға имкан верир. Емиттер гатынын һәчми мүгавимәти вә емиттерин чыхыш нагилинин мүгавимәти кичик олдуғундан еквивалент схемдә нәзәрә алынмыр. r_e-нин гијмәти J_e-ин сабит топлананындан асылыдыр:

$r_e=\varphi_T/I_e=0,025/I_e$. Бу мүгавимәт бир нечә Омдан онларла Ома гәдәр ола биләр.



Шәкил 4.13. Биполјар транзисторун үмуми база (а) вә үмуми емиттер илә гошулма схемләринин еквивалент схемләри

Базанын һәчми мүгавимәти $r_б$ база чәрәјанынын база гатында емиттердән башлајараг һәрәкәт етдији истигамәтдә тә'јин едилир. Адәтән $r_б > r_e$, транзисторун типиндән асылы олараг 100-400 Ом һәддиндә олур.

αi_e еквивалент чәрәјан мәнбәји база гатындан коллектора ахан емиттер чәрәјанынын транзит топлананыны (чәрәјанын емиттердән коллектора өтүрүлмәсини) нәзәрә алыр. Әкс истигамәтдә гошулмуш коллектор кечидинин диференсиал мүгавимәти:

$$r_{к(б)}=\frac{dU_{кб}}{dI_k}/J_e=\text{const}.$$

Јухарыда гејд едилдији кими бу мүгавимәт база модулјасијасы нәтичәсиндә $U_{кб}$-нин дәјишмәсиндән коллектор чәрәјанынын дәјишмәсини нәзәрә алыр вә 0,5-1 МОм һәддиндә олур.

Кириш дөврәсинин $\varepsilon U_{кб}$ кәркинлик мәнбәји транзистордакы дахили мүсбәт әкс әлагәни ифадә едир вә коллектор кәркинлијинин дәјишмәсинин тә'сириндән киришдә кәркинлијин

дәјишмәсини тәсвир едир. $\varepsilon=10^{-4}$-10^{-3} олдуғундан чох вахт бу мәнбәи еквивалент схемә дахил етмирләр.

Емиттер вә коллектор кечидләринин $C_{е(б)}$ вә $C_{к(б)}$ тутумлары ујғун кечидләрин сәдд вә диффузија тутумларынын чәминә бәрабәрдир.

Сәдд тутуму кечидә верилән кәркинлијин ишарәсиндән асылы олдуғундан (мәсәлән дүз гошулмада емиттер кечидиндә сәдд тутуму әкс гошулма һалындан чохдур) емиттер кечидинин сәдд тутуму коллектор кечидинин сәдд тутумундан чохдур.

Диффузија тутуму исә кечиддә кәркинлијин дәјишмәсиндән базада јүкләрин дәјишмәси илә характеризә олунур. Базада јүкләрин емиттер кечидиндәки кәркинлијин тә'сириндән дәјишмәси јүкдашыјычыларын базаја инжексијасы илә, коллектор кечидиндәки кәркинлијин тә'сириндән дәјишмәси исә Ерли еффекти илә әлагәдардыр. Базада јүкүн ејни бир гијмәтдә дәјишмәси үчүн коллектор кечидиндәки кәркинлијин дәјишмәси емиттер кечидиндәки кәркинлијин дәјишмәсиндән чох асылыдыр. Бу о демәкдир ки, емиттер кечидинин диффузија тутуму коллектор кечидинин диффузија тутумундан чохдур.

$C_{е(б)}$ вә $C_{к(б)}$ тутумларынын гијмәтләри транзисторун нөвүндән асылыдыр: јүксәк тезликли транзисторынкынларын һәр ики тутуму алчаг тезликли транзисторларынкындан кичикдир. Диффузија (әсасән) тутумуну ифадә едән $C_{е(б)}$ тутуму бир нечә јүз пикофарад, сәдд тутуму илә мүәјјән едилән $C_{к(б)}$ тутуму исә бир нечә он пикофарад һәддиндә олур.

Белә фәргләнмәләринә бахмајараг $C_{к(б)}$ тутуму јүксәк тезликләрдә транзисторун ишинә даһа гүввәтли тә'сир көстәрир. Бу онунла әлагәдардыр ки, $C_{е(б)}$ кичик $r_е$ мүгавимәти илә, $C_{к(б)}$ исә бөјүк $r_{к(б)}$ мүгавимәти илә шунтланмышлар. Она көрә дә $C_{к(б)}$ тутумуну еквивалент схемләрдә 10kһс-ләрдә тезликләрдә, $C_{е(б)}$-ни исә 10Mһс-ләрлә тезликләрдә нәзәрә алмаг лазым кәлир. Орта тезликләрдә (бир нечә он һс-ләрдән бир нечә kһс-ә гәдәр) кечидләрин тутуму нәзәрә алынмыр вә еквивалент схемә дахил едилмир.

Емиттер чәрәјанынын диференсиал өтүрмә әмсалы бу чәрәјанын кичик артымларында α-ны даһа дәгиг характеризә едир:

$$\alpha = \left.\frac{dJ_k}{dJ_e}\right|_{U_{кб}=const}$$

Орта тезликләрдә α=const олдуғу гәбул едилир. Јүксәк тезликләрдә дешикләрин базадан кечмә мүддәти өзүнү көстәрир, база чәрәјаны фазаја көрә емиттер чәрәјанындан фәргләнир вә α азалыр. Јүксәк тезликләрдә бу әмсал комплекс кәмијјәт олур $\left(\dot{\alpha} = \alpha_0 + j\alpha(\omega)\right)$, онун модулу вә аргументи мүвафиг тезлијә көрә һесабланыр. Транзисторун тезлик хассәләри һүдуд f_α тезлијинә көрә гијмәтләндирилир. Бу елә тезликдир ки, бу тезликдә $|\dot{\alpha}|\sqrt{2}$ дәфә азалыр. f_α транзисторун әсас параметрләриндән биридир. f_α-нын гијмәтиндән асылы олараг алчаг тезликли ($f_\alpha \leq$ 3Mhc), орта тезликли (3Mhc $\leq f_\alpha \leq$ 30 Mhc), јүксәк тезликли (30Mhc $\leq f_\alpha <$ 300 Mhc) вә ифрат јүксәк тезликли ($f_\alpha >$ 300Mhc) транзисторлар мөвчуд олур.

Үмуми емиттерли гошулма схеминин Т-шәкилли еквивалент схеминдә (шәкил 4.13*б*) $r_е$ вә $r_б$ мүгавимәтләри һәм физики мә'налары, һәм дә гијмәтләринә көрә үмуми базалы схемә ујғундур. Әкс әлагә әмсалы чох кичик олдуғундан әкс әлагәни нәзәрә алан кәркинлик мәнбәји схемә гошулмур. Үмуми емиттерли схемдә кириш чәрәјаны база чәрәјаны олдуғундан еквивалент схемин чыхыш дөврәсинә $\beta i_б$ чәрәјан мәнбәји гошулур. Чәрәјанларын истигамәти үмуми базалы схемдә олдуғу кимидир вә $i_е = i_к + i_б$ шәрти тә'мин едилир. $r_{к(е)} = r_{к(б)}/(1+\beta)$ Ерли еффекти нәтичәсиндә $U_{ке}$-нин дәјишмәсиндән $J_к$-нын дәјишмәсини нәзәрә алыр. Үмуми емиттерли схемдә кириш чәрәјан база чәрәјаны олдуғундан вә бу чәрәјан емиттер чәрәјанындан (1+β) дәфә аз олдуғундан үмуми базалы схемдән үмуми емиттерли схемә кечәндә коллектор кечидинин һәм актив, һәм дә тутум мүгавимәти (1+β) дәфә азалыр. Бу о демәкдир ки, үмуми емит-

терли схемдә $C_{к(е)}=(1+\beta)C_{к(б)}$. $C_{к(б}$-нин гијмәтинин артмасы јүксәк тезликләрдә $C_{е(е)}=C_{е(б)}$ тутумуна нисбәтән онун тә'сирини даһа да чохалдыр. Она көрә $C_{е(е)}$ тутумуну схемә дахил етмирләр.

Үмуми емиттерли схемдә дә чәрәјанын диференсиал өтүрмә әмсалы тезликдән асылыдыр:

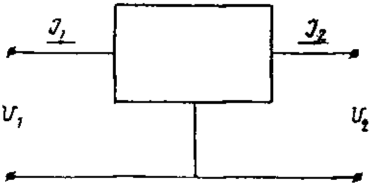
$$\beta = \left.\frac{dJ_k}{dJ_б}\right|_{U_{ке}=const}$$

Әкәр бу схемдә дә һүдуд тезлијини $|\dot{\beta}|$-нин $\sqrt{2}$ дәфә азалмасына көрә тә'јин етсәк $f_\beta=f_\alpha/(1+\beta)$, үмуми емиттерли схемин тезлик хүсусијјәтләринин үмуми базалы схемә нисбәтән даһа пис олдуғуну бир даһа көрәрик.

Транзисторун Т-шәкилли еквивалент схемләринә дахил олан параметрләр јарымкечиричи гатларын һәндәси өлчүләри вә материалына көрә һесаблана биләр. Лакин онлары билаваситә өлчмәк мүмкүн дејилдир, чүнки гатларын сәрһәдинә вә кечидә чиһаз гошмаг олмур. Она көрә дә транзисторун өлчүлә билән параметрләри кими онун хүсусијјәтләрини дөрд гүтблү (даһа дәгиг үчгүтблү) кими ифадә едән параметрләр көтүрүлүр.

Кичик сигнал һалында (чәрәјан вә кәркинликләрин артымлары кичик оланда) транзисторун дөрдгүтблү кими параметрләри һәм өз араларында, һәм дә Т-шәкилли әвәз схеминдәки физики параметрләрлә әлагәдардыр.

Дөрдгүтблүнүн (шәкил 4.14) кириш (U_1, J_1) вә чыхыш (U_2, J_2) чәрәјан вә кәркинликләри арасында әлагә ики тәнликлә ифадә олунур. Бу кәмијјәтләрин икисини асылы олмајан дәјишән кими гәбул едәрәк, дикәр икисини тапырыг.



Шәкил 4.14. Транзисторун дөрд гүтблү кими тәсвири

Адәтән асылы олмајан (сәрбәст) дәјишән кими кириш чәрәјаны вә чыхыш кәркинлијинин артымлары (ΔJ_1 вә ΔU_2,) гәбул едилир. Кириш кәркинлијинин

ΔU_1 вә чыхыш чәрәјанынын ΔJ_2 артымларынын исә транзисторун h-параметрләри илә ифадә едирләр:

$$\Delta U_1 = h_{11}\Delta J_1 + h_{12}\Delta U_2;$$

$$\Delta J_2 = h_{21}\Delta J_1 + h_{22}\Delta U_2.$$

Бурада $h_{11}=\Delta U_1/\Delta J_1$-чыхыш кәркинлијинин сабит гијмәтиндә ($\Delta U_2=0$) транзисторун кириш мүгавимәти;

$h_{12}=\Delta J_2/\Delta J_1$- чыхыш кәркинлијинин сабит гијмәтиндә ($\Delta U_2=0$) чәрәјаны өтүрмә әмсалы;

$h_{21}=\Delta U_1/\Delta U_2$- кириш чәрәјанынын сабит гијмәтиндә ($\Delta J_1=0$) кәркинлијә көрә әкс әлагә әмсалы;

$h_{22}=\Delta J_2/\Delta U_2$ - кириш чәрәјанын сабит гијмәтиндә ($\Delta J_1=0$) транзисторун чыхыш кечиричилијидир.

h-параметрләрин конкрет гијмәтләри транзисторун гошулма схеминдән (кәркинлик вә чәрәјанларын кириш вә чыхыш дөврәсинә аидлијиндән) асылыдыр. Сорғу китабларында адәтән орта тезликләрдә үмуми базалы схем үчүн чәрәјан вә кәркинлијин сабит топлананларынын типик гијмәтләриндә өлчүлмүш h-параметрләр верилир.

Транзисторун h-параметрләри илә физики параметрләри арасында асылылығы тапмаг үчүн еквивалент схемдән (шәкил 4.13) истифадә едәк. $\varepsilon U_{кб}=0$ көтүрүб дәјишән топлананлары артымларла әвәз едәк: $u_{еб}=\Delta U_1$; $i_е=\Delta J_1$; $u_{кб}=\Delta U_2$; $i_к=\Delta J_2$. $i_б$ чәрәјаныны кириш чәрәјаны илә ифадә едәк: $i_б=(1-\alpha)\Delta J_1$.

Транзисторун кириш дөврәси үчүн $\Delta U_2=0$ һалында јаза билирик: $\Delta U_1=\Delta J_1[r_е+(1-\alpha)r_б]$.

Бурадан $h_{11}= r_е+(1-\alpha)r_б$ аларыг.

$\Delta U_2=0$ һалында чыхыш дөврәсинин чәрәјаныны тапараг: $\Delta J_2=\alpha\Delta J_1$ бурадан исә $h_{21}=\alpha$ аларыг.

$\Delta J_1=0$ һалында чыхыш дөврәсинин чәрәјаны өлчү олачагдыр.

$$\Delta J_2 = \frac{\Delta U_2}{r_{к(б)} + r_б} \approx \frac{\Delta U_2}{r_{к(б)}}$$

Бурадан $h_{22}=1/r_{к(б)}$ алыныр.

Бу һал үчүн кириш вә чыхыш кәркинликләри белә тә'јин олунур:

$$\Delta U_1=\Delta J_2 \cdot r_б;\ \Delta U_2 \approx \Delta J_2 r_{к(б)}$$

Бурадан $h_{12} \approx r_б/r_{к(б)}$ алыныр.

Алынан нисбәтләрин көмәји илә транзисторун физики параметрләрини онун h-параметри илә ифадә едәк:

$$r_е=h_{11}-(1-h_{21})h_{12}/h_{22}; \qquad r_б=h_{12}/h_{22}; \qquad r_{к(б)}=1/h_{22}; \qquad \alpha=h_{21}.$$

5. УНИПОЛЈАР ТРАНЗИСТОРЛАР

Иш принсипи јалныз бир ишарәли јүкдашыјычыларын (електронларын вә ја дешикләрин) истифадә олунмасына әсасланан транзисторлара униполјар транзисторлар дејилир. Бу транзисторларда чәрәјан һәмин чәрәјанын ахдығы каналын кечиричилијинин електрик саһәси васитәси илә дәјишдирилмәси јолу илә идарә олунмасы. Мәһз буна көрә бу транзисторлары саһә транзисторлары да адландырырлар.

Биполјар транзисторлара нисбәтән бу чиһазларын һазырланма технолокијасы даһа мүкәммәлдир, ајры-ајры нүсхәләринин параметрләри бир-биринә даһа јахын олур вә дәјәри дә кичикдир. Бу транзисторлар јүксәк кириш мүгавимәтинә малик олурлар.

Чәрәјан кечирән каналын јарадылмасы үсулуна көрә бу транзисторлар 3 група бөлүнүрләр: 1) *p-n* кечидли; 2) гурама каналлы; 3) индуксија едилмиш каналлы.

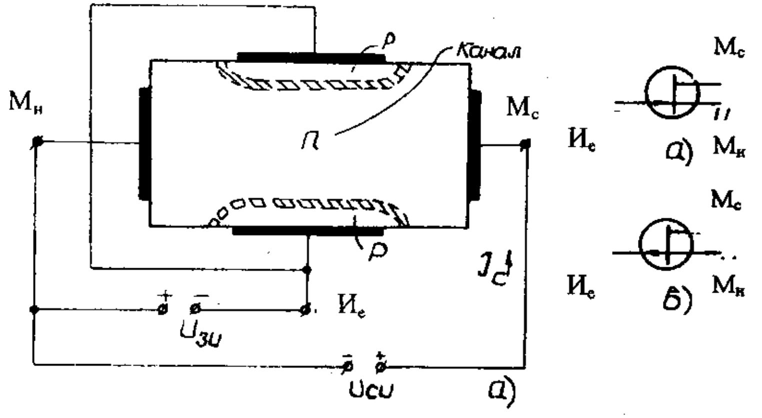
2-чи вә 3-чү груп транзисторлара МДЈ-транзисторлар (метал, диелектрик вә јарымкечиричи сөзләринин илк һәрфләриндән) дејилир.

5.1. *p-n* кечидли униполјар транзистор

Бу транзисторун моделиндән көрүнүр ки, (шәкил 5.1*а*) чәрәјан ахан канал ики *p-n* кечид арасында јерләшмиш *n* типли јарымкечиричи гатдан ибарәтдир. Канал чиһазын харичи електродлары илә нагилләр бирләшдирилир. Јүкдашыјычыларын (бу һалда електронларын) һәрәкәтә башладығы електрода мәнбә ($M_н$), јүкдашыјычыларын кәлиб чыхдығы електрода исә мәнсәб ($M_с$) дејилир. *p* типли јарымкечиричи гатлар *n* гатына нисбәтән даһа јүксәк ашгар консентрасијасына маликдирләр. Һәр ики *p* гаты бир-бири илә бирләшиб бир харичи електрода малик олур вә буна идарәедичи електрод ($И_е$) дејилир.

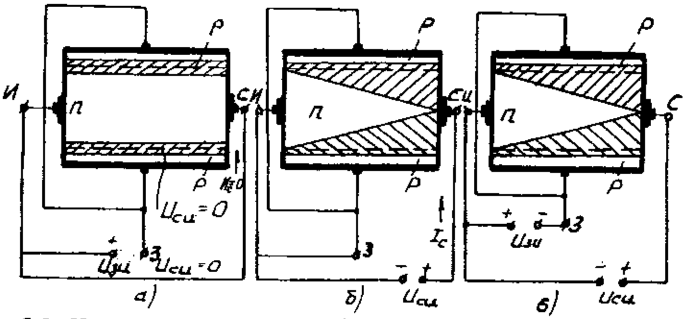
Транзисторун идарәедичи хүсусијјәти ондан ибарәтдир ки, $U_{зи}$ дәјишдикчә јүкдашыјычылары түкәнмиш јарымкечиричи

гатдан ибарәт һәр ики *p-n* кечидин ени дәјишир. *p* гатында ашгарын консентрасијасы даһа јүксәк олдуғундан *p-n* кечидин ениниң дәјишмәси әсасән даһа бөјүк мүгавимәтли *n* гатынын һесабына баш верир (Ерли еффекти). Бунун нәтичәсиндә чәрәјан кечирән каналын ен кәсији, онун кечиричилији вә транзисторун чыхыш чәрәјаны J_c дәјишир.



Шәкил 5.1. *p-n* кечидли униполјар транзисторун гурулушу (*a*) вә шәрти ишарәләри; *n*-каналлы (*б*); *p*-каналлы (*в*)

Каналын кечиричилијинә һәм $U_{зи}$, һәм дә $U_{си}$ тә'сир көстәрир. Әкәр $U_{зи}=0$, $U_{зи}<0$ оларса (шәкил 5.2*a*), $U_{зи}$-нин дәјишмәси каналын енини онун бүтүн узунлуғу боју дәјишир. Каналын кечиричилији дә дәјишир, лакин бу режимдә чыхыш чәрәјаны сыфра бәрабәр олур ($J_c=0$), чүнки $U_{си}=0$. Әкәр $U_{зи}=0$ вә $U_{зи}>0$ оларса, каналдан J_c чәрәјаны ахыр. Бунун нәтичә-синдә каналда гијмәти мәнсәб истигамәтиндә артан кәркинлик дүшкүсү јараныр.



Шәкил 5.2. Кәнар кәркинлик мәнбәләринин тә'сириндән *p-n* кечидли транзисторун каналынын кечиричилијинин дәјишмәси

Мәнбә-мәнсәб саһәсиндә үмуми кәркинлик дүшкүсү $U_{си}$-јә бәрабәр олур. Буна көрә каналын нөгтәләринин потенсиалы онун узунлуғу бојунча ејни олмур вә мәнбәдә сыфырдан башлајыб мәнсәбдә $U_{си}$-јә чатыр. Мәнбәјә нисбәтән *p* гатларында нөгтәләрин потенсиалы исә идарәедичи електродун потенсиалы илә мүәјјән едилир вә бу һалда сыфра бәрабәр олур ($U_{зи}$=0).

Бу сәбәбдән *p-n* кечидләрә тәтбиг едилән әкс кәркинлијин гијмәти мәнбәдән мәнсәбә тәрәф артыр вә *p-n* кечидләр мәнсәб истигамәтиндә кенишләнир (шәкил 5.2б). Она көрә дә каналын ени мәнбәдән мәнсәбә гәдәр азалыр. $U_{си}$ кәркинлијинин артмасы каналдакы кәркинлик дүшкүсүнү вә онун кечиричилијини азалдыр. $U_{си}$-нин һәр һансы бир гијмәтиндә мәгнәб јахынлығында һәр ики *p-n* кечид тамамилә бир-биринә јахынлашыр вә каналын мүгавимәти чох бөјүк олур.

Канала һәр ики кәркинлијин тә'сири ($U_{си}$ >0 вә $U_{зи}$<0) шәкил 5.2*в*-дә көстәрилмишдир.

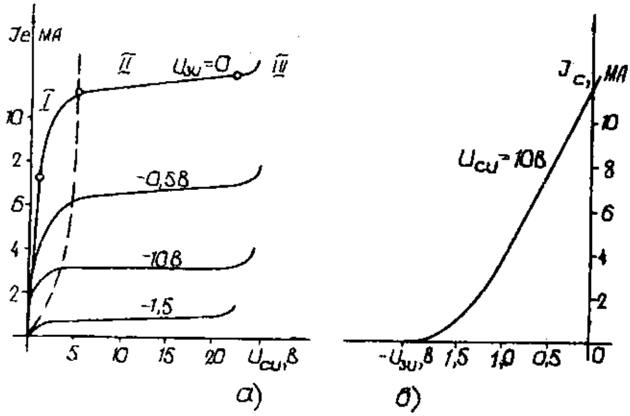
Бу транзисторларын әсас ики нөв волт-ампер характеристикасы мараг доғурур.

Мәнсәб (чыхыш) характеристикалары $U_{зи}$=0 оланда мәнсәб ҹәрәјанынын мәнсәб кәркинлијиндән асылылығыны көстәрир ($J_c=f(U_{си})_{U_{зи}=const}$ (шәкил 5.3*а*). I һиссә ҹәрәјанын кәркинликдән гүввәтли асылылығыны, II һиссә зәиф асылылығыны

көстәрир, III һиссә исә p-n кечидин дешилмәси һалына ујғун кәлир.

$U_{зи}$=0 һалында вә $U_{си}$-нин кичик гијмәтләриндә кәркинлик каналын кечиричилијинә аз тә'сир едир вә J_c-нин $U_{си}$-дән асылылығы хәтти характер дашыјыр. $U_{си}$ артдыгча каналын енсизләшмәсинин кечиричилијә тә'сири артыр вә чәрәјанын артма диклији азалыр. II һиссәнин сәрһәдинә чатанда каналын ени минимума чатыр, чүнки һәр ики p-n кечид тамамилә бирбиринә јахынлашыр.

$U_{си}$-нин бундан сонракы артымы чәрәјаны бир о гәдәр дә артырмыр, чүнки $U_{си}$ артдыгча каналын мүгавимәти дә артыр. Бу һалда J_c-нин бир гәдәр артмасы мүхтәлиф сызмаларын вә p-n кечидләриндәки гүввәтли електрик саһәсинин тә'сири илә изаһ едилир.



Шәкил 5.3. p-n кечидли вә n-каналлы униполјар транзисторун чыхыш (мәнсәб) (*а*) вә мәнсәб-идарәедичи електрод(*б*) характеристикалары

III һиссәдә J_c-нин кәскин артмасы мәнсәб јахынлығында p-n кечидин мәнсәб-идарәедичи електрод дөврәси илә селвари дешилмәси һалына ујғундур. Дешилмә кәркинлијин "в" нөгтәсинә ујғун кәлир.

Идарəедичи електрода мəнфи əкс кəркинлик вердикдə ($U_{зи}$<0) канал енсизлəшир вə онун кечиричилији азалыр. Она көрə дə $U_{си}$<0 һалларында алынмыш əјрилəрдə чəрəјанын артма диклији аз олур. $U_{зи}$ дə тə'сир көстəрдијиндəн *p-n* кечидлəринин һəчми јүклəри илə каналын енсизлəшмəси даһа кичик кəркинликдə баш верир вə I вə II һиссəлəрин сəрһəдинə даһа кичик мəнбə-мəнсəб кəркинлији ујғун кəлир. Каналын тəмиз бағланма кəркинликлəринə мəнсəб характеристикаларынын гырыг хəтлə кəсишмə нөгтəлəринин абсислəри ујғун кəлир. Транзисторун мəнсəб-идарəедичи електрод дөврəсилə дешилмəси дə даһа кичик кəркинликлəрдə баш верир.

Транзисторун əсас параметрлəриндəн бири $J_c \to 0$ һалында ујғун идарəедичи електрод кəркинлијинин гијмəтидир. Бу чиһазын идарəедичи електрод дөврəси илə тəмиз бағланма кəркинлијинə ујғундур, она бағлама вə ја кəсилмə кəркинлији ($U_{зио}$) дејилир. Мəнсəб-идарəедичи електрод (кириш) характеристикалары $U_{си}$=const һалында Je-нин $U_{зи}$-дəн асылылығыны ифадə едир: $J_c = f(U_{зи})_{U_{си}=const}$ (шəкил 5.3*б*). Бу характеристиканы мəнсəб характеристикасы əсасында да гурмаг олар.

Транзисторун əсас параметрлəри ашағыдакылардыр:

$J_{c\ max}$ - мəнсəб характеристикасында ($U_{зи}=0$ оланда) "в" нөгтəсинə ујғун чəрəјан;

$U_{си max}$ - $U_{зи}=0$ - һалында мəнсəб-идарəедичи електрод саһəсинин дешилмə кəркинлијиндəн 1,2-1,5 дəфə кичик көтүрүлүр;

$U_{зио}$ - мəнсəб чəрəјанынын сыфра јахын олдуғу һалда идарəедичи кəркинлији;

$r_i = \left.\frac{dU_{си}}{dJ_c}\right|_{U_{зи}=const}$ - дахили мүгавимəт (чыхыш характеристикасында II һиссəнин маиллијини көстəрир);

$S = \left.\frac{dJ_c}{dU_{си}}\right|_{U_{зи}=const}$ - мəнсəб-едичи електрод характеристикасынын диклијидир вə $U_{зи}$-нин J_c-јə тə'сирини көстəрир;

$r_{кир}=dU_{зи}/dJ_c$ - кириш мүгавимәтидир вә әкс истигамәтдә гошулмуш *p-n* кечидләрин мүгавимәтләри илә мүәјјән едилир.

$C_{зи}$ вә $C_{зс}$ - електродларарасы тутумлардыр вә бунлар мүвафиг олараг, мәнбәјә вә мәнсәба јахын *p-n* кечидләрин мөвчудлуғу илә әлагәдардыр.

Саһә транзисторун еквивалент схеми (шәкил 5.4а) чәрәјан вә кәркинликләрин дәјишән топламалары үчүн чыхыш характеристикасынын II һиссәсиндә транзисторун ишини характеризә едир.

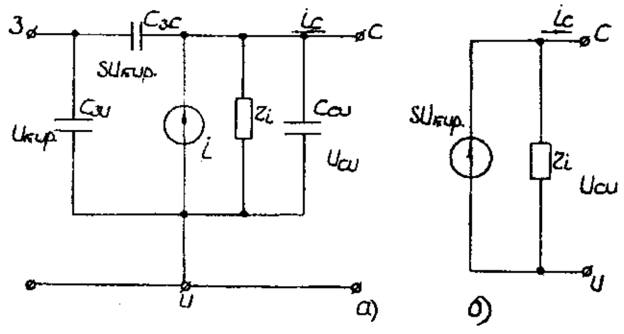
Бу транзисторда тәмас потенсиал фәрги ($\Delta\varphi_0$) вә јүкдашыјычыларынын јүрүклүјү температурдан асылы олдуғундан чиһазын параметрләринә вә характеристикаларына температур тә'сир көстәрир. $\Delta\varphi_0$ потенсиалы әкс гошулмуш *p-n* кечидләрин кәркинликләринин бир һиссәсини тәшкил едир.

Температурун тәсириндән кечидләрдәки кәркинликләр вә кечидләрин ени дәјишир, бу исә каналын енини вә кечиричилијини дәјишдирир. Температур артдыгча $\Delta\varphi_0$ азалыр, каналын ени вә кечиричилији артыр. Јүкдашыјычыларын јүрүклүјүнүн азалмасындан каналын кечирикилији азалыр.

Температурун транзисторун параметр вә характеристикаларына тә'сири чох мүрәккәбдир вә һәр нөв чиһазда өзүнү бир чүр көстәрир. Адәтән сорғу китабларында онларын температурдан асылылығы көстәрилир.

Саһә транзисторунун еквивалент схеми (шәкил 5.4) чәрәјан вә кәркинликләрин дәјишән топлананлары үчүн чыхыш характеристикасынын II һиссәсиндә транзисторун ишини характеризә едир.

Бу һиссәдә чиһаздакы чәрәјан идарәедичи кәркинлик вә характеристиканын диклији илә мүәјјән едилир. Она көрә дә чыхыш дөврәсинә $S{\cdot}u_{кир}$ чәрәјан мәнбәји дахил едилир. Бу мәнбәјә паралел мәнсәб кәркинлијинин чәрәјана тә'сирини нәзәрә алан r_i мүгавимәти гошулур. $C_{зи}$, $C_{зс}$ вә $C_{си}$ тутумлары јүксәк тезликләрдә електродларарасы тутумларын транзисторун ишинә тә'сирини нәзәрә алыр.



Шәкил 5.4. *p-n* кечидли саһә транзисторунун јүксәк (*а*) вә алчаг тезликләрә ујғун еквивалент схемләри

Кичик тезликләр үчүн саһә транзисторун еквивалент схеми шәкил 5.4 *б*-дә көстәрилмишдир.

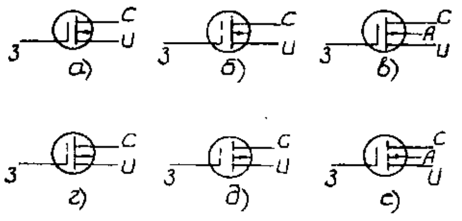
5.2. МДЈ - транзисторлар

p-n кечидли транзисторларда идарәедичи електрод чәрәјан кечирән каналын кечидә јахын јерләшән гаты илә билаваситә тәмасда олур. Онлардан фәргли олараг, МДЈ-транзисторларда бу електрод һәмин гатдан диелектрик гаты васитәси илә изолә едилир. Она көрә МДЈ-транзисторлары изолә олунмуш идарәедичи електродлу транзисторлар сырасына аид едирләр.

МДЈ-транзисторлар силисиумдан һазырланыр, диелектрик кими исә силисиум оксидиндән истифадә едилир. Бунунла әлагәдар бу чиһазларын үчүнчү ады јаранмышдыр: МОЈ-транзисторлар (метал, оксид, јарымкечиричи сөзләриндән). Диелектрикин структура дахил едилмәси транзисторун кириш мүгавимәтини даһа да артырыр (10^{12}-10^{14} Ом).

МДЈ-транзисторларын иш принсипи енинә јөнәлмиш електрик саһәсинин тә'сири алтында јарымкечиричинин диелектриклә сәрһәддә сәтһјаны гатынын кечиричилијинин дәјишмәсинә әсасланыр. Јарымкечиричинин сәтһјаны гаты МДЈ транзисторларда чәрәјан кечирән канал ролуну ојнајыр.

МДЈ-транзисторлар үмуми һалда дөрделектродлу чиһазлардыр. Дөрдүнчү електрод ролуну әсас јарымкечиричи лөвһәјә бирләшдирилмиш алтлыг ојнајыр. МДЈ-транзисторлар *p* вә *n* типли каналлы олурлар. Онларын мүхтәлиф типләринин шәрти ишарәләри шәкил 5.5-да көстәрилмишдир.

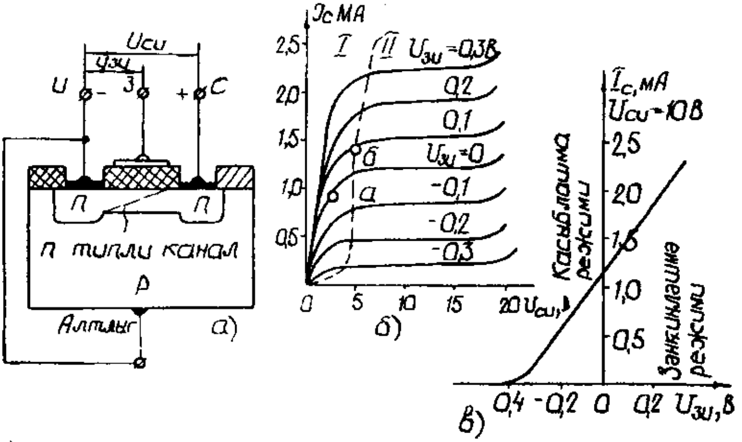


Шәкил 5.5. МДЈ-транзисторларын шәрти ишарәләри: мәхсуси каналлы (*n*-типли (*а*), *p*-типли (*б*), алтлыгдан чыхышы олан (*в*)); индуксија едилмиш каналлы (*n*-типли (*г*), *p*-типли (*ғ*) алтлыгдан чыхышы олан (*д*))

n типли гурама каналлы МДЈ-транзисторун гурулушу шәкил 5.6 а-да көстәрилмишдир. Әсас *p* типли силисиум лөвһәсиндә диффузија технолокијасы илә мәнсәб, мәнсәб саһәләри вә *n* типли канал јарадылмышдыр. Оксид гаты (SiO_2) мәнбәјә вә мәгнәбә јахын сәтһләри мүһафизә вә идарәедичи електроду каналдан изолә етмәк үчүндүр. Чох вахт алтлығын чыхышы мәнбәјә гошулур.

Чиһазын ишләмә принсипини гурулушуна вә характеристикаларына әсасән арашдыраг. Чыхыш характеристикалары (шәкил 5.6*б*) *p-n* кечидли транзисторун характеристикаларына бәнзәјир. $U_{зи} = 0$ һалы бурада мәнсәбин идарәедичи електродла бирләшмәсинә ујғун кәлир.

Бу һалда харичи кәркинлик мәнбә-мәнсәб саһәсинә мүсбәт мәнсәбә верилмәклә гошулур. $U_{зи}$=0 олдуғундан ахан чәрәјан каналын илкин кечиричилији илә мүәјјән едилир. 0-а саһәсиндә каналда кәркинлик дүшкүсү кичик, $J_с(U_{си})$ асылылығы исә хәттидир. "б" нөгтәсинә јахынлашдыгча каналдакы кәркинлик дүшкүсү онун енинә вә кечиричилијинә даһа чох тә′сир көстәрир (гырыг хәтт) вә а-б саһәсиндә әјринин диклији азалыр. "б" ногтәсиндән сонра каналын ени минимума чатыр, бу, чәрәјанын артмасыны мәһдудлашдырыр вә характеристикада аз маиллијә малик II һиссә әмәлә кәлир.



Шәкил 5.6. Мәхсуси каналлы МДЈ-транзисторун конструктив гурулушу (*а*), чыхыш (мәгнәб) (*б*) вә мәнсәб-идарәедичи електрод (*в*) характеристикалары

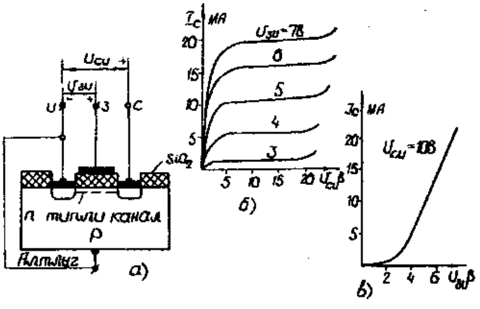
$U_{зи}<0$ оланда онун саһәси каналдакы јүкдашыјычылары (електронлары) итәләјиб каналдан чыхарыр, каналда онларын консентрасијасы ашағы дүшүр вә каналын кечиричилији азалыр. Белә кәркинликләрә ујғун мәнсәб характеристикалары $U_{зи}=0$ һалына ујғун характеристикалардан ашағыда јерләшир. Транзисторун $U_{зи}<0$ режиминдә каналда јүкдашыјычыларын консентрасијасы азалдығындан бу режимә касыблашма режими дејилир.

$U_{зи}>0$ оланда онун саһәси јарымкечиричинин *р* гатындан електронлары канала чәкиб кәтирир, онларын каналдакы консентрасијасы вә каналын кечиричилији артыр. Бу режим зәнкинләшмә режими адланыр. Буна ујғун мәнсәб характеристикалары илкин ($U_{зи}=0$-а ујғун) әјридән јухарыда јерләшир. Бу транзистор үчүн мәнсәб-идарәедичи електрод кәркинлијинин мүәјјән һәдди вардыр ки, ондан сонра мәнсәбә јахын олан мәнсәб-идарәедичи електрод саһәси дешилир. Дешилмә һалына характеристиканын III саһәси вә һүдуд мәнсәб кәркинлији ујғун кәлир. $U_{зи}<0$ оланда $U_{сз}$ кәркинлији артыр вә бу һалда дешилмә даһа кичик $U_{си}$ кәркинлијиндә баш верир.

ғун кәлир. $U_{зи}$<0 оланда $U_{сз}$ кәркинлији артыр вә бу һалда дешилмә даһа кичик $U_{си}$ кәркинлијиндә баш верир.

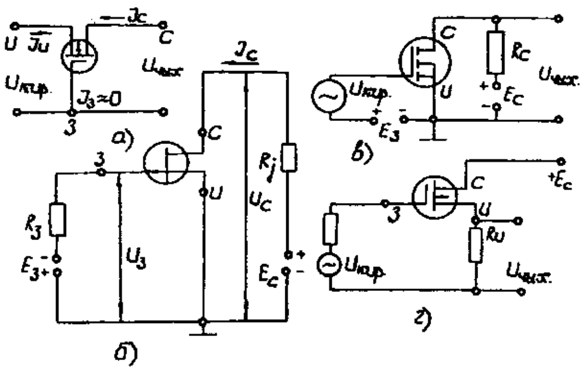
Кириш характеристикасы шәкил 5.6 *в*-дә көстәрилмишдир. Көрүндүјү кими бу транзистор һәм түкәнмә ($U_{зи}$<0), һәм дә зәнкинләшмә ($U_{зи}$>0) режимләриндә ишләјә билирләр.

Индуксијаланмыш каналлы МДЈ-транзисторларда чәрәјан кечирән канал әввәлчәдән һазырланмыр. Бурада канал идарәедичи електрода мәнбәјә нисбәтән мүсбәт кәркинлик вериләндә електронларын јарымкечиричи лөвһәдән ахыб кәлмәси һесабына јарадылыр, даһа доғрусу сүн'и индуксија едилир (шәкил 5.7*а*). Електронларын беләахыны саһәсиндә сәтһјаны саһәдә јарымкечиричинин електрик кечиричилији артыр вә башга сөзлә мәнбә илә мәнсәби бирләшдирән *n* типли чәрәјан кечирән канал јараныр. Идарәедичи електрода верилән мүсбәт кәркинлик артдыгча каналын кечиричилији артыр. Беләликлә, бу транзистор јалныз зәнкинләшмә режиминдә ишләјир. Чыхыш характеристикалары (шәкил 5.7*б*) форма вә характерләри илә әввәлкиләрә бәнзәјир. Фәрг ондадыр ки, транзистор полјарлығы $U_{си}$ илә ејни олан идарәедичи кәркинлик илә идарә олунур. Бурада $U_{зи}$=0 оланда J_c=0 олур, һалбуки мәхсуси каналлы МДЈ-транзисторда бунун үчүн идарәедичи кәркинлијин ишарәсини дәјишмәк тәләб олунур.



Шәкил 5.7. Индуксијаланмыш каналлы МДЈ-транзисторун конструктив гурулушу (*а*), чыхыш (*б*) вә кириш (*в*) характеристикалары

Кириш характеристикасы шәкил 7.7 в-дә көстәрилмишдир. МДЈ-транзисторларын еквивалент схемләри *p-n* кечидли саһә транзисторунун әвәз схеми илә ејнидир. МДЈ-транзисторларын да үч гошулма схемләри мөвчуддур: үмуми мәнсәбли, үмуми идарәедичи електроду вә үмуми мәнбәли гошулма схемләри. Үмуми идарәедичи електродлу схем кичик кириш

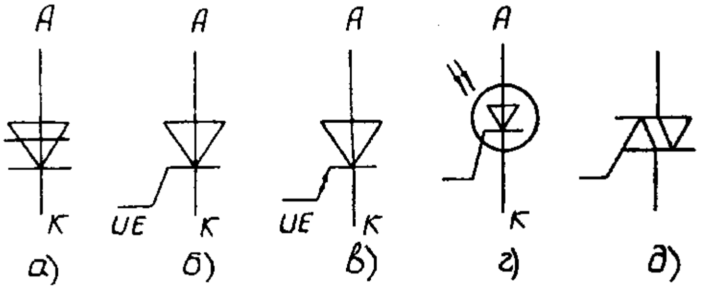


Шәкил 5.8. Униполјар транзисторларын дөврәјә гошулма схемләри: *а)* үмуми идарәедичи електродла; *б),в)* үмуми мәнбә илә; *г)* үмуми мәнсәб илә

мүгавимәтинә малик олдуғундан практикада чох аз ишләдилир. *p-n* кечидли вә МДЈ типли транзисторларын дөврәјә гошулма схемләри шәкил 5.8-дә көстәрилмишдир.

6. ТИРИСТОРЛАР

Ики дајаныглы вәзијјәтә – алчаг кечиричиликли вә јүксәк кечиричиликли вәзијјәтләрә малик олан дөрдгатлы јарымкечиричи чиһаза тиристор дејилир. Тиристорун бир вәзијјәтиндән дикәринә кечирилмәси харичи тә'сир (кәркинлик, чәрәјан вә ја ишыг сели) нәтичәсиндә һәјата кечирилир. Онлар диод тиристорларына (шәкил 6.1*а*) вә триод тиристорларына (шәкил 6.1*б-г*) бөлүнүрләр. Диод тиристорларына динистор дејилир вә онлар бағлы вәзијјәтдән ачыг вәзијјәтә анодла (А) катод (К) арасындакы кәркинлијин мүәјјән бир гијмәтиндә кечирләр. Триод тиристорларына тринистор дејилир вә онларын вәзијјәти үчүнчү - идарәедичи електродун (ИЕ) көмәји илә дәјишилир. Идарәедичи електродун көмәји илә чиһазын вәзијјәтини дәјишмәкдә бир вә ја ики әмәлијјат јеринә јетирилә биләр. Бир әмәлијјатлы тиристорда (шәкил 6.1*б*) идарәедичи електродун дөврәси илә тиристору јалныз ачмаг олар, ону бағламаг үчүн исә анод-катод арасындакы кәркинлијин азалтмаг вә ја онун ишарәсини дәјишмәк лазымдыр. Ики әмәлијјатлы тиристорларда (шәкил 6.1*в*) идарәедичи електродун дөврәси илә тиристору һәм ачмаг, һәм дә бағламаг мүмкүндүр. Ишыг шүасы илә идарә олунан тиристорлара фототиристор дејилир (шәкил 6.1*г*).



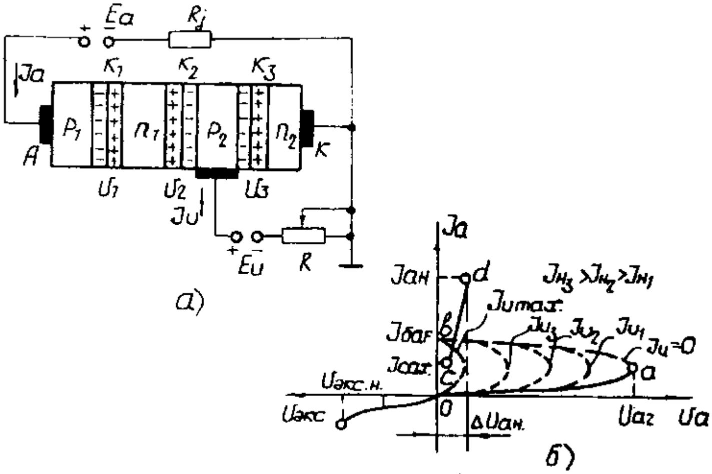
Шәкил 6.1. Тиристорларын шәрти ишарәләри: а) динистор; б) бир әмәлијјатлы тиристор; в) икиәмәлијјатлы тиристор; г) фототиристор; ғ) симистор

Бүтүн адлары чәкилән чиһазлар тәмассыз ачар ролуну ојнајыр вә чәрәјаны бир истигамәтдә кечирирләр. Һәр ики истигамәтдә чәрәјан кечирән тиристорлара симметрик тиристор-симистор дејилир (шәкил 6.1*б*). Тә'јинатына көрә симистор ики гаршылыглы паралел гошулмуш ади тиристорун вәзифәсини јеринә јетирир.

Дүз чәрәјанын номинал гијмәтинә көрә тиристорлар алчаг күчлү ($J_{а.н.} \le 0,3А$), орта күчлү ($0,3 < J_{а.н.} \le 10А$) вә бөјүк күчлү ($J_{а.н.} > 10А$) тиристорлара-бөлүнүрләр.

Тиристорун типик дөрдгатлы стуруктурундан көрүнүр ки, о ики транзистор структурундан (p_1-n_1-p_2 вә n_2-p_2-n_1) ибарәтдир (шәкил 6.2*а*). p_1-гаты анод, n_2-гаты катод ролуну ојнајыр. p_2 гаты идарәедичи електрод (ИЕ) адланан метал тәмаса маликдир вә бу електрода идарәедичи кәркинлик мәнбәји $E_п$ гошулур. n_1вә p_2 гатлары база гатларыдыр, K_1 вә K_3 кечидләри емиттер кечидләри, K_2 кечиди исә һәр ики транзистор үчүн коллектор кечидидир.

Чиһазын ишини волт-ампер характеристикасына (шәкил 6.2*б*) көрә арашдыраг.



Шәкил 6.2. Тиристорун гурулушу (*а*) вә волт-ампер характеристикасы (*б*)

Әкәр идарәедичи електродун ҹәрәјаны сыфра бәрабәр олурса (J=0), бу режимә динистор режими дејилир. Бу һалда анода катода нисбәтән мүсбәт вә ачма кәркинлијиндән ($U_{ач}$) аз олан кичик кәркинлик верилир, нәтиҹәдә K_1 вә K_3 кечидләри дүз истигамәтдә, K_2 исә әкс истигамәтдә гошулмуш олур. Харичи кәркинлијин демәк олар ки, һамысы бағлы K_2 кечидинә дүшүр.

Харичи кәркинлик артдыгча K_1 вә K_3 кечидләриндәки потенсиал сәдләр азалыр вә ҹиһаздан ахан J_a ҹәрәјаны артмаға башлајыр. Гејд етмәк лазымдыр ки, тиристор һазырланаркән p_2 вә n_2 гатларында ашгарларын консентрасијасы p_1 вә n_1 гатларында оландан чох көтүрүлүр вә нәтиҹәдә K_3 кечиди даһа енсиз олур. Она көрә дә бу кечиддә потенсиал сәдди даһа тез азалыр вә n_2 емиттердән p_2 базаја електронларын емиссијасы башланыр. Онларын рекомбинасијаја уграмајан һиссәси әкс гошулмуш K_2 кечидинә чатыр вә онун саһәси илә n_1 базасына өтүрүлүр. n_1 базасында електронларын консентрасијасы артыр вә бунун нәтиҹәсиндә K_1 кечидиндә потенсиал сәдд даһа да азалыр вә дешикләрин p_1 емиттериндән n_1 базасына инжексијасы чоха-лыр. Бу дешикләр диффузија нәтиҹәсиндә n_2 кечидинә чатараг онун саһәси илә p_2 базасына өтүрүлүр. p_2 базасында дешикләрин консентрасијасы артыр, бу K_3 кечидиндә потенсиал сәддини даһа да азалдыр, n_2 емиттериндән p_2 базасына електронларын инжексијасы артыр вә с. Беләликлә, структурда ҹәрәјана көрә мүсбәт әкс әлагәнин олмасына бәнзәр ҹәрәјанын селвари чохалмасы (характеристикада *о-а* һиссәси) баш верир.

$U_a = U_{ач}$ кәркинлијиндә дахили әкс әлагә әсас јүк дашыјыҹыларын емиттер гатларындан база гатларына селвари инжексијасыны јарадыр. n_1 базасында електронларын вә p_2 базасында дешикләрин консентрасијасынын ити сүр'әтлә артмасы әкс гошулмуш K_2 кечидиндәки U_2 кәркинлијинин вә бунун нәтиҹәсиндә тиристордакы үмуми кәркинлијин азалмасына кәтириб чыхарыр, чүнки $U_a = U_1 + U_2 + U_3$. Даһа доғрусу ҹәрәјанын артмасы илә кәркинлик азалыр вә бу о демәкдир ки, дөрдгатлы

структурун волт-ампер характеристикасы мәнфи мүгавимәт саһәсинә маликдир (*а-б* саһәси).

Селвари просес инкишаф етдикҹә тиристор ачылыр (ишә гошулур) вә онун хариҹи дөврәсиндән ахан ҹәрәјан R_j мүгавимәти вә $E_а$ мәнбәјинин кәркинлији илә мүәјјән едилән гијмәтә гәдәр артыр. Характеристиканын ишчи һиссәси *cd* саһәсидир. Бурада анод вә катод арасындакы кәркинлик чох кичикдир, чүнки һәр үч кечид дүз истигамәтдә гошулмушдур.

Тиристору бағламаг үчүн дүз ҹәрәјаны ($J_а$) *с* нөгтәсинә уј- ғун сахлама ($J_{сах}$) ҹәрәјанына гәдәр азалтмаг вә ја кәркинлијин ишарәсини дәјишмәк лазымдыр. Кәркинлијин ишарәси дәјишәндә K_1 вә K_3 кечидләри әкс истигамәтдә сүрүшдүрүлүр, K_2 исә дүз истигамәтдә сүрүшдүрүлмүш галыр. Бу һал үчүн волт-ампер характеристикасы әксинә гошулмуш диодун характеристикасына бәнзәјир (*о-е* саһәси).

Әкәр базаларын биринин (адәтән p_2 базасынын) дөврәсинә хариҹи кәркинлик мәнбәји гошуларса, тиристорун ачылма кәркинлијинин ($U_{ач}$) гијмәтини азалтмаг мүмкүн олар. Бу режимә тринистор режими дејилир. Бу һалда $E_и$ мәнбәјинин һесабына $J_и$ ҹәрәјаны васитәсилә p_2 базасына әлавә јүкдашыјычылары (бу һалда дешикләр) кәтирилир. Бунларын тә'сириндән K_3 кечидиндә потенсиал сәдди азалыр вә јухарыда изаһ едилән шәкилдә селвари просес башлајыр. Идарәетмә дөврәсинин ҹәрәјаныны тәнзим етмәклә селвари просеси идарә едиб тиристору даһа кичик кәркинликләрдә ишә гошмаг (ачмаг) олар.

Тиристорлар ашағыдакы параметрләрлә характеризә едилирләр: $J_{ан}$-номинал дүз ҹәрәјан. $\Delta U_{ан}$ -номинал ҹәрәјанда тиристордакы кәркинлик дүшкүсү. $U_{акс.н}$-номинал бурахыла билән әкс кәркинлик, $U_{ач}$-идарәедиҹи дөврә ачыг олан һалда тиристору бағлы вәзијјәтдән ачыг вәзијјәтә кечирән ән кичик дүз кәркинлик, $J_{бағ}$-идарәедиҹи импулс кәсиләндән вә тиристор ачыландан сонра ону ачыг вәзијјәтдә сахлаја билән минимал дүз ҹәрәјан, $J_{сах}$-идарәедиҹи дөврә ачыг оланда тиристору бағланмаға гојмајан минимал дүз ҹәрәјан.

Динамик параметрләр: $t_{ач}$-идарәедичи импулсун башланғычындан дүз кәркинлијин илкин гијмәтинин 10% -нә гәдәр азалмасына гәдәр кечән вахт, $t_{багл}$-дүз чәрәјанын сыфырдан кечдији анла тиристорун тәзәдән ачылмасыны тә'мин етмәјән тәкрар верилән кәркинлијин башланғычы арасындакы минимал вахт. Бу ики кәмијјәт тиристорун тезлик хүсусијјәтләрини характеризә едир. $t_{ач}$=1-30 мк санијә, $t_{багл}$=5-250 мк санијә һәддиндә олур.

7. ЈАРЫМКЕЧИРИЧИ ФОТОЕЛЕКТРОН ЧИҺАЗЛАРЫ

Ишыг шүасынын енержисини електрик енержисинә вә тәрсинә чевирән електрон чиһазларына фотоелектрон фотоелектрик чиһазлары дејилир.

Иш присипинә көрә јарымкечиричи фотоелектрон чиһазларыны үч група бөлмәк олар: фотоелектрон шүаландырычылары, фотоелектрон шүагәбуледичиләри, оптоелектрон чүтләри.

7.1. Фотоелектрон шүаландырычы чиһазлар

Шүаландырычы чиһазлар електрик енержисини мүәјјән узунлуглу далғаларын оптик шүаланма енержисинә чевирирләр. Енержинин belә чеврилмә механизми јүк дашыјычыларынын јарымкечиричиләрдә шүаландырычы рекомбинасијасы илә әлагәдардыр. Шүаландырычы чиһазларын иши лүминессенсија һадисәсинә истинад едир. Лүминессенсија дејәндә харичи тә'сирдән маддәнин електронларынын һәјәчанланмасы нәтичәсиндә јаранан оптик шүаланма нәзәрдә тутулур. Харичи тә'сир мәнбәји електрик саһәси оланда бу һадисә електролүминессенсија адланыр.

Ишыг сачманын давамијјәтинә көрә лүминессенсија ики нөв олур: 1) флүорессенсија (ишыг сели, електрон сели, рентген шүасы, електрик саһәси вә чәрәјанынын тә'сириндән маддәнин ишыг шүаланмасы); 2) фосфорессенсија (миллисанијәдән бир нечә саата кими давам едән узун мүддәтли ишыгсачма).

Шүаланма просесләри илә әлагәдар олан енержинин там һәјәчанланма енержисинә нисбәтинә лүминессенсијанын ефективлији дејилир. Температур артдыгча еффективлик азалыр.

Лүминессенсија хассәләринә малик олан маддәләрә лүминофор дејилир. Һәјәчанланма мәнбәјиндән асылы олараг фотолүминофорлар, катодлүминофорлары, рентген лүминофорлары, електрик лүминофорлары мөвчуддур. Електроникада әсасән електрик лүминофорлары истифадә едилир. Бунлар електролүминессент чевиричиләрдә вә ишыг диодларында истифадә едилир.

Електролүминессент чевиричи лөвһәләриндән биринин јахынлығында лүминофор јерләшдирилмиш конденсатордан

ибарәтдир. Онун ишыг сачма парлаглығы белә тәјин едилир: $e = \kappa UE^{-в/\sqrt{U}}$. Бурада *U*-гида мәнбәјинин кәркинлији; *к* вә *в*-кәркинлијин тезлијиндән асылы параметрләрдир.

Електролүминессент чевиричинин характеристикалары лүминофорун материалындан вә конструксијадан асылыдыр. Материал ролуну ја диелектрикдә асылы шәкилдә олан фосфорун кичикдисперсли тозу (тозшәкилли фосфорлар), ја да вакуумда бухарланма үсулу илә алынмыш бирчинс поликристал назик гат (фосфор сублиматы) ојнајыр. Биринчи нөв елементләр јалныз 50-300 В дәјишән кәркинликдә ишләјир. Фосфор сублимат гаты чох назик олдуғундан икинчи нөв чиһазлар 2-2,5 В амплитудлу сабит вә дәјишән кәркинликдә ишләјир. Ишыгсачма фосфорун вә ашгарларын нөвүндән асылы олараг спектрин далға узунлуғунун көрүнән һиссәсиндә 0,45 мкм-дән (мави ишыг) 0,6 мкм-ә (сары-нарынчы ишыг) баш верир.

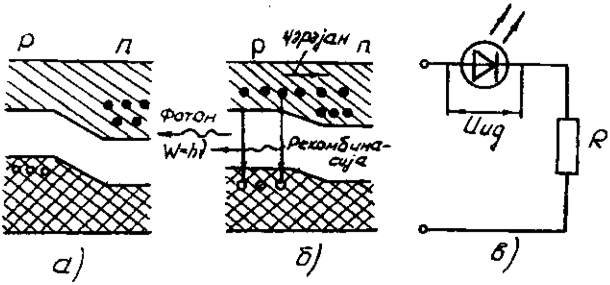
Електролүминессент чевиричиләрин иш мүддәти аз олур, онлар стабил ишләмирләр - бир мүддәтдән сонра ишыгланманын парлаглығы азалыр, онлар һәм дә әталәтли олурлар (јанма вә сөнмә вахты 10^{-3}-10^{-4} санијә һәддиндә олур). Белә чевиричиләр бөјүк күчләндирмә әмсалына малик шүаланма чевиричиләриндә вә күчләндиричиләриндә, кичик өлчүлү екранларда вә таблоларда, мәнтиг елементләриндә вә дикәр алчаг тезликли дөврәләрдә ишләдилир.

Ишыг диоду *p-n* кечидә малик олан вә електрик енержисини спектрин көрүнән һиссәсиндә оптик шүаланмаја чевирән јарымкечиричи шүаландырычы чиһаздыр.

Чиһазын ишинин әсасыны електрон-дешик кечидиндән инжексија едән јүкдашыјычыларын өз-өзүнә шүаландырычы рекомбинасијасы илә әлагәдар олан електролүминессенсија һадисәси тәшкил едир. Шүаланма билаваситә ифрат јүкдашыјычыларын рекомбинасијасындан јараныр, кечиддә вә кечидә јахын јарымкечиричи гатларда баш верир.

Тәсвир едән ишыг диодларына көстәрилән тәләбләрдән ән башлычасы шүаланманын спектрин көрүнән саһәсиндә баш вермәсидир. Бурада әсас ролу зоналарарасы шүаландырычы рекомбинасија ојнадығындан јарымкечиричинин гадаған олунмуш зонасынын ени мүәјјән гијмәтә малик олмалыдыр.

Ишыг диодларыны һазырламаг үчүн галлиум фосфид (көрүнән ишыг) вә галлиум арсениддән (инфрагырмызы) истифадә олунур. Ишыг диоду дүз гошулмуш *p-n* кечиддән ибарәт олур (шәкил 7.1*а*). Дүз истигамәтдә верилмиш кәркинлијин тә'сириндән кечиддә потенсиал сәддинин һүндүрлүјү азалыр вә јүкдашыјычыларын инжексијасы башлајыр: електронлар *n* гатындан *p* гатына, дешикләр исә әкс истигамәтдә инжексија едирләр. Алынан чәрәјанда електрон топлананы даһа бөјүк олур.



Шәкил 7.1. Ишыг диодунун енержи диаграмлары: *а*) харичи кәркинлик олмајанда; *б*) харич и кәркинлик дүз гошуланда; *в*) диодун дөврәјә гошулма схеми

Електронлар *n* гатындан *p* гатына һәрәкәт етдикчә кечиричилик зонасындакы јүксәк енержи зонасындан валент зонасындакы алчаг енержи сәвијјәсинә кечирләр. Кечиддә вә она јахын саһәдә јүкдашыјычыларын өз-өзүнә рекомбинасијасы баш верир. Рекомбинасија нәтичәсиндә енержи кванты-фотон ајрылыр. Гадаған олунмуш зонанын енинин мүәјјән гијмәтиндә бу енержи көрүнән ишыг сели шәклиндә ајрылыр. Башга сөзлә, рекомбинасијада ајрылан енержи илкин јарымкечиричинин гадаған олунмуш зонасынын ениндән асылыдыр.

Далғанын узунлуғу вә шүаланманын рәнки јарымкечиричинин материалындан вә һазырланма технолокијасындан асылыдыр. Керманиумун вә силисиумун гадаған олунмуш зоналарынын ени нисбәтән чох бөјүк олмур вә ајрылан енержи әсасән јарымкечиричинин кристаллик гәфәсәсинә верилиб онун гызмасына сәрф олунур. Ишыг диодунун һазырландығы материаллар үчүн гадаған олунмуш зонанын ени бөјүк олдуғундан рекомбинасија нәтичәсиндә ајрылан енержинин бир һиссәси

јарымкечиричинин дахилиндә удулур, бир һиссәси исә әтраф мүһитә шүаланыр. Она көрә көзә көрүнән (харичи) квант чыхышы дахили квант чыхышындан аз олур.

Шүаланманын парлаглығы вә күчү диодун конструксијасындан да асылыдыр. Диоддан нә гәдәр чох чәрәјан бурахыла биләрсә (артыг гызмаға јол верилмәдән), парлаглыг вә шүаланма күчү бир о гәдәр јүксәк олар. Чәрәјанын артмасындан онларын чохалмасы белә изаһ олунур. Рекомбинасија нәтичәсиндә гејри-әсас јүкдашыјычыларын ифрат консентрасијасынын азалмасынын интенсивлији онларын илкин консентрасијасына мүтәнасибдир. Она көрә дүз чәрәјан артдыгча инжексија просеси даһа актив кедир вә дашыјычыларын илкин консентрасијасы даһа јүксәк олур.

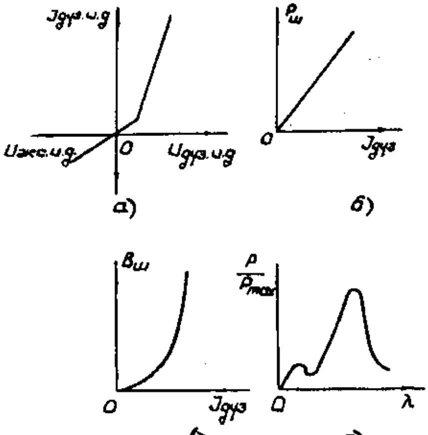
Ән кениш тәтбиг олунан гырмызы, јашыл вә сары ишыг сачан диодлардыр.

Ишыг диодунун дөврәјә гошулма схеми шәкил 7.1*в*-дә көстәрилмишдир. Мүгавимәт диодун дөврәсиндәки чәрәјаны мәһдудлашдырыр. Диодун чәрәјаны вә онда дүшән кәркинлик дүшкүсү белә тә'јин едилир

$$J_{ud} = \frac{U_{K_1 up}}{R_u + R}; \qquad U_{u.д.} = J_{uд} R_{u.д.}$$

($R_{и.д}$-диодун мүгавимәтидир.)

Ишыг диодларынын әсас характеристикалары ашағыдакылардыр (шәкил 7.2 *а-г*): 1) волт-ампер характеристикасы $J_{u.д}=f(U_{u.д})$; 2) шүаланма күчүнүн дүз чәрәјандан асылылығы $P_ш=f(J_{дүз})$; 3) шүаланманын парлаглығынын дүз чәрәјандан асылылығы $B_ш=f(J_{дүз})$; 4) спектрал характеристикасы - нисби күчүн далға узунлуғундан асылылығы $P/P_{мах}=f(\lambda)$.



Шәкил 7.2. Ишыг диодунун характеристикалары

Ишыг диодлары шүаланманын далға узунлуғу $\lambda_{мах}$, спектрин енини јарысы $\Delta\lambda$,

шүаланма күчү $P_ш$, ишә гошулма $t_{гош}$ вә ачылма $t_{ач}$ мүддәтләри вә бунларла әлагәдар һүдуд тезлији $f_{мах}$, истигамәтләнмә диаграмы ($P_ш(\theta)$) вә дикәр параметрләрлә характеризә олунурлар.

Кечидин ени аз олдуғундан диодларын әкс гошулмада дешилмә кәркинлији нисбәтән кичик олур.

Ишыг диодларынын һазырланмасы үчүн ән перспективли һетерокечидли структурлардыр.

Ишыг диодлары микроелектроника гурғуларында мә'луматы тәсвир етмәк үчүн панел индикаторларында, дисплејләрдә, оптоелектрон чүтләриндә (шүаландырычы елемент кими), фотоохујучуларда, ишыг өтүрән хәтләрдә мә'луматы оптик өтүрмә системләриндә, кириш вә чыхыш дөврәләрини галваник ајыран дөврәләрдә вә с. ишләдилир. Идарәолунан (ишыгланан саһәсинин сәрһәди дәјишән) ишыг диодлары радиогәбуледичиләринин сазлама тәсвиредичиләриндә әгрәбли чиһазларын әвәзинә истифадә олунур. Бир нечә ишыгланан саһәси олан ишыг диодлары көзәрән бошалмалы рәгәм индикаторларынын әвәзинә ишләнилир.

Тәк ишыг диодларындан башга, ишыг диоду матрисалары да бурахылыр ки, бунлар да дикәр фотоелектрон гурғулары илә бирликдә оптик ачыб-бағлајычыларда вә јаддаш ханаларында истифадә едилир.

Ишыг диодлары јүксәк е'тибарлыға, бөјүк иш мүддәтинә, кичик ишчи кәркинлијә вә сәрф олунан күчә, аз чәкијә, кичик өлчүләрә малик олдуғундан онлар мүхтәлиф електрон гурғуларында кениш тәтбигат тапмышлар.

Лазерләр монохроматик шүаланма кенераторудур (инкилисчә Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation - ишығын индуксија шүаланмасы илә күчләндирилмәси сөзүндәндир).

Лазерләрин иш принсипи квант системләринин һәјәчанланмыш вәзијјәтләринин истифадәсинә әсасланыр. Харичи енержинин тә'сириндән һәјәчанланмыш електронлар даһа јүксәк енержи сәвијјәләринә кечирләр вә бу заман ја ишыг енержиси фотонлары, ја да истилик енержиси фотонлары шүаландырылыр. Квант системинин енержисинин шүаланмасы өз-өзүнә (спонтан олараг) вә мәчбури (индуксија едиләрәк) баш верә

биләр. Индуксија јолу илә вәзијјәтин дәјишмәси исә јалныз харичи тә'сир нәтичәсиндә мүмкүн олур.

Фәзада пајланмыш квант системләринин өз-өзүнә шүаланмасы гејри-коһерент (тәшкил олунмамыш) олур. Белә шүаланмада енержи кениш тезлик спектриндә пајланыр. Индуксија едилмиш шүаланмада ишыг далғалары ејни тезлијә вә ејни јајылма истигамәтинә малик олурлар. Белә шүаланмаја монохроматик вә ја коһерент (тәшкил олунмуш) шүаланма дејилир. Индуксија едилмиш шүаланманын әсасыны квант системинин һиссәчикләринин јухары енержи сәвијјәләриндән ашағы енержи сәвијјәләринә кечмәси заманы артыг енержи ајрылмасы просеси тәшкил едир. Индуксија едилмиш шүаланма әлдә етмәк үчүн һәчмдә мүәјјән гајдада пајланмыш бөјүк мигдарда һәјәчанланмыш атомлара малик олан мүһит лазымдыр. Һәјәчанланмыш атомлары мүәјјән тезликли ишыг квантлары илә ишыгландырыб елә вәзијјәт јаратмаг олар ки, ишығын шүаланмасы онун удулмасындан гат-гат интенсив олсун. Квант оптик чиһазларын иши бу һадисәјә әсасланыр. Кенерасија едилән рәгсләрин тезлијиндән асылы олараг квант оптик чиһазлары ики група бөлүнүрләр: сантиметрли вә миллиметрли далғалар шүаландыран чиһазлар-мазерләр вә оптик диапазонда ишләјән чиһазлар-лазерләр.

Лазер кенерасијасыны үч үсулла һәјата кечирмәк олар: 1) атомларын електрон өртүкләри арасындакы кечидләр арасында; 2) молекулларын фырланма - рәгсетмә спектриндән истифадә әсасында; 3) јарымкечиричинин кечиричилик зонасы илә валент зонасы арасындакы кечидләр әсасында. Бу үч принсип бүтүн маддәләри әһатә едир вә она көрә лазерләр үчүн истәнилән материалдан истифадә олуна биләр.

Һал-һазырда бәрк көвдәли газ вә јарымкечиричи лазерләр кениш јајылмышдыр.

Јарымкечиричиләрин лазерләрдә актив маддә кими истифадә олунмасы ф.и.ә. артырмаға, шүаланманын модулјасија золағыны кенишләндирмәјә вә лазерләрин өлчүләрини азалтмаға имкан верир. Ишыг өтүрән системли рабитә вә мә'лумат өтүрән гурғуларда, автоматиканын вә идарәетмәнин бир чох системләриндә мәһз бу лазерләрдән истифадә олунур. Јарымкечиричи лазерләр јанлары сә'јлә чилаланмыш куб вә ја паралелепипед шәклиндә һазырланырлар. Јан сәтһләринин үчү шүаны әкс ет-

дирән гатла өртүлүр вә резонатор ролуну ојнајыр. Дөрдүнчү јан сәтһ јарымшәффаф олур вә бу сәтһдә шүаланма баш верир. Лазер диодларында илкин материал кими *n* гатына селен вә ја теллур, *p* гатына исә кадмиум әлавә олунмуш галлиум арсенид истифадә едилир.

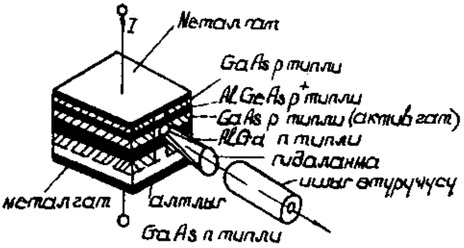
Јарымкечиричи лазерләри фәргләндирән хүсусијјәтләр ашағыдакылардыр:

1) шүаланма просесләри енержи зоналары арасында баш верир;

2) лазер диодларынын өлчүләри кичик, актив һиссәнин галынлығы аз олур вә буна көрә шүаланма селинин ајрылмасы нисбәтән бөјүк олур;

3) сәвијјәләрин долдурулмасы диоддан чәрәјан кечирилмәси илә әлдә едилир, бу чәрәјан сәвијјәләрин лазыми гәдәр долдурулмасыны тә'мин едир. Бу һалда чох јүксәк тезликләрә гәдәр (бир нечә гигаһерс) модулјасија һәјата кечирмәк олур, чүнки шүаланманын өз тезлији чох јүксәкдир.

p-n вә *p-p*$^+$ кечидли галлиум, алиминиум вә арсен бирләшмәси әсасында јаранмыш вә коһерент шүаланманы лифли ишыг өтүрән хәттә верә билән структур шәкил 7.3-дә көстәрилмишдир.



Шәкил 7.3. Лазер диодунун структуру

Бу структурда *p* типли актив галлиум-арсенид зонасы шүаны сындырма хассәсинә актив гатдан пис олан ики алүминиум-галлиум-арсен гаты арасында јерләшир. Буна көрә актив һиссә кенерасија едилән шүаланманын мүәјјән һиссәсинә көрә пилләвари ишыг өтүрүчүсү хүсусијјәтинә малик олур. Дашыјычыларын јүксәк консентрасијаја малик олдуғу актив зонада енсиз канал јаратмаг үчүн лазер диодунун һәчминин бир һиссәсини (бу һиссәләр штрихләнмишләр) протонларла бомбардман едирләр. Шүаланма галлиум-арсенид гатында јаранан шәффаф күзкүдән көтүрүлүр.

Чәрәјанын мүәјјән гијмәтинә гәдәр шүаланма коһерент

олур вə чиhаз ишыг шүаландыран диод кими ишләјир. Чәрәјан сәрhәд гијмәтинә чатанда диод лазер шүаланмасы кенерасија едир: чыхан ишыг фазаја көрә синхронлашдырылмыш вә коhерент олур. Бундан сонра чәрәјан артдыгча чыхыш күчү мүтәнасиб артыр. Һәссаслыг тәхминән 200мкВт/mA hәддиндә олур. Диодун актив саhәсиндә температурун дәјишмәси чыхыш күчүнү вә далға узунлуғуну дәјишдирир. Лазер диодундан чыхан ишыг конус шәкилли олур, онун ен кәсији шүаланма башладығы јердән актив гат бојунча дартылмыш олур вә мәнбәдән аралыгда ен кәсији еллипс шәклиндә 90^0 дәјишир.

Ишыг диодларындан фәргли олараг, лазер диодлары електрон-дешик кечидинә паралел јөнәлмиш полјаризасија мүстәвисиндә hиссәчә полјаризә едилмиш ишыг шүаландырыр.

Јарымкечиричи лазерләр үчүн hәјачанланманын мүхтәлиф нөвләри: *p-n* кечидиндән инжексија, оптик hәјачанланма, електрон сели илә hәјачанланма, селвари дешилмә истифадә олунур. Инжексија типли лазерләр електрик енержисини билаваситә коhерент шүаланмаја чевирир. Онларын ф.и.ә. бөјүк, сәрф етдији күч аз вә иш мүддәти чох олур. Мәнфи чәhәтләри чәрәјанын сәрhәд сыхлығынын гијмәтинин бөјүк олмасы вә чиhазын ишинин температурдан чох асылы олмасыдыр.

Оптик-квант кенераторлары оптик локаторларда, индикасија гурғуларында, телевизијада вә мүхтәлиф hесаблајычы гурғуларда истифадә едилир.

7.2. Фотоелектрон шүагәбуледичи чиhазлар

Шүа енержиси илә идарә едилән чиhазлара оптик шүагәбуледичи чиhазлар дејилир. Онлар ултрабәнөвшәји, көрүнән вә инфрагырмызы шүаланманы електрик вә оптик сигналлара чевирирләр. Оптик шүаланманын маддәләрлә гаршылыглы тә'сиринин характеринә көрә шүагәбуледичиләри ики синфә бөлүнүрләр: истилик шүагәбуледичиләри вә фотон шүагәбуледичиләри.

Истилик шүагәбуледичиләриндә шүаланма селинин фотонлары hәссас елементин маддәсинин кристал гәфәсәсинин рәгс енержисини чохалдыр вә бу исә hәссас елементин температуруну артырыр. Нәтичәдә hәссас елементин термо е.h.г, тер-

момүгавимәти, һәҹми вә полјаризасијасы дәјишир. Шүаланманын маддә илә гаршылыглы тә'сириндән истилик шүагәбуледичисинин дөврәсиндә електрик вә оптик сигналлар јараныр. Белә гәбуледичиләрә пироелектрик гәбуледичиләр, болометрләр, радиасијалы термоелементләр аиддир.

Пироелектрик гәбуледичиләрин иши гыздырылма вә ја шүаландырма нәтиҹәсиндә ҹәрәјан кенерасија едилмәсинә әсасланыр. Онлар термоелектрик ҹәрәјан кенераторларыдыр. Чыхыш сигналы температуру дәјишмә сүр'әтиндән асылы олдуғундан бу ҹиһазлар сабит характерли истилик саһәләринә һәссаслыг көстәрмир вә јүксәк иш сүр'әтинә малик олур. Онлар гыздырылмыш ҹисимләрин гејри-коһерент шүаланмасынын орта күҹүнү өлчмәк үчүн, инфрагырмызы шүаланманын орта саһәсиндә космик тәдгигатлар үчүн, лазер шүаланмасынын орта, пик күҹүнү, енержисини вә башга параметрләрини өлчмәк үчүн истифадә едилир.

Радиасијалы термоелементләр истиликдән вә ја шүаланмадан термо е.һ.г. јарадан ики гејри-һәмҹинс кечириҹинин бирләшмәсиндән ибарәтдир. Онлар истилик кәркинлик кенераторларыдырлар. Бунлара автоматикада температур, инфрагырмызы вә башга шүаланма күҹүнүн вериҹиси кими истифадә олунан термоҹүтләр аиддир.

Болометрләр истилијә һәссас резисторлардыр. Онларын иши ишыг селинин удулмасы нәтиҹәсиндә мүгавимәтин дәјишмәсинә әсасланыр. Онлары електрик дөврәсинә гошмагла удулан шүанын параметрләрини дәјишиб кәркинлији (ҹәрәјаны) модулјасија едирләр.

Фотон шүагәбуледичисиндә ишыг селинин фотонлары билаваситә гәбуледичинин һәссас елементинин електронларына тә'сир едәрәк онлары һәјәҹанландырыр. Ишыг селинин күҹү вәзијјәтләрини дәјишән електронларын сајына көрә мүәјјән едилир.

Јарымкечириҹи фотон гәбуледичиләринин иши дахили фотоеффект һадисәсинә әсасланыр. Дахили фотоеффект нәтиҹәсиндә ковалент әлагәләрдән азад олан електронлар маддәнин ичәрисиндә галыб онун електрик кечириҹилијини артырырлар вә нәтиҹәдә јарымкечириҹидә дахили е.һ.г. јараныр.

Иши дахили фотоеффект һадисәсинә әсасланан јарымкечириҹи елементләрдән фоторезисторлары, фотодиодлары, фото-

транзисторлары, фототутумлары, фотоваристорлары көстәрмәк олар. Бу чиһазларын һамысынын әсас характеристикалары ашағыдакылардыр:

1) ишыг характеристикасы – електродлар арасында кәркинлијин вә шүанын спектрал тәркибинин сабит гијмәтләриндә фоточәрәјанын шүа селинин интенсивлијиндән асылылығы;

2) волт-ампер характеристикасы - шүа селинин сабит гијмәтиндә фоточәрәјанын електродлардакы кәркинликдән асылылығы;

3) спектрал характеристикасы – електродлар арасындакы кәркинлијин вә ишыг селинин сабит гијмәтләриндә нисби һәссаслығын (фаизлә) ишыг шүасынын далға узунлуғундан асылылығы;

4) тезлик характериктикасы – кәркинлијин вә ишыг селинин сабит гијмәтләриндә нисби һәссаслығын (фаизлә) ишыг селинин интенсивлијинин дәјишмә тезлијиндән асылылығы;

5) температур характеристикасы – фотогәбуледичи характеристикаларынын вә параметрләринин температурдан асылылығы;

6) јорулма характеристикасы – фотогәбуледичинин һәссаслығынын иш мүддәтиндән асылы дәјишмәси;

7) кечид характеристикасы – ишыг селинин ваһид сычрајышла дәјишмәсинә фотогәбуледичинин көстәрдији реаксија (чиһазын иш сүр'әтини характеризә едир).

Фотогәбуледичиләри характеризә едән әсас параметрләр ашағыдакылардыр:

1) интеграл һәссаслыг – ишыг селинин ваһид дәјишмәсиндән фоточәрәјанын нечә дәјишмәсини көстәрир;

2) спектрал һәссаслыг - һәр һансы далға узунлуғуна малик ишыг селинин дәјишмәсиндән фоточәрәјанын дәјишмәсини көстәрир;

$$K_\lambda=dJ_ф/d\Phi_\lambda;$$

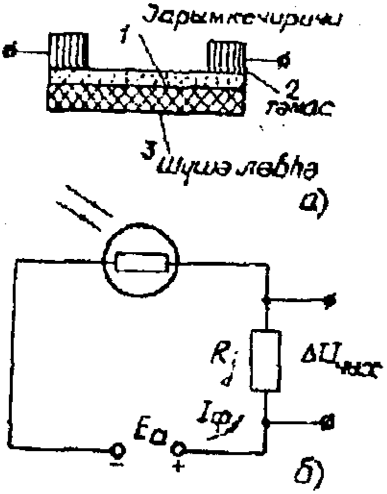
3) дәјишән чәрәјана көрә дахили мүгавимәт: $R_i=dU/dJ_ф$;

4) сабит чәрәјана көрә мүгавимәт: $R_0=U/J_ф$;

5) гаранлыг чәрәјаны $J_г$-там гаранлыг олан һалда чиһаздан ахан чәрәјан;

6) бурахыла билән сәпәләнмә күчү P_{max};

7) гаранлыгда олан фотогəбуледичидə максимал бурахыла билəн кəркинлик U_{max}.



Шəкил 7.4 Фоторезисторун гурулушу *(а)* вə дөврəјə гошулма схеми *(б)*

Фоторезистор шүа енержисинин тə'сириндəн өз мүгавимəтини дəјишəн чиhаза дејилир. О, шүшə лөвhəнин үзəринə чəкилмиш ики чəрəјан кечирəн тəмаса малик олан јарымкечиричи гатдан ибарəтдир (шəкил 7.4*а*). Рүтубəтдəн горумаг үчүн јарымкечиричинин сəтhинə шəффаф лак чəкилир. Лөвhəни ишығын дүшмəси үчүн пəнчəрəси олан пластик маддəдəн вə ја металдан дүзəлдилмиш көвдəјə салырлар. Фоторезисторларда висмутун, кадмиумун, гурғушунун күкүрдлү вə селенли бирлəшмəлəри истифадə олунур.

Фоторезисторун дөврəјə гошулма схеми шəкил 7.4*б*-дə көстəрилмишдир. Ишыгланма олмајанда фоторезисторун мүгавимəти максимал олур ($R_г$) вə она гаранлыг мүгавимəти дејилир (10^6-10^7ом). Бу hалда чиhаздан чох кичик гаранлыг чəрəјаны ахыр:

$$J_г=E_d/(R_г+R_j).$$

Фоторезистору ишгыгландыраркəн онун електрик мүгавимəти ишыгланма мүгавимəтинə $R_{иш}$ гəдəр азалыр вə дөврəдəн ахан чəрəјан артыр: $J_{иш}=E_d/(R_{иш}+R_j)$.

Ишыгланма чəрəјаны илə гаранлыг чəрəјанынын фəргинə биринчи кечиричилик фоточəрəјаны дејилир: $J_ф=J_{иш}-J_г$

Ишыг селини артыраркəн кечиричилик електронларынын бир hиссəси атомларла тоггушуб онлары ионлашдырыр вə əлавə електрон сели јарадыр. Бунун нəтичəсиндə əмəлə кəлəн чəрəјана икинчи кечиричилик чəрəјаны дејилир.

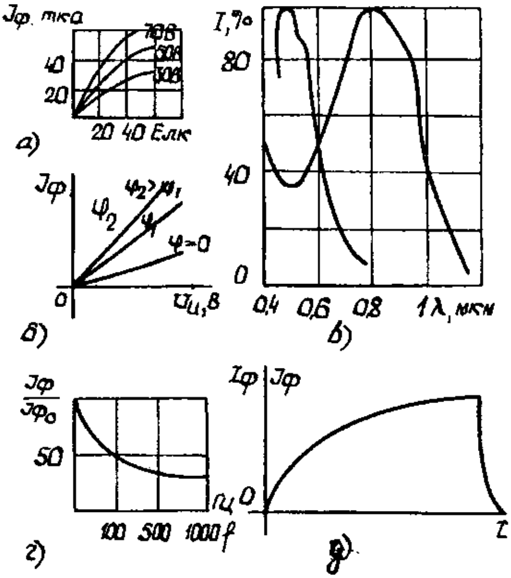
Харичи дөврəдəн ахан чəрəјанын тə'сириндəн јүк мүгавимəтиндə кəркинлик дүшкүсү дəјишир $\Delta U_{чых}=J_фR_j$.

Чиһазын интеграл һәссаслығы $K_ф=(J_{иш}-J_г)/Ф$ кими тә'јин едилир.

Мүгавимәтин ишығланмадан нечә дәфә дәјишдији белә тә'јин едилир: $\Delta R/R_г=(R_г-R_{иш})/R_г$

Фоторезисторун һәссаслығы тәтбиг олунмуш кәркинликдән асылыдыр. Она көрә мүхтәлиф нөв фоторезисторлары гиј – мәтләндирәркән мәнбә кәркинлијинин тә'сирини арадан көтүрмәк үчүн хүсуси һәссаслыгдан истифадә едирләр. Бу интеграл һәссаслығын ваһид кәркинлијә нисбәтидир: $K_и=J_ф/ФU_a$.

Фоторезисторун характеристикалары шәкил 7.5-дә көстәрилмишдир. Ишыг характеристикалары гејри-хәтти олур, волт-ампер характеристикалары сәпәләнмә күчүнүн бурахыла билән гијмәтләриндә хәттидирләр. Она көрә чиһаза верилән максимал кәркинлик мәһдудлашдырылыр, чүнки бөјүк кәркинликдә артыг гызма нәтичәсиндә ишыға һәссас гат дағыла биләр.



Шәкил 7.5. Фоторезисторун ишыг (*а*), волт-ампер (*б*), спектрал (*в*), тезлик (*г*) вә кечид (*д*) характеристикалары

Бә'зи фоторезисторларын спектрал характеристикалары инфрагырмызы саһәдә максимум һәссаслыға маликдирләр. Белә фоторезисторлар әсасән пирометријада зәиф гыздырылмыш чисимләрин температуруну өлчмәк, инфрагырмызы техникада - кечә көрән чиһазларда, истилик пеленгаторларында (објекти тапан) вә с. ишләдилир. Дикәр фоторезисторлар спектрин көрүнән һиссәсиндә максимал һәссаслыға малик олурлар. Бунлар көрүнән ишыға реаксија

верән гурғуларда (сигнализасија гурғулары, фотореле вә с.) ишләдилир.

Фоторезисторлар кичик өлчүләрә, бөјүк һәссаслығa вә демәк олар ки, һүдудсуз иш мүддәтинә маликдирләр.

Онларын мәнфи чәһәтләри гаранлыг чәрәјанынын нисбәтән бөјүк, ишыг характеристикаларынын гејри-хәтти олмасы, чиһазын ишинин температурдан асылылығы, әталәтлији (маддәнин дахилиндә һәрәкәт едәркән јүкдашыјычыларын диффузија сүр'әтинин кичик олмасы) вә с. Әталәтлик онлары тез дәјишән ишыг селләриндә ишләјән гурғуларда истифадә етмәјә имкан вермир.

Температур 10^0 С дәјишәндә фоторезисторун мүгавимәти 1-3% дәјишир. 98% рүтубәтликдә чиһаз сырадан чыхыр. Јүксәк рүтубәт шәраитиндә вә маје мүһитдә һерметик һазырланмыш фоторезисторлар истифадә олунур.

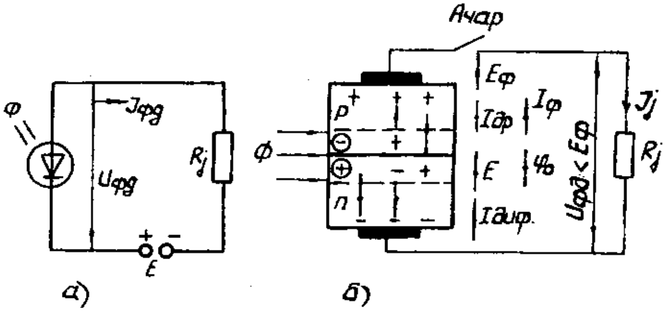
Фотодиод әкс чәрәјанын гијмәти ишыгланмадан асылы олан јарымкечиричи диода дејилир. Фотодиодда кедән физики просесләр ишыг диодларында баш верән просесләрә көрә әкс характер дашыјыр. Бурада кифајәт гәдәр јүксәк енержили фотонларын тә'сириндән маддәнин електронлары валент зонасындан чыхарылыб кечиричилик зонасына апарылыр. Нәтичәдә сәрбәст јүкдашыјычы чүтләри әмәлә кәлир вә онлар фотогәбуледичинин гүтбләринә тәрәф гаршылыглы һәрәкәт едәрәк чәрәјан јарадырлар.

Чиһазын ишинин квант еффективлији (η) бир фотонун тә'сириндән әмәлә кәлән електрон дешик чүтләринин сајы илә характеризә олунур. Фоточәрәјан $J_\phi=q\eta\Phi_0$ ифадәси илә тә'јин олунур. Бурада Φ_0 - ваһид заманда сәтһә дүшән фотонларын сајы, q - електронун јүкүдүр.

Квант еффективлији кристалын сәтһиндән әксолма нәтичәсиндәки иткиләрдән, дашыјычылар чүтүнүн јаранма јериндән, далға узунлуғундан вә фотодиодун материалындан асылыдыр. Квант еффективлији јүксәк олдугча чиһазын һәссаслығы да бөјүјүр. Фотодиодун гурулушу ади мүстәви јарымкечиричинин гурулушуна бәнзәјир. Фәрг ондадыр ки, фотодиодун p-n кечидинин бир тәрәфи ишыг дүшән пәнчәрәјә јөнәлир, дикәр тәрәфи исә ишыгдан горунур. Фотодиодларын ики иш режими

мөвҹуддур: фотодиод (фоточевиричи) режими, вентил (фотокенератор) режими.

Фотодиод режиминдә ҹиһаза әкс истигамәтдә кәнар кәркинлик мәнбәји гошулур (шәкил 7.6). Бу һалда диодун үзәринә ишыг сели көндәрилдикдә онун дөврәсиндән кичик (керманиум үчүн 10-20 мкА, силисиум үчүн 1-2 мкА) гаранлыг ҹәрәјаны ахыр.



Шәкил 7.6. Фотодиодун фоточевиричи (*а*) вә фотокенератор (*б*) режиминдә гошулмасы

Ишыгланма оланда диодда әлавә електрон дешик ҹүтләри јараныр вә гејри-әсас јүкдашыјычыларын кечиддән ахыны чохалыр: електронлар *p* гатындан *n* гатына, дешикләр исә әкс тәрәфә кечирләр. Нәтиҹәдә дөврәдән ахан ҹәрәјан чохалыр. Јүк мүгавимәтинин вә мәнбә кәркинлијинин дүзкүн сечилмиш гијмәтләриндә ҹәрәјан ишыгланмадан асылы олачагдыр. Јүк мүгавимәтиндәки кәркинлик дүшкүсү ҹиһазын чыхыш сигналы олур.

Фотодиод режими јүксәк һәссаслыг, оптик шүаланманы кениш динамик диапазонда чевирмәк имканы вә *p-n* кечидин тутумунун азалмасы һесабына јүксәк иш сүр'әти тә'мин едир.

Фоточевиричи режиминин мәнфи ҹәһәти температурун тә'сириндән експоненсиал дәјишән гаранлыг ҹәрәјанынын бөјүк олмасыдыр. Она көрә автоматиканын өлчмә дөврәләриндә фотокенератор режиминдән истифадә олунур (шәкил 7.5*б*).

Тутаг ки, ачар ачыг вәзијјәтдә, ишыг сели исә сыфыра (Φ=0) бәрабәрдир. Бу һалда *p* вә *n* гатларынын сәрһәдиндә тәмас потенсиал фәрги $\Delta\varphi_0$ јараныр. Кечиддән гаршы-гаршыја

диффузија вә дрејф чәрәјанлары ахараг бир-бирини таразлыға кәтирирләр.

Кечиди ишыгландыранда ($Ф>0$) дахили фотоеффект нәтичәсиндә кечиддә әлавә електрон-дешик чүтләри әмәлә кәлир. Кечидин електрик саһәси бу чүтләри ајырыр: дешикләр *p* гатына, електронлар исә *n* гатына (дрејф һәрәкәти) кечирләр. Нәтичәдә дрејф чәрәјаны әлавә артым алыр вә буна фоточәрәјан $J_ф$ дејилир.

p гатында артыг дешикләр, *n* гатында исә артыг електронлар јығылыр вә харичи електродлар арасында тәмас потенсиал фәрги (фото е.һ.г.) -$E_ф$ әмәлә кәлир. Бу е.һ.г. потенсиал сәддин һүндүрлүјүнү азалдыр вә диффузија чәрәјанына бир гәдәр артым верир. Ачар ачыг олдуғундан структурда чәрәјанларын термодинамики таразлығы јараныр:

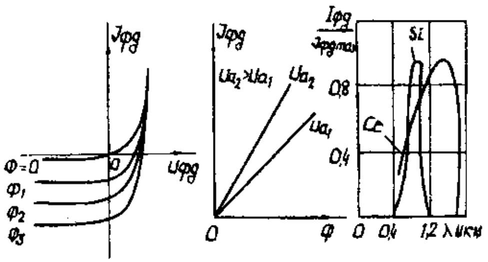
$$J_{\sum}=J_{др}+J_ф-J_{диф}-\Delta J_{диф}=0.$$

Фото е.һ.г.-нин гијмәти јарымкечиричинин хүсусијјәтләриндән (гадаған олунмуш зонанын ениндән, дашыјычыларын өмрүндән вә јүрүклүјүндән), далға узунлуғундан, ишыг селинин интенсивлијиндән вә бир чох дикәр параметрләрдән асылыдыр. Фото е.һ.г.-нин гијмәти илкин јарымкечиричинин гадаған олунмуш зонасынын ениндән чох олмур.

Ачары бағлајыб јүк мүгавимәтини диода гошанда харичи дөврәдән чәрәјан ахыр вә диодун сыхачларындакы кәркинлик һәр-һансы бир $U_{ф.д}<E_ф$ гијмәтинә гәдәр азалыр. Гыса гапанма режиминдә $(R_j=0;\ U_{ф.д}=0)$ $J=J_ф$ олур.

Фотодиодун әсас характеристикалары шәкил 7.7-дә көстәрилмишдир. Волт-ампер характеристикасына көрә диференсиал дахили мүгавимәт тә'јин едилир:

$$R_d=(dU_д/dJ_д)_{Ф=const}$$



а) б) в)

Шәкил 7.7. Фотодиодун волт-ампер (*а*); ишыг (*б*) вә спектрал (*в*) характеристикалары

Ишыг характеристикасына көрә һәссаслыг һәддини тапмаг олар. О, фотодиодун мәхсуси күј-

ләринин фонунда харичи дөврәдә чәрәјанын һисс едилә биләчәк дәјишмәсини тә'мин едән ән кичик ишыг сигналына дејилир.

Чиһазын әсас параметрләри һәссаслыг, гаранлыг чәрәјаны (кәркинлик фотодиод режиминдәки ишчи кәркинлијә бәрабәр вә Φ=0 оланда) чыхыш кәркинлији, чыхыш чәрәјаныдыр. Фотодиодлар кичик күтләјә, өлчүләрә, гида мәнбәјинә, јүксәк сәмәрәлилијә, һәссаслыға вә узун иш мүддәтинә маликдирләр.

Мәнфи чәһәтләри ејни типли нүмунәләрин параметрләринин фәргләнмәси, параметрләринин температурдан чох асылы олмасы, күјләрин сәвијјәсинин јүксәклији (әсасән алчаг тезликләрдә) вә онун гида мәнбәјинин кәркинлијинә мүтәнасиб артмасыдыр.

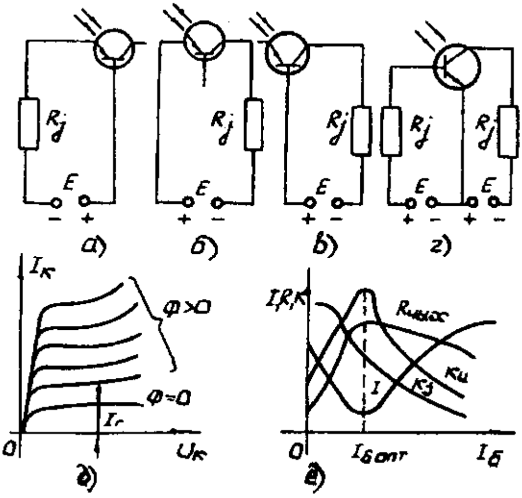
Фотодиодлар күнәш батарејаларында, фотометрија вә фотоколориметрија өлчү гурғуларында, температуру автоматик нәзарәт вә тәнзим едән гурғуларда, тозөлчәнләрдә, рәгәмли һесаблајычы машынларда, нүвә һиссәчикләрини гејд едән вә сајан гурғуларда истифадә олунурлар.

Фототранзистор ишыг селинин көмәји илә чәрәјанла идарә олунан биполјар транзистора дејилир. О ики *p-n* кечидә малик олан јарымкечиричи чиһаздыр. Фототранзистору фотодиодла ади транзисторун бирләшмәси кими тәсәввүр етмәк олар. Она көрә бу чиһазлар ишыг енержисини електрик енержисинә чевирмәклә бәрабәр һәм дә фоточәрәјаны күчләндирә билир. Фототранзисторлар *p-n-p* вә *n-p-n* типли олурлар вә бунларын характеристикалары ејни олур.

Фототранзисторун киришинә һәм оптик, һәм дә електрик сигналы вермәк олар. Әкәр киришә електрик сигналы верилирсә, чиһаз ади транзистор кими ишләјир. Әкәр киришдә електрик сигналы олмурса, чиһаз бөјүк интеграл һәссаслыға малик олан фотодиод кими ишләјир. Гида мәнбәји бу чиһаза ади транзистора гошулан кими гошулур, анчаг фототранзистор сәрбәст (гошулмамыш) базалы, сәрбәст коллекторлу вә сәрбәст емиттерли схемләрлә гошула биләр. Биринчи вә икинчи схемләр фототранзисторун фотодиод режиминдә гошулмасына ујғун кәлир. Фототранзисторун гошулма схемләри шәкил 7.8-дә көстәрилмишдир.

Ишыгланма олмајанда фототранзисторун дөврәсиндән гаранлыг чәрәјаны (коллекторун баштан-баша ахан чәрәјаны)

$J_г=J_{кд}/(1-\alpha)$ ахыр. Фототранзистор сәрбәст базалы схем үзрә гошуларса (шәкил 7.8*б*) ишыг селинин тә'сириндән база гатында сәрбәст јүкдашыјычылар јараныр.



Шәкил 7.8. Фототранзисторун гошулма схемләри (*а*-сәрбәст коллекторлу, *б*-сәрбәст базалы, *в*-сәрбәст емиттерли, *г*-базаја мүсбәт сүрүшмә вермәклә), сәрбәст базалы схемин коллектор характеристикалары (*ғ*) вә фототранзисторун параметрләринин база чәрәјанындан асылылыг графикләри (*д*)

Гејри-әсас јүкдашыјычылар (бу һалда дешикләр) һәр ики кечиддә тә'сир көстәрән електрик саһәсинин тә'сириндән емиттер вә коллектор гатларына совурулурлар. Базада галан әсас јүк дашыјычылары-електронлар орада мәнфи һәчми јүк јарадыр. Бу һәчми јүк емиттер кечидиндә потенсиал сәддинин һүндүрлүјүнү азалдыр вә нәтичәдә базанын потенсиалы емиттерә нисбәтән дәјишир. Бунун нәтичәсиндә исә емиттер гатындан базаја инжексија едилән дешикләрин сајы артыр. Бунларын бир һиссәси базада рекомбинасијаја мә'руз галыр, чох һиссәси исә коллектор кечидинә чатараг коллектор чәрәјаныны артырыр. Бу һалда фототранзистор үмуми емиттерли схем үзрә гошуларса, коллектор чәрәјанынын алдығы артым βJ_δ гәдәр олур.

Беләликлә, база гатыны ишыгландырмаг вә ја електрик сигналы вермәклә база чәрәјанынын артырылмасы коллектор дөврәсинин чәрәјанына истәнилән артымы вермәјә имкан јарадыр. Она көрә фототранзиторларда електрик вә оптик сигналлары чәмләмәк олар. Адәтән електрик кириши хәтти характеристика алмаг вә харичи тә'сирләри (истилик, әнкәлләр) компенсасија етмәк мәгсәди илә сүрүшмә јаратмаг үчүн истифадә олунур.

Фототранзисторлу дөврәләрин һесабланмасында онлары киришинә оптик сигнала еквивалент електрик сигналы верилән ади транзистор кими гәбул етмәк олар. Бу һалда

$$J_{бекв} = J_б + J'_б;\ J'_б = K_Ф Ф/\beta.$$

Фототранзисторун волт-ампер характеристикасы ади фотодиода нисбәтән даһа бөјүк маиллијә малик олур (шәкил 7.8*г*). Гаранлыг чәрәјаны фотодиоддан чох олмасына бахмајараг һәссаслыг фотодиодда олдуғундан чох олур. Ејни өлчүлү кечидләрә малик фотодиода нисбәтән фототранзисторун дахили мүгавимәти аз, кечидинин тутуму исә чох олур. Она көрә фототранзисторун һүдуд тезлији фотодиодун һүдуд тезлијиндән аздыр. Бу сәбәбдән фототранзисторларын лифли оптик системләрдә истифадәси мәһдудлашыр. Фототранзисторларын күјләринин сәвијјәси јүксәк, гаранлыг чәрәјанынын температурдан асылылығы исә гүввәтли олур.

Фототранзисторларын тәтбиг саһәләри фотодиодларла ејнидир. Онлар әсасән ишыг сигналларыны гејд етмәк үчүн истифадә олунмасы мәгсәдәујғундур. Бу һалда сонракы күчләндиричи каскадларла узлашдырмаг үчүн фототранзистор чәрәјанын минимал гијмәтиндә јүксәк чыхыш мүгавимәтинә малик олмалыдыр. Бунун үчүн базаја мүсбәт сүрүшмә вермәк лазым кәлир (шәкил 7.8*г*). Шәкил 7.8*г*-дә чиһазын параметрләринин база чәрәјанындан асылылығы көстәрилмишдир. Көрүндүјү кими мүәјјән бир оптимал база чәрәјанында зәиф сигналлары гејд едән схемләрин әсас параметрләри дә оптимал гијмәтләр алыр. База чәрәјанынын оптимал гијмәтиндә гаранлыг чәрәјаны тәхминән 10 дәфә азалыр, чыхыш мүгавимәти исә 10 дәфә артыр.

Сон вахтлар саһә фототранзисторлары бурахылыр вә бунларда фотодиод ролуну *p-n* идарәедичи електроду ојнајыр. Бу чиһазларын мәхсуси күјләринин сәвијјәси нисбәтән аз олур.

Конструксија чәһәтдән фототранзисторлары шүшә пәнчәрәси олан көвдәләрдә јерләшдирирләр.

Фототиристор ишыг сели васитәси илә ачылан чохгатлы јарымкечиричи структура малик олан чиһаза дејилир. Ади тиристордан бу чиһазын фәрги ондадыр ки, онун көвдәсиндә ишыг вермәк үчүн пәнчәрә олур. Белә чиһазы ачмаг үчүн һәм ишыг селиндән, һәм дә идарәедичи електрода верилән електрик сигналындан истифадә етмәк мүмкүндүр. Фототиристорлар триод типли вә тетрод типли олурлар. Онларын иш принсипи ади тиристора ујғундур, лакин бурада K_1 вә K_3 кечидләринин чәрәјаны өтүрмә әмсалларынын артырылмасы онларын ишыгландырылмасы һесабына баш верир.

Триод типли тиристорун гурулушу вә шәрти ишарәси шәкил 7.8*а*-да көстәрилмишдир. Ишыгланма олмајанда ($Ф=0$) чиһаз ади тиристор кими ишләјир вә онун гаранлыг чәрәјаны белә тә'јин олунур:

$$J = \frac{J_{k_0}}{(1-\alpha_1-\alpha_2)}.$$

Бурада α_1 - n_1 базадан дешик чәрәјанынын, α_2 исә p_2 базадан електрон чәрәјанынын өтүрмә әмсалларыдыр.

Чиһаза ишыг сели тә'сир етдикдә онун ишыгланан гатларында фотонларын удулмасы нәтичәсиндә електрон-дешик чүтләри јараныр. Бу заман гејри-әсас јүкдашыјычылары p_1-n_1-p_2 вә n_2-p_2-n_1 еквивалент транзисторларын емиттер кечидләринә доғру һәрәкәт едәрәк онларда потенсиал сәддләрин һүндүрлүјүнү азалдырлар. Бунунла емиттерләрдән әсас јүкдашыјычыларынын әлавә инжексијасы баш верир вә ишыг селинә мүтәнасиб дәјишән фоточәрәјан јараныр. Фототиристорун чәрәјаны бу һалда белә тә'јин олунур:

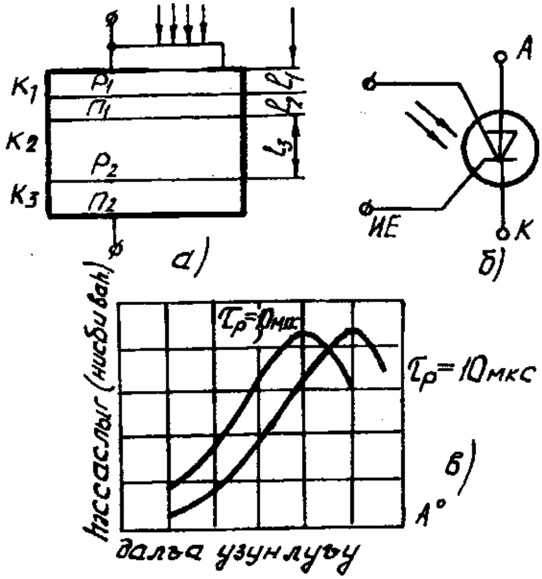
$$J_\alpha = \frac{J_{k_0}+J_Ф}{(1-\alpha_p-\alpha_n)}.$$

α_p вә α_n-еквивалент транзисторларын чәрәјаны өтүрмә әмсалларыдыр.

Ишыг сели артдыгча бу әмсаллар артыр вә ишыг селинин мүәјјән гијмәтиндә онларын чәми ваһидә бәрабәр олур вә фототиристор ачылыр (ишә гошулур). Фототиристору ишә гошмаг үчүн лазым олан ишыг селинин күчү јүкдашыјычыларын рекомбинасија сүр'әти, *p-n* кечидләрин јерләшмә дәринлији вә шүаланманын спектрал тәркиби илә мүәјјән едилир.

Коллектор кечидләринин јерләшмә дәринлији фототристорун спектр һәссаслығына чох тә'сир көстәрир.

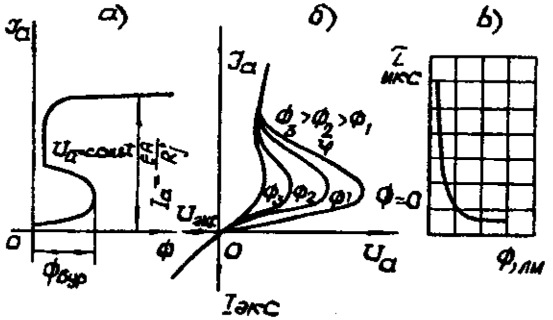
Констуктив вә техноложи үсулларла базада гејри-әсас јүкдашыјычыларын јашама мүддәтини дәјишмәклә спектрал характеристикада максимал вәзијјәт тә'мин етмәк олар (шәкил 7.9*в*).



Шәкил 7.9. Триод типли фототиристорун јарымкечиричи структуру (*а*), шәрти ишарәси (*б*) вә спектрал характеристикасы (*в*)

Сәтһә дүшән ишыг енержиси илә характеризә едилән ишыгланма белә тә'јин едилир: $E=K\int H_\lambda У_\lambda d\lambda$. Бурада H_λ- верилән далға узунлуглу шүа селинин сыхлығы, $У_\lambda$-бу далға узунлуғу үчүн фототиристорун нисби спектрал һәссаслығыны характеризә едән кәмијјәтдир.

Триод типли фототиристорун әсас характеристикалары шәкил 7.10-да көстәрилмишдир. Ишыг характеристикасындан көрүнүр ки, ($J_a=f(\Phi)$, $U_a=const$) фототиристор ачыландан сонра онун ҹәрәјаны $J_a=E_a/R_j$ гәдәр артыр вә ишыг селинин сонракы артымы ҹәрәјаны дәјишмир. Демәли, башга фотоелектрон ҹиһазлардан фәргли олараг фототиристор ики стабил вәзијјәтә малик олур вә ондан јаддаш гурғусу кими истифадә етмәк олар. Волт-ампер характеристикасындан ($J_a=f(U_a)$, Φ=const вә $J_н$=0) көрүнүр ки, ишыг сели артдыгҹа ачылма кәркинлији азалыр. Бу характеристикалардан фототиристорун әсас параметрләрини тә'јин етмәк олар.



Шәкил 7.10. Триод типли фоторезисторун ишыг (*а*), волт-ампер (*б*) характеристикалары вә ишә гошулма вахтынын ишыг селиндән асылылығы (*в*)

Ишә гошма сели $\alpha_p+\alpha_n=1$ шәртини нәзәрә алмагла J_a-нын ифадәсиндән тапылыр:

$$\Phi_{иш}=(1-\alpha_n-\alpha_p)^2/[K_ф\, d(\alpha_n+\alpha_p)/\, dJ_a]$$

Бурада α_n, α_p вә $d(\alpha_n+\alpha_p)/dJ_a$ - $a_n+a_p=1$ шәртини өдәјән ҹәрәјанын гијмәтиндә тапылыр. $K_ф$-орта *p-n* кечидинин интеграл һәссаслығыдыр.

$J_н$=0 олан һалда ачылма кәркинлијинин ишыг селиндән асылылығына фототиристорун идарәетмә характеристикасы дејилир:

$$U_{иш}=U_{иш0}e^{[-B(\Phi-\Phi_h)/\Phi_д]}$$

Бурада $U_{иш0}$ - Φ=0 оланда ачма кәркинлији; Φ_h-ҹиһазы ача билән һүдуд ишыг сели; $\Phi_д$-U_a-нын минимал гијмәтиндә

чиһазы ачан дүзләндиричи ишыг сели (фототиристорун волтампер характеристикасынын дүз голуна ујғун кәлән ишыг сели); B - сабит әмсалдыр.

Ишыг селинин интенсивлији артдыгча фототиристорун гапалы вәзијјәтдән ачыг вәзијјәтә кечмә мүддәти (τ) азалыр (шәкил 7.10*в*). Ишә гошулма мүддәти ади тиристорункинә јахындыр.

Орта *p-n* кечидинин квант һәссаслығы фототиристорун ишыға һәссас сәтһинә көндәрилән бир ишыг квантына дүшән фоточәрәјанла тә'јин олунур:

$$K_{p\gamma} = g(1\text{-}R_{\upsilon})\eta\beta_{\phi} .$$

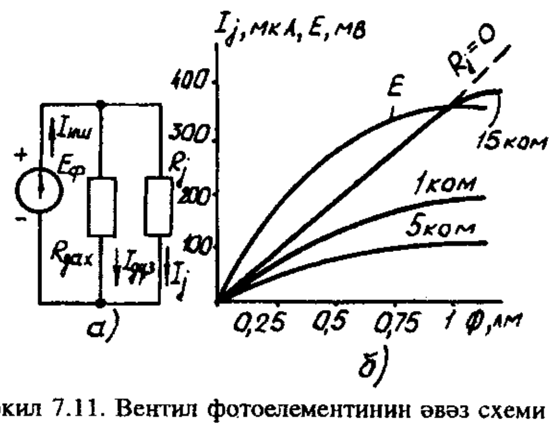
Бурада R_{υ} - ишығын әкс олма әмсалы; η - квант чыхышы; β_{ϕ} – орта кечиддә јүк дашыјычыларынын сәтһи рекомбинасијаја аид иткиләрлә әлагәдар олан јығылма әмсалыдыр.

Фототиристорлар енеркетика електроникасында истифадә олунан дөрдгатлы күчлү ачыб-бағлајычы гурғуларын тәтбиг саһәсини кенишләндирирләр. Фототиристорларын бурада истифадә олунмасы идарәедичи дөврәләри күч дөврәләриндән потенсиалча ајырмаға имкан верир. Фототиристорлар автоматиканын вә һесаблама техникасынын әввәл јалныз транзисторлар истифадә олунан гурғуларынын схемләрини садәләшдирмәјә имкан верирләр. Ишыгла идарә едилән күчлү ачыб-бағлајан гурғу кими онлар мөвчуд јарымкечиричи чиһазларын иш диапазонуну кенишләндирирләр. Мәсәлән, фотодиода вә фототранзистора нисбәтән фототиристорун интеграл һәссаслығы јүксәкдир. Ондан башга, фототиристорлар кичик идарәетмә күчүндә јүксәк јүкләнмә габилијјәтинә, јүксәк иш сүрәтинә, кениш ишчи кәркинликләр диапазонуна маликдирләр, онларда идарәедичи импулслар кәсиләндән сонра чиһазын ачыг вәзијјәти сахланаркән киришдә күч олмур вә с.

Фототиристорлары фотореле, һесаблајычы техникада јаддаш гурғусу, оптоелектрон мәнтиг схемләринин елементи, импулс техникасында импулс кенератору, ишыгла һәјәчанланан тәквибратор, сәвијјә гејд едән гурғуларда мәһдудлашдырычы кими ишләтмәк мүмкүндүр. Ишыг диодлары илә бирликдә фототиристорлар перфолентләрдән вә перфокартлардан мә'луматы охујан мүхтәлиф һесаблајычы-һәлледичи техникада да истифадә едилирдиләр. Енеркетика електроникасында фототирис-

торлар күчлү инверторларын, тезлик чевиричиләринин, кәркинлик чевиричиләринин вә с. идарә схемләриндә истифадә олунур.

Вентил фотоелементләринин иши јарымкечиричинин *p-n* кечиди ишыгланаркән бағлы гатда баш верән фотоеффект һадисәсинә әсасланыр. Бу заман әмәлә кәлән електрон-дешик чүтләри *p-n* кечиди зонасында әкс истигамәтдә диффузија едирләр. Електронлар *n* гатына, дешикләр исә *p*-гатына кечирләр, нәтичәдә *n* гаты әлавә мәнфи, *p*-гаты исә әлавә мүсбәт јүк әлдә едир. Беләликлә, кечидин һәр ики тәрәфиндә мүхтәлиф ишарәли фәза јүкләри јараныр вә бунун нәтичәсиндә харичи дөврәдән чәрәјан ахыр. Бу һалда вентил фотоелементи дөврәдә е.һ.г. јарадыр вә ишыг енержисини електрик енержисинә чевирән фотокенератора дөнүр. Фото е.һ.г.-нин гијмәти ишыгланмаја мүтәнасиб олур. Лакин алынан е.һ.г. кечиди дүз истигамәтдә сүрүшдүрүр ки, бу да вентил фотоелементинин дахили мүгавимәтини азалдыр. Бу һалда елементә јүк гошуларкән фоточәрәјан ики дөврә илә (јүк мүгавимәтиндән вә фотоелементин дахили мүгавимәтиндән) ахыр (шәкил 7.11*а*). Јүк чәрәјаны $J_j = J_{иш} - J_{дүз}$. Бурада $J_{иш}$- ишыг селинин тә'сириндән әмәлә кәлән јүкләр һесабына ахан чәрәјан, $J_{дүз}$-ишыгланма нәтичәсиндә потенсиал сәдди азалан *p-n* кечиддән әсас јүкдашыјычыларын кечмәси илә әлагәдар ахан чәрәјандыр. Јүк мүгавимәти артдыгча јүк чәрәјаны азалыр (шәкил 7.11*б*).



Шәкил 7.11. Вентил фотоелементинин әвәз схеми (*а*) вә јүк характеристикасы (*б*)

Вентил фотоелементләрини селендән, кершаниумдан вә силисиумдан дүзәлдирләр. Селен фотоелементинин спектр характеристикасы инсанын көзүнүн һәссаслыг әјрисинә јахын олдуғундан онлардан ишыгланманы тә'јин етмәк үчүн фотоекспонометрләрдә истифадә едирләр.

Силисиум фотоелементләри күнәш вә нүвә батарејаларында истифадә олунур. Белә батареја 1м^2 сәтһдән 8-10% ф.и.ә. олмагла 100Вт күч олмаға имкан верир вә гејри-мәһдуд ишләмә вахтына малик олур. Күнәш батарејалары ајры-ајры күнәш чевиричиләринин јығымындан ибарәт олур. Онлар јерүстү вә космик гурғуларда радиоелектрон апаратларыны енержи илә тә'мин етмәк үчүн вә һәм дә мүхтәлиф саһәләрдә кичик күчлү енержи гурғуларында истифадә олунур. Фотоелементләрин дикәр тәтбиг саһәси истилик енержисинин термофотоелектрик үсулу илә чеврилмәсидир. Бурада гыздырылмыш чисмин истилик шүаланмасы фотоелементин үзәринә јөнәлдилир вә фотоелемент ону електрик чәрәјанына чевирир.

Вентил фотоелементләринин електродларла јарымкечиричи арасында јаранан хүсуси тутуму бөјүк олдуғундан онларын әталәтлији дә бөјүк олур. Јүк мүгавимәти нә гәдәр бөјүк оларса, бу тутумун шунтлајычы тә'сири бир о гәдәр гүввәтли олур вә јүксәк тезликләрә ујғун тезлик характеристикасында бир о гәдәр чох азалма баш верир.

Фототутум еффектив тутуму ишыг селинин интенсивлијиндән дәјишән јарымкечиричи чиһаза дејилир. Фототутум кими аркентиум сулфиддән (Ag_2S) һазырланмыш, гурғушун сулфид (PbS), кадмиум сулфид (CdS) әсасында алынан структурлар истифадә олунур. Фототутумлар кичик кејфијјәтлилијә малик олдуғундан онлары јалныз алчаг вә орта тезликләрдә ишләдирләр.

7.3. Оптоелектрон чүтләри

Оптоелектрон чүтү (вә ја оптрон) оптик мүһит васитәсилә бир-бири илә конструктив әлагәдә олан, лакин галваник (електрик) чәһәтчә ајры олан шүаландырычыдан вә фотогәбуледичидән ибарәт чиһаза дејилир.

Фотоелектрон чүтүнүн гурулушу шәкил 7.12*а*-да көстәрилмишдир. *ИШ*-ишыг шүаландырычысы, *ФГ*-фотогәбуледичи, *ОМ*-оптик мүһит, *МЕ*-метал електродлар, *ШЕ*-шәффаф електродлардыр. Ишыг шүаландырычысы јеринә ишыг диодлары, лазерләр вә башга шүаландырычылар, фотогәбуледичи кими исә фотодиодлар, фототранзисторлар ишләнилир. Истифадә едилән фотогәбуледичинин нөвүнә көрә бу чиһазлар диодлу, транзисторлу, тиристорлу, вә резисторлу опточүтләрә бөлүнүрләр.

Опточүтүн иш принсипини ипмулс режиминә көрә араршдыраг (шәкил 7.12*б*). Оптоелектрон чүтүнүн киришинә $J_{кир}$ чәрәјан импулсу дахил олур вә ишыг шүаландырычысы ону ишыг сели импулсуна чевирир.

Ишыг импулсу ишчи далға узунлуғунда фотогәбуледичијә тәрәф јөнәлир, аз сөнмә шәртилә оптик мүһити кечир вә фотогәбуледичијә дахил олуб орада електрик сигналына чеврилир. Чыхыш импулс чәрәјанынын формасы нисби ваһидләрдә (шәкил 7.12*в*-дә) көстәрилмишдир. Електрик сигналынын ишыг сигналына чеврилмәси оптик дашыјычы сигналын шүаландырычы модулјасијасы илә һәјата кечирилир. Фотогәбуледичи бу оптик сигналы демодулјасија едиб илкин електрик сигналыны бәрпа едир. Бу заман *ИШ-ОМ-ФГ* каналында сигнала мүәјјән тәһрифләр верилә биләр. Шүаландырычынын гәбуледичи илә әлагәси електрик чәһәтдән нејтрал олан фотонлар васитәсилә, өзү дә јалныз бир истигамәтдә-фотогәбуледичијә тәрәф олур вә фотогәбуледичидә шүаланма енержиси демәк олар ки, тамамилә удулур. Кириш вә чыхыш дөврәләри бирбириндән галваник (електрики) чәһәтдән фотогәбуледичи илә шүаландырычы арасында јерләшән оптик чәһәтдән шәффаф олан диелектрик мүһитлә ајрылмыш олур.

Кириш вә чыхыш сигналларынын әлагәсинин нөвүнә көрә бу чиһазлар дөрд нөв олурлар:

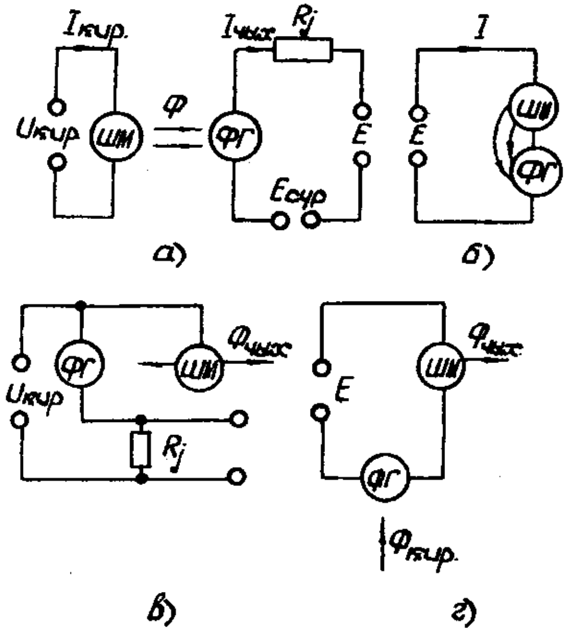
1) дүзүнә дахили оптик әлагәли чиһазлар;

2) дүзүнә електрики вә әксинә мәнфи оптик әлагәли чиһазлар;

3) дүзүнә електрики вә әксинә мүсбәт оптик әлагәли чиһазлар;

4) дүзүнә харичи оптик вә дүзүнә дахили електрики әлагәли чиһазлар.

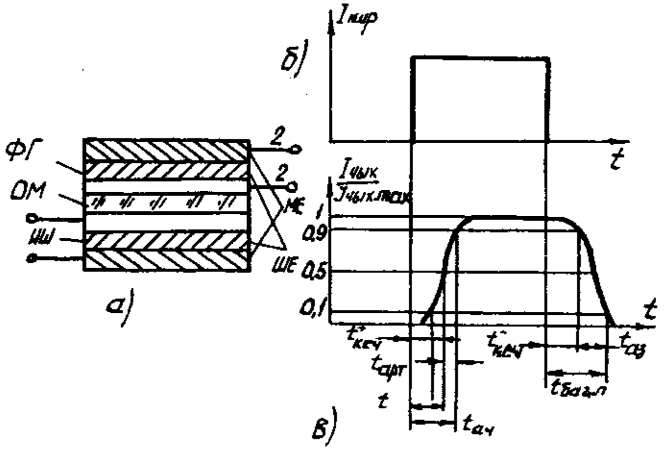
Фотогәбуледичинин һәр һансы бир чыхыш параметринин ишыг шүаландырычысынын чәрәјан вә ја кәркинлијиндән асылылығына оптронун өтүрмә характеристикасы дејилир.



Шәкил 7.12. Оптоелектрон чүтүнүн гурулушу (а), кириш (б) вә чыхыш (в) чәрәјан импулсларынын диаграмлары

Шәкил 7.13-дә бүтүн дөрд нөв оптронларын схемләри көстәрилмишдир.

Дүзүнә дахили оптик әлагәли чиһазлар (шәкил 7.13*а*) кириш вә чыхыш електрик дөврәләринә маликдир вә бу дөврәләрин әлагәси оптик характер дашыјыр. Оптрону тәшкил едән елементләрин нөвүндән асылы олараг чүтүн өтүрмә характеристикасы ($J_{чых}$=f($U_{кир}$, $E_{сүр}$) хәтти асылылыға јахын (мәсәлән, көзәрмә лампасы - фототранзистор) вә ја ачара бәнзәр (әкәр фотогәбуледичи кими S-типли волт-ампер характеристикасы олан чиһаз көтүрүлсә) ола биләр.



Шәкил 7.13. Оптронларынын мүхтәлиф әлагәли схемләри

$U_{кир}$ сигналы *ИШ*-дән ахан $J_{кир}$ чәрәjаныны jарадыр вә бу онун шүаландырычы ишыг селини мүәjjән едир. Фотогәбуледичи ишыг селини $J_{чых}$ чәрәjанына чевирир. Тәнзим едилмәjән *Е* мәнбәjи фотогәбуледичинин електрик режимини мүәjjән едир. Идарә едилән сүрүшмә кәркинлиjинин ($E_{сүр}$) гиjмәтини дәjишмәклә оптронун волт-ампер характеристикасында ишчи нөгтәсинин jерини дәjишмәк вә чиһазы идарә етмәк мүмкүндүр. Бу нөв оптронлар електрик сигналларынын чеврилмәси вә күчләндирилмәсиндә, алчаг кәркинликли вә jүксәк кәркинликли електрик дөврәсинин узлашдырылмасында вә тәмассыз електрик мүгавимәтләри кими истифадә олунур.

Дүзүнә дахили оптик әлагә аналог вә ачар оптронларынын әксәриjjәтиндә резисторлу, диодлу, транзисторлу вә тиристорлу оптронларда истифадә едилир.

Дүзүнә електрики вә әксинә мүсбәт оптик әлагәли схемдә шүаландырычы вә фотогәбуледичидә ардычыл бирләшдирилир вә бир кәркинлик мәнбәjинә гошулур (шәкил 7.13*б*). Илкин һалда фотогәбуледичинин мүгавимәти бөjүк олур вә шүаландырычыдан jалныз гаранлыг чәрәjаны ахыр. Идарәедичи тә'сир олан һалда (фотогәбуледичи әлавә шүаландырыланда, *Е* кәркинлиjи артырыланда вә jа шүаландырычыдан кечән чәрәjан импулс шәклиндә артанда) дөврәдә чәрәjан артыр, шүалан-

дырычынын ишыг сели чохалыр вә фотогәбуледичинин мүгавимәти азалыр. Чәрәјан селвари шәкилдә ачыг оптронун мүгавимәти илә мәһдудлашдырылан гијмәтә гәдәр артыр. Кәнар тә'сир чәрәјаны гаранлыг чәрәјанынын сәвијјәсинә азалдана гәдәр бу вәзијјәт дәјишмир. Белә гошулмада (һәр бир мүсбәт әкс әлагәли гурғуда олдуғу кими) оптронун волт-ампер характеристикасы һистерезис характерли олур.

Јухарыда адлары чәкилмиш оптронларын һамысы бу схемлә гошула биләр вә бу һалда чыхыш вә кириш дөврәләри ардычыл гошулур.

Дүзүнә електрики вә әксинә мәнфи оптик әлагәли схемдә (шәкил 7.13*б*) шүаландырычы вә фотогәбуледичи електрики чәһәтдән паралел гошулур вә бу мәнфи оптик әкс әлагә тә'мин едир. Доғрудан да кәркинлик (һәм дә чәрәјан) артдыгча шүаландырычынын ишыг сели чохалыр, бу фотогәбуледичинин мүгавимәтини азалдыр, бу мүгавимәтин шунтлајычы тә'сири азалыр вә нәтичәдә шүаландырычыдан ахан чәрәјан азалыр.

Белә оптронун өтүрмә характеристикасы гејри-хәтти олур, характеристиканын бир һиссәсиндә шүаландырычынын чәрәјанынын кениш диапазонунда онун чыхышындакы ишыг сели демәк олар ки, сабит галыр. Бу һадисә оптоелектрон гурғуларында ишыг селинин сабитләшдирилмәсиндә истифадә олунур.

Харичи дүзүнә оптик вә дүзүнә дахили електрики әлагәли схемдә (шәкил 7.13*г*) кириш вә чыхыш сигналлары ишыг сели олур, шүаландырычы вә гәбуледичи исә електрики әлагәдә олур. Киришдә ишыг сели дәјишәндә фотогәбуледичинин мүгавимәти, шүаландырычынын чәрәјаны вә онун чыхышында ишыг сели дәјишир. Белә оптронлары кәркинлик чевиричиләри кими истифадә едирләр.

Оптоелектрон чүтләринин параметрләри дөрд група бөлүнүр:

1) кириш параметрләри групу кириш дөврәсинин електрик параметрләринин топлусудур вә онлар шүаландырычынын нөвүндән асылыдырлар;

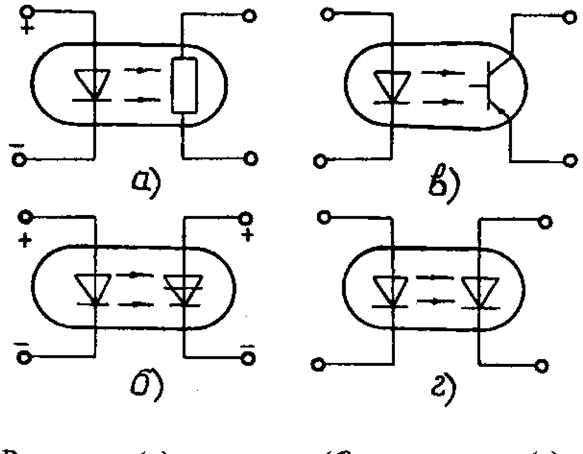
2) чыхыш параметрләри групу чыхыш дөврәсинин параметрләринин јығымыдыр вә фотогәбуледичинин нөвүндән асылыдыр;

3) үчүнчү група өтүрмә әмсалы, кириш сигналынын һүдуд тезлиjи, сигналын максимал өтүрүлмә сүр'әти, чыхыш сигналы импулсунун артма вә азалма мүддәтләри, гошулма мүддәти, ачылма мүддәти дахилдир;

4) дөрдүнчү група галваник аjырма параметрләри, кириш вә чыхыш арасында кәркинлиjин максимал вә пик бурахыла билән гиjмәтләри, кечид тутуму, галваник аjырма мүгавимәти вә башгалары дахилдир.

Опточүтләрин шәрти ишарәләри шәкил 7.14-дә көстәрилмишдир. Ән универсал чиһазлар резисторлу оптронлардыр. Онлар һәм аналог, һәм дә ачар режиминдә ишләjә билирләр, мүгавимәтин кениш дәjишмә диапазонунуа (гаранлыгда 100 МОм-дан ишыгланмада 100 Ом-а гәдәр) маликдирләр. Онларын тезлик диапазону килоһерсләрлә мәһдудлашыр.

Диод оптронлары ачар кими истифадә олунур вә 10^6 вә 10^7Һс тезликлә дөврәләри ачыб бағлаjа билир. Онларын гаранлыг мүгавимәти 10^8-10^{10}Ом, ишыгланма һалындакы мүгавимәтләри исә 100Ом-а гәдәр олур. Кириш вә чыхыш дөврәләри арасындакы мүгавимәт 10^{13}-10^{15}Ом һәддиндә олур.



Шәкил 7.14. Резисторлу (*а*), тиристорлу (*б*), транзисторлу (*в*) вә диодлу (*г*) опточүтләр

Транзисторлу оптронлар диодлу чиһазлара нисбәтән даһа бөjүк һәссаслыға маликдир. Ики емиттерли транзисторлардан

истифадә етдикдә (волт-ампер характеристикасы координат башланғычына көрә симметрик олур) онлардан дәјишән чәрәјан дөврәсиндә истифадә етмәк мүмкүн олур. Онларын иш сүр'әти бир гәдәр кичикдир вә 10^5 Һс-дән јүксәк олмур.

Тиристорлу оптронлар ән чох 10-ларла ампер һәддиндә бөјүк чәрәјанлы вә 1000 волта гәдәр бөјүк кәркинликли дөврәләри ачыб бағламаг үчүн истифадә едилир. Онларын ишчи тезликләри бир нечә килоһерс һәддиндә олур.

8. МИКРОЕЛЕКТРОНИКА

Микроелектроника бәрк чисим физикасынын, техноложијанын, микросхем техникасынын вә системотехниканын наилијјәтләринә әсасланан, сүр'әтлә инкишаф едән елм вә техника саһәсидир.

Мүасир һесаблама техникасынын, робот техникасынын, идарәетмә вә информатика системләринин елемент базасыны мәһз микроелектроника тәшкил едир. Микроелектроника физики, кимјәви, техноложи, схемотехники вә кибернетик тәдгигатларла јанашы, јүксәк е'тибарлылыға, кичик өлчүләрә вә јүксәк сәмәрәлилијә малик гурғуларын конструксијасынын ишләнмәсини вә истеһсалыны өзүндә чәм едир.

Микроелектрониканын инкишафында әлдә едилән ән бөјүк наилијјәтләр интеграл микросхемләрин ишләниб һазырланмасы вә сәнаје мигјасында истеһсал едилмәсидир. Интеграл микросхемләр конструктив чәһәтдән ваһид бир говшаг вә блок шәклиндә ишләнмиш функсионал (мүәјјән бир функсијаны јеринә јетирән) гурғулардыр. Интеграл микросхемләр микроелектрониканын әсас мә'мулатлары кими мүхтәлиф електрон апаратларынын гурулмасында кениш истифадә едилир вә тәдричән дискрет чиһазларда (транзисторларда, диодларда вә с.) јығылмыш блок вә говшаглары истифадәдән сыхышдырыб чыхарыр.

Сон илләр микроелектроникада бөјүк вә ифрат бөјүк интеграл микросхемләр әсасында гурулмуш микропросессорлу системләр вә микроЕҺМ-ләр дә кениш тәтбиг едилир.

Мәһз бу бахымдан бу вә ја дикәр һәчмдә електрониканын әсасларыны өјрәнән тәләбәләр үчүн микроелектрониканын әсас наилијјәтләри һаггында биликләрин әлдә едилмәси вачибдир.

Бу бөлмәдә чох јығчам бир шәкилдә микроелектрониканын әсас инкишаф истигамәти - интеграл микросхемләрин ишләниб һазырланмасы һаггында мә'лумат верилир.

Микроелектрониканын әсаслары һаггында биликләрин әлдә олунмасы електрон апаратларын јарадылмасы заманы елемент базасынын сечилиб истифадә едилмәсинә көмәк көстәрә биләр.

8.1. Микроелектроника елементләри

Микроелектроника електрониканын јени типли чиһазларын – интеграл микросхемләрин тәдгиги, ишләниб һазырланмасы вә тәтбигини әһатә едән бир бөлмәсидир.

Микроелектроника електрон гурғуларынын е'тибарлығынын артырылмасы, күтләсинин, өлчүләринин вә маја дәјәринин азалдылмасы проблемләрини һәлл едир.

Микроелектрониканын әсасыны електрон компонентләрин интеграл принсиплә һазырланмасы вә тәтбиг едилмәси тәшкил едир. Бурада һәр бир компонент ајрыча көтүрүлмүш транзистор, диод, резистор, вә с. дејил, онларын бир-бириндән ајрылмаз бирләшмәсидир. Белә бирләшмә електрон апаратынын һәр һансы говшағы, блоку вә ја гурғусу ола биләр. Она көрә дә микроелектрониканын компонентләринә интеграл микросхем вә ја садәчә олараг микросхем дејилир.

Интеграл микросхем мүәјјән мә'лумат чеврилмәси функсијасыны јеринә јетирән ваһид дашыјычы конструксија-алтлыг үзәриндә ваһид техноложи дөврдә (ејни вахтда) һазырланан бир нечә гаршылыглы бирләшмиш компонентләр (диодлар, транзисторлар, резисторлар, конденсаторлар) топлусуна дејилир.

Әкәр интеграл микросхемин тәркибинә јалныз ејни типли компонентләр (јалныз диодлар, јалныз транзисторлар вә с.) дахил оларса, ону һәмин компонентләрин јығымы адландырырлар.

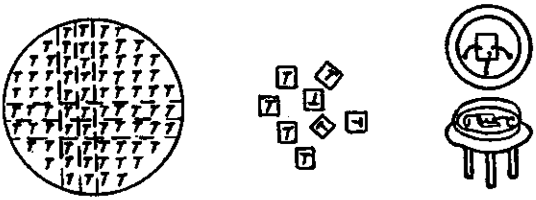
"Интеграл схем" термини ајры-ајры компонентләрин бирләшмәсини (интеграсијасыны) вә һәм дә ајры-ајры компонентләрә нисбәтән гурғунун јеринә јетирдији функсијаларын мүрәккәбләшмәсини әкс етдирир.

Интеграл схемин тәркибинә дахил олан вә буна көрә дә ондан мүстәгил мә'мулат кими ајрыла билмәјән компонентләринә интеграл елементләр вә ја интеграл схемин елементләри дејилир. Онлары ади транзисторлардан, резисторлардан вә с. Фәргләндирән чәһәт одур ки, ади елементләр ајры-ајры конструктив ваһидләр кими һазырланыр вә бундан сонра галајламаг јолу илә схемә бирләшдирилир. Бу елементләрә дискрет компонентләр, онларын әсасында гурулан електрон схемләринә исә дискрет схемләр дејилир.

Електрониканын инкишафы просесиндә електрон апаратынын јеринә јетирдији функсијаларын арамсыз мүрәккәбләшмәси, схемләрин е'тибарлығынын артырылмасы, күтләсинин, өлчүләринин, күчүнүн вә маја дәјәринин азалдылмасы зәрурәти јени елемент базасы јаратмаг мәсәләсини гаршыја чыхармыш вә интеграл схемләрин јаранмасына тәкан вермишдир.

Интеграл схемләрин һазырланмасынын әсасыны 50-чи илләрин ахырында дискрет транзисторларын һазырланмасында истифадә едилән груп үсулу вә планар технолокија тәшкил едир.

Компонентләрин бир алтлыг үзәриндә техноложи интеграсијасы идејасы мәһз транзисторларын груп үсулу илә һазырланмасындан ирәли кәлмишдир. Груп үсулунда 25–40 мм диаметрли силисиум вә ја керманиум лөвһәсинин үзәриндә бәрабәр пајланмыш чохлу транзистор ејни вахтда һазырланыр (шәкил 8.1*а*). Сонра лөвһә үфүги вә шагули сурәтдә јүзләрлә ајры-ајры, һәрәси бир транзистордан ибарәт кристаллара бөлүнүр (шәкил 8.1*б*). Даһа сонра кристаллар харичи чыхышлары олан көвдәјә јерләшдирилир вә истифадә үчүн сифаришчијә көндәрилир (шәкил 8.1*в*).



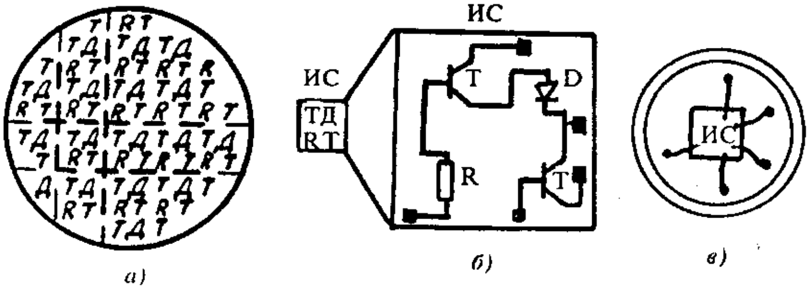
а) *б)* *в)*

Шәкил 8.1. Транзисторларын груп үсулу илә һазырланмасы: *а*) дахилиндә транзисторлар олан силисиум лөвһәси; *б)* ајры-ајры транзисторлу кристаллар; *в)* һазыр транзистор (көвдәјә јерләшдирилмиш кристал)

Сифаришчи ајры-ајры компонентләри бири-бири илә галајламагла бирләшдирир вә функсионал говшаг (күчләндиричи, јаддаш гурғусунун ханасыны вә с.) әлдә едир.

Интеграсија идејасы ондан ибарәтдир ки, илкин ајры-ајры транзисторлар әвәзинә ејни заманда бир чох "комплектләр" һазырланыр.

Бу "комплектләрин" һәр бири функсионал говшағы гурмаг үчүн тәләб олунан компонентләрдән - диодлардан, транзисторлардан, резисторлардан вә с. ибарәт олур (шәкил 8.2*а*). Бу компонентләр бир-бирилә мәфтилләрлә вә галајла јох, лөвһәнин сәтһинә "үфүрүлмүш " назик гыса метал золагларла бирләшдирилир. Беләликлә, һәр "комплект" һазыр интеграл схемдән ибарәт олур (шәкил 8.2*б*). Лөвһәнин сәтһиндә бәрабәр пајланмыш интеграл схемләр ајры-ајры кристаллара бөлүнүр вә көвдәләрә јерләшдирилир (шәкил 8.2*в*). Бу һалда конструктив чәһәтдән ваһид електрон чиһазы шәклиндә һазыр функсионал говшаг алынмыш олур.



Шәкил 8.2. Интеграл схемләрин групу үсулу илә һазырланмасы: *а)* ики транзистор, диод вә резистордан ибарәт силисиум лөвһәси; *б)* комплектин тәркибиндә елементләрин бирләшмәси; *в)* көвдәнин ичәрисиндә јерләшмиш һазыр интеграл схем

Елементләри бир–бири илә назик метал золагларла бирләшдирмәк үчүн електродларын һамысынын чыхышы бир мүстәвидә – лөвһәнин сәтһиндә јерләшмәлидир. Белә имканы хүсуси планар технолокија јарадыр. Тәбиидир ки, груп үсулу илә бирликдә микроелектроника планар технолокијаны да интеграл схемләрин һазырланмасында истифадә етмишдир.

Көрүндүјү кими, интеграл схемләр әсасында електрон апаратлары ишләниб һазырланаркән чиһазын е'тибарлығыны азалдан хејли галајланан бирләшмә арадан чыхыр, һәр елементин көвдәси вә чыхышы олмадығындан чиһазын күтләси, өлчүләри вә чохлу јығма вә монтаж әмәлијјатларына лүзум галмадығындан гурғунун дәјәри азалыр. Мүасир груп технолокијасы әса-

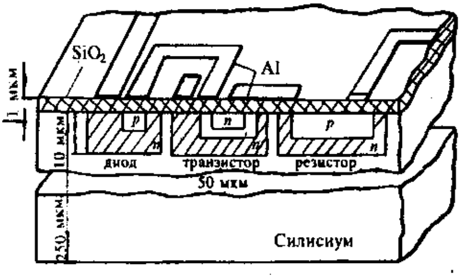
сында һәрәсинин 200 минә гәдәр елементи олан бир нечә мин интеграл схеми, јә'ни бир нечә милјон елементи ејни вахтда һазырламаг мүмкүндүр. Өзү дә бу елементләрин һамысы ади транзисторун һазырланмасында олдуғу кими садә *p-n* кечидләрин формалашдырылмасы јолу илә һазырланыр. Бунун нәтиҹәсиндә интеграл схемләрин параметрләринин охшарлыг дәрәҹәси артыр, дискрет елементләрдә јығылмыш схемләрә нисбәтән е'тибарлыг хејли јүксәлир, елемент базасынын мүрәккәбләшмәси һесабына конструксијанын мүрәккәблији, хариҹи бирләшмәләрин сајы вә електрон апаратын һәҹми кәскин азалыр.

Микроелектрониканын сонракы инкишафы "шагули интеграсија" јолу илә кедир. Бу исә бир кристалында 10^7-јә гәдәр елемент олан бөјүк интеграл схемләрин һазырланмасыны нәзәрдә тутур.

8.2. Интеграл микросхемләрин тәснифаты

Һазырланма технолокијасына көрә интеграл микросхемләр 3 јерә – јарымкечириҹи, тәбәгәли интеграл микросхемләрә вә микројығымлара бөлүнүр. Тәбәгәли интеграл микросхемләр назик тәбәгәли (1-2 мкм) вә галын тәбәгәли (10-20 мкм) олурлар вә бунларын тәркибиндә һәм елементләр, һәм дә компонентләр олдуғундан онлара һибрид интеграл микросхемләр дејилир.

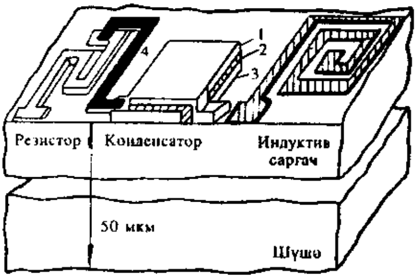
Јарымкечириҹи интеграл микросхемләрдә бүтүн актив (транзистор, диод вә с.) вә пассив (резистор, конденсатор) елементләр вә онларын бирләшмәләри ваһид илкин јарымкечириҹи кристалда бир-бириндән ајрылмасы мүмкүн олмадан әлагәләндирилмиш *p-n* кечидләрин мәҹмусу кими һазырланыр. Бурада һәҹминдә вә сәтһиндә планар технолокија илә микросхемләрин елементләри вә тәмас саһәләри јерләшдирилмиш јарымкечириҹи кристал актив рол ојнајыр (шәкил 8.3).



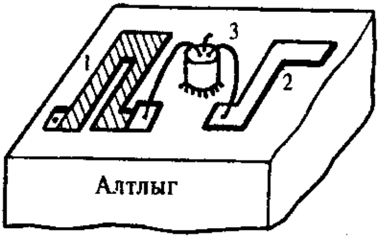
Шәкил 8.3. Јарымкечириҹи интеграл схемдә елементләрин структуру

Һибрид микросхемләрдә бүтүн пассив елементләр диелектрик әсасын (алтлығын) сәтһиндә биргатлы вә ја чохгатлы структурлар шәклиндә һазырланыр вә бир-бирилә назик тәбәгә шәкилли нагилләрлә бирләшдирилир (шәкил 8.4), јарымкечиричи чиһазлар вә башга компонентләр (миниатүр чини конденсаторлар, индуктивликләр) исә алтлығын үзәриндә дискрет деталлар кими јерләшдирилир (шәкил 8.5). Кристалын сәтһинә тоз һалында сәпәләнән тәбәгәләр һеч чүр транзистор типли актив елемент јаратмаға имкан вермәдијиндән белә интеграл микросхемләрдә интеграл технолокија илә јалныз пассив елементләр алыныр. Бу технолокија һәм дә тәбәгәли технолокија адланыр. Сырф тәбәгәли интеграл схемләрин јеринә јетирдији функсијалар мәһдуд олдуғундан онларын имканлары дискрет компонентләрин әлавә алтлыг үзәриндә јерләшдирилмәси илә артырылыр. Дискрет компонентләрин тәбәгәли елементләрлә бирләшмәсиндән гарышыг тәбәгәли дискрет (һибрид) интеграл микросхем әмәлә кәлир.

Практикада һәм јарымкечиричи, һәм дә һибрид интеграл микросхемләр кениш истифадә едилир. Һәр ики технолокија өзүнә мәхсус үстүн чәһәтләрә малик олдуғундан онлар бир-бирини тамамлајырлар: микросхемләр һибрид интеграл микросхемләрдә компонент кими истифадә олунур (микројығымлар үчүн характерикдир).



Шәкил 8.4. Тәбәгәли интеграл схемин елементләринин структуру: 1-үст лөвһә; 2-алт лөвһә; 3-диелектрик; 4-бирләшдиричи метал золаг



Шәкил 8.5. Һибрид интеграл схемин структуру: 1-резистор; 2-металлашдырылмыш золағы; 3-көвдәсиз «асылмыш» транзистор

Гарышыг интеграл микросхемин бир нөвү дә ујғунлашдырылмыш интеграл микросхемләрдир. Бунларда актив елементләр јарымкечиричи интеграл микросхемләрдә олдуғу кими јарымкечиричи кристалын сәтһ гатында, пассив елементләр исә тәбәгәли интеграл схемләрдәки кими һәмин кристалын әввәлчәдән изолә олунмуш сәтһиндә тәбәгә һалында һазырланыр. Ујғунлашдырылмыш микросхемләрин истифадәсиндә мүгавимәтләрин вә тутумларын јүксәк номиналлары вә стабиллији тәләб олунур, буну исә јарымкечиричиләрә нисбәтән тәбәгәли елементләрин васитәсилә асан һәјата кечирмәк олар.

Интеграл микросхемләрин һамысында елементләрарасы бирләшмәләр алтлығын сәтһинә чәкилән (вә ја тоз һалында сәпәләнән) вә лазыми јерләрдә елементләрлә тәмасда олан назик метал золагларын көмәји илә әлдә едилир. Бу биринчи золагларын чәкилмәсинә (сәпәләнмәсинә) металлашдырма, ара бирләшмәләринин рәсминә исә металлашдырылмыш ајрылма дејилир.

Јарымкечиричи вә һибрид микросхемләрдән фәргли олараг, микројығымлар даһа мүрәккәб функсијалары јеринә јетирирләр вә бунун үчүн тәләб олунан елементләр, компонентләр вә интеграл микросхемләр топлусундан тәшкил олунурлар.

Јеринә јетирдији функсијаларын характеринә көрә интеграл микросхемләр аналог вә рәгәмли интеграл микросхемләрә бөлүнүр.

Аналог интеграл микросхемләр арамсыз функсија гануну илә дәјишән електрик сигналларынын чеврилмәси вә е'малы функсијаларыны јеринә јетирир. Белә интеграл микросхемләр күчләндиричи, һармоник сигнал кенератору, сүзкәч, детектор кими истифадә олунур. Аналог интеграл схеминин фәрди һалы кими хәтти характеристикаја малик олан хәтти микросхеми көстәрмәк олар.

Рәгәмли интеграл микросхемләр дискрет функсија гануну илә дәјишән (мәсәлән, икилик код) електрик сигналларыны чевирир вә е'мал едирләр. Бунлара һәм дә мәнтиг интеграл микросхемләри дејилир.

Бир гајда олараг аналог вә рәгәм микросхемләри серијаларла һазырланыр. Серија – радиоелектроника апаратларында биркә ишләнилмәк үчүн јарадылан, мүхтәлиф функсијалары је-

ринә јетирән, лакин ејни конструктив-техноложи ишләнмәјә малик олан интеграл микросхемләрин топлусуна дејилир.

Интеграл техникасынын инкишафы интеграллашма сәвијјәсинә көрә гијмәтләндирилир. Интеграллашма сәвијјәси интеграл микросхемә дахил олан елемент вә компонентләрин үмуми сајына (N) дејилир. Интеграллашма сәвијјәсинин ән јахын бөјүк рәгәмә гәдәр јуварлаглашдырылмыш онлуг логарифминә ($K = lg\ N$) интеграллашма дәрәчәси дејилир ки, бу да интеграл микросхемин мүрәккәблик дәрәчәсини характеризә едир. Буна ујғун олараг 10-а гәдәр елементә вә компонентә малик интеграл микросхем 1-чи, 10-дан 100-ә гәдәр 2-чи вә с. дәрәчәли интеграллашмыш интеграл микросхем олур. Тәркибиндә он минләрлә елемент олан јүксәк дәрәчәдә интеграллашмыш бөјүк интеграл схемләр хүсуси груп тәшкил едир.

Мәнтиг әмәлијјатларыны јеринә јетирмәк үчүн истифадә олунан компонентләрин нөвүнә көрә транзистор мәнтигли вә билаваситә әлагәли, транзистор мәнтигли вә резистив-тутум әлагәли, диод-транзистор мәнтигли, транзистор-транзистор мәнтигли, транзистор мәнтигли вә емиттер әлагәли интеграл схемләри мөвчуддур.

Иш сүр'әтинә көрә интеграл схемләр ифрат јүксәк иш сүр'әтли (5-10нс), орта иш сүр'әтли (10-50 нс) вә јаваш тә'сирлиләрә (50 нс-дән чох) бөлүнүр.

Рәгәмли интеграл схемләри характеризә едән параметрләр ашағыдакылардыр:

- киришинә көрә бирләшмә әмсалы – интеграл схемин елементләринин киришләринин сајыны көстәрир;
- чыхыша көрә ајрылма әмсалы – һәр һансы елементин чыхышына гошула билән мәнтиг елементләринин киришләринин сајыны көстәрир;
- сигналын јајылмасынын кечикмәси;
- әнкәлләрә дајаныглыг – интеграл схемин харичи әнкәл сигналларынын тә'сириндән елементләринин вәзијјәтләрини сахламаг хүсусијјәтини характеризә едир;
- гида мәнбәјинин кәркинлији;
- интеграл схемин елементләринин сәпәләнмә күчү;
- мәнтиги ваһидә вә мәнтиг сыфра ујғун чыхыш кәркинлији,

- схемин бир вәзиjjәтдән дикәринә гошулма мүддәти;
- ишчи температурлар диапазону;
- чыхыш сигналынын өн чәбһәсинин артма вә азалма мүддәти.

Мәнтиг интеграл схемләринин параметрләри онларын статик вә кечид характеристикалары илә тә'jин едилир.

Хәтти интеграл схемләр бир чох параметрләрлә характеризә олунур, чүнки мүхтәлиф типли күчләндиричиләр, мултивибраторлар, сүзкәчләр мүхтәлиф параметрләрлә гиjмәтләндирилирләр.

8.3. Jарымкечиричи интеграл схемләриндә елементләрин һазырланмасы

Jарымкечиричи интегралмикросхемләр ики синфә: биполjар вә МДJ (метал-диелектрик-jарымкечиричи) интеграл микросхемләрә бөлүнүр. Һәр ики синфә мәхсус интеграл схемләрин технолокиjасы силисиум лөвһәсинә нөвбә илә донор вә акселтор ашгарлары әлавә етмәклә кристалын сәтһи алтында алтында мүхтәлиф кечиричилиjә малик назик гатлар вә гатларын сәрһәдләриндә *p-n* кечидләр jарадылмасына әсасланыр. Аjры-аjры гатлар резистор структурлары, *p-n* кечидләр исә диод вә транзистор структурлары кими истифадә олунур.

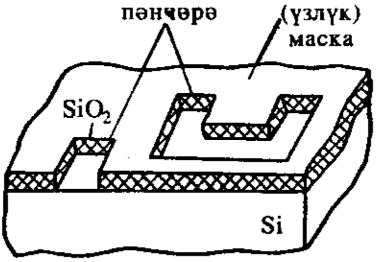
Лөвһәjә донор вә акселтор ашгарларынын әлавә едилмәси бир-бириндән кифаjәт гәдәр аралы (10-100 мкм) jерләшән аjрыаjры локал саһәләрдә баш верир. Бунун үчүн дешикләри олан хүсуси маскалардан – үзлүкләрдән (фотошаблонлардан) истифадә едирләр. Үзлүjүн дешикләриндән лазыми саһәләрдә ашгар атомлары jарымкечиричи лөвһәнин дахилинә кечир. Адәтән, үзлүк ролуну силисиум лөвһәсинин үстүнү өртән оксид (SiO_2) тәбәгәси оjнаjыр. Бу тәбәгәдә хүсуси үсулларла тәләб олунан дешикләр топлусу вә jа башга сөзлә тәләб олунан рәсм һәкк едилир (шәкил 8.6). Үзлүкдәки (оксид тәбәгәсиндәки) дешикләрә пәнчәрә деjилир.

Биполjар интеграл схемләрин әсас елементи *n-p-n* типли транзистордур. Бүтүн технолоҗи дөвр транзисторун һазырланмасына jөнәлмишдир. Бүтүн башга елементләр мүмкүн олдугча әлавә технолоҗи әмәлиjjатлар олмадан транзисторла еjни заман-

да һазырланмалыдыр. Мәсәлән, резисторлар *n-p-n* транзисторун база гаты илә ејни заманда һазырланыр вә база гаты гәдәр дәринликдә (кристалда) јерләшир. Конденсатор кими әкс гошулмуш *p-n* кечидләрдән истифадә олунур.

Бунларын *n* гатлары *n-p-n* транзисторун коллектор гатына, *p* гатлары исә база гатына ујғун кәлир.

МДЈ интеграл схемин әсасыны индуксија едилмиш каналлы МДЈ транзистор тәшкил едир. Резистор ролуну икигүтблү схеми илә гошулмуш транзистор ојнајыр. Конденсатор кими транзисторун идарәедичи електродунун алты илә ејни вахтда һазырланан диелектрик гаты, мәнбә вә мәнсәблә ејни вахтда һазырланан јарымкечиричи лөвһәләр истифадә олунур.



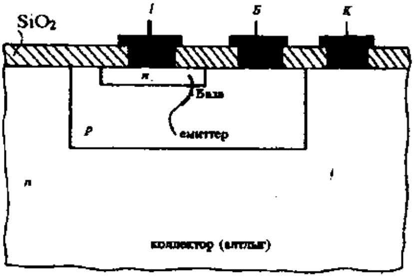
Шәкил 8.6. Ашгар гатмаг үчүн пәнчәрәси олан оксид үзлүјү (маскасы)

Биполјар интеграл схемдә елементләрин кристал васитәсилә әлагәдә олмамасы үчүн онлары бир-бириндән изолә етмәк лазымдыр. Гоншу МДЈ транзисторларын гаршылыглы әлагәси олмур вә онлары бир-биринә чох јахын јерләшдирмәк мүмкүн олур. Бу, МДЈ интеграл схемләринин мүсбәт чәһәтләриндән биридир.

Јарымкечиричи интеграл микросхемләрдә трансформаторлар вә индуктив сарғачлар олмур. Чүнки бәрк чисимдә електромагнит индуксијасына еквивалент олан һәр һансы бир һадисәни әлдә етмәк мүмкүн олмур. Әкәр схемдә трансформатор вә индуктив сарғач тәләб олунарса ондан "асылмыш" компонент кими истифадә етмәк лазымдыр.

Јарымкечиричи интеграл схемләр галынлығы 30-50 мкм вә диаметри 50-100 мм олан силисиум алтлыгларда планар технолокија әсасында һазырланыр. Планар технолокијаја көрә һазырланан елементләр јасты структура малик олур. *p-n* кечидләр вә ујғун тәмас саһәләри алтлығын бир (јухары) сәтһинә чыхыр (шәкил 8.7). Силисиум оксиддән олан тәбәгә *p-n* кечид ләри харичи тә'сирдән горујур. Технолоҗи дөвр гуртарандан сонра алтлыглары алмаз кәсичиләрлә вә ја лазер шүасы илә ајры-ајры

кристаллара бөлүрләр вә бунларын һәр бири ајрыҹа интеграл микросхем тәшкил едир. Бундан әввәл јарымкечириҹи интеграл микросхемләрин електрик параметрләрини өлчүр вә зај микросхемләри ајы-рырлар.



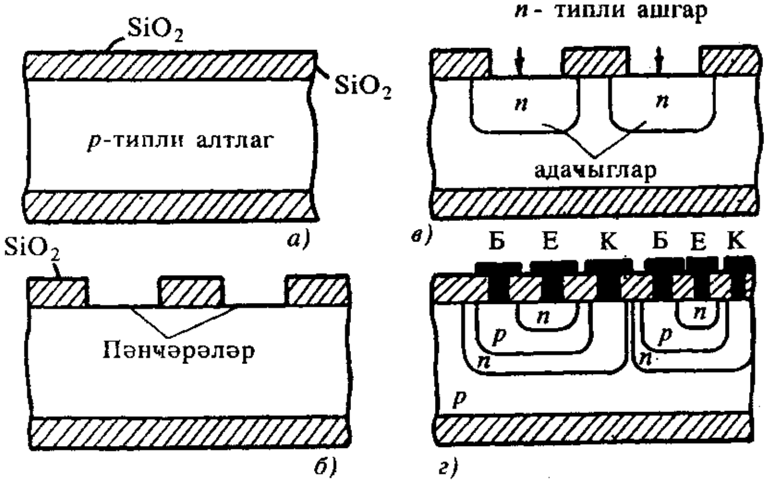
Шәкил 8.7. Планар технолокија илә һазырланмыш јарымкечириҹи интеграл елементин структуру

Транзисторларын һазырланмасы. Транзисторлары һазырламаг үчүн әсасән планар-диффузијалы вә планар-епитаксиал технолокијадан истифадә едирләр.

Биполјар транзистору һазырламаг үчүн планар-диффузијалы технолокијада әввәлҹә *p* типли алтлығын сәтһиндә термики оксидләшмә үсулу илә силисиум оксиддән назик мүһафизә гаты јарадылыр (шәкил 8.8.). Сонра фотолитографија үсулу илә 1-ҹи оксид үзлүјү әмәлә кәтирмәк үчүн оксид тәбәгәсинин үзүнә ишыға һәссас олан емулсија-фоторезист чәкилир. Фоторезистин үзәринә үзлүјүн тәләб олунан рәсминин шәкли салыныр, алынан тәсвир ашкарланыр, фоторезистин ишыг дүшән һиссәләри хүсуси мәһлулла тәмизләнәрәк оксид тәбәгәсинин үстү ачылыр. Сонра јенә мәһлулла үстү ачылмыш саһәдә оксид тәбәгәси һәлл етдирилиб көтүрүлүр. Нәтиҹәдә, интеграл микросхемдә транзисторларын верилән сајына ујғун вә тәләб олунан шәкилдә дешикләр (пәнҹәрәләр) топлусу јараныр (шәкил 8.8б).

Бу пәнҹәрәләрдән алтлығын дәринликләринә *n* типли ашгарларын диффузијасы һәјата кечирилир вә гоншу саһәләрдән вә алтлыгдан бағлы *p-n* кечидләрлә изолә олунмуш *n* типли гатлар – адаҹыглар әмәлә кәлир (шәкил 8.8в). Бу адаҹыглар дикәр елементләрин јаранмасы үчүн әсас тәшкил едир вә онларын үзәриндә планар транзисторлар јарадылыр. Бунун үчүн икинҹи оксид үзлүјү васитәсилә *n* типли коллектор ролуну ојнајан адаҹыгларын дәринлијинә *p* типли ашгар диффузија едиләрәк *p* типли база гаты әмәлә кәтирилир. Сонра үчүнҹү үзлүкдән адаҹыглара *n* типли ашгар диффузија едиләрәк *n* типли емиттер јарадылыр. Нәһајәт, дөрдүнҹү оксид үзлүјүндән гатлары вә лазыми елемент-

ләри бирләшдирән јолларын үзәринә металлашдырылмыш тәмаслары тоз шәклиндә сәпәләјирләр (шәкил 8.8г).

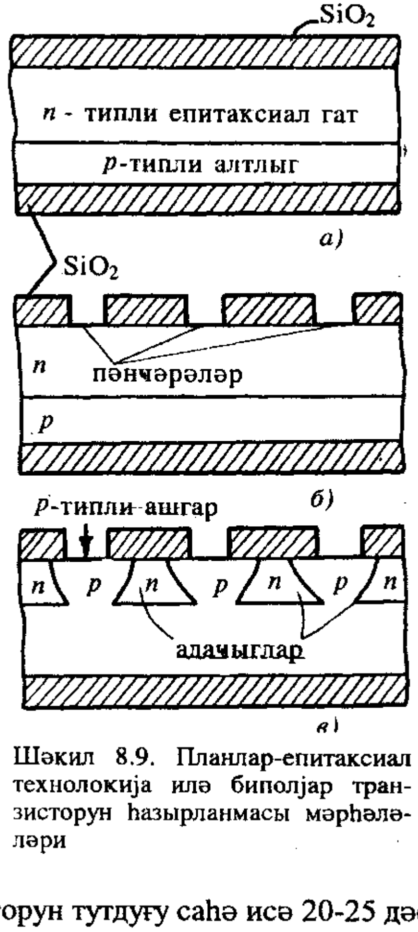


Шәкил 8.8. Планар-диффузија технолокијасы илә биполјар транзисторун һазырланмасы мәрһәләләри

Планар-диффузија технолокијасынын мәнфи чәһәти одур ки, диффузија алтлығын сәтһиндә һәјата кечирилдијиндән *p-n* кечидләринин сәрһәдләринин дәгиглији кичик олур. Она көрә дә ашгарлар алтлығын галынлығы боју бәрабәр пајланмыр: сәтһдә ашгарларын консентрасијасы дәринликләрә нисбәтән даһа чох олур.

Бу чатышмазлыг планар-епитаксиал технолокијада арадан галдырылыр.

Истәнилән кечиричилијә малик олан јарымкечиричи алтлығын үзәринә газ фазасындан 10-15 мкм галынлыглы назик јарымкечиричи гатынын артырылмасы просесинә епитаксија дејилир. Епитаксија нәтичәсиндә артырылан (јетишдирилән) гатын кристал гәфәси алтлығын кристал гәфәсиндән там давамы олур. Епитаксиал гатла алтлыг изоләедичи рол ојнајыр *p-n* кечидлә бир-бириндән ајрылыр. Планар-епитаксиал технолокија илә биполјар транзистору һазырламаг үчүн *p* типли јүксәк мүгавимәтли алтлыг вә оксид тәбәгәси илә өртүлмүш *n* типли



Шәкил 8.9. Планлар-епитаксиал технолокија илә биполјар транзисторун һазырланмасы мәрһәләләри

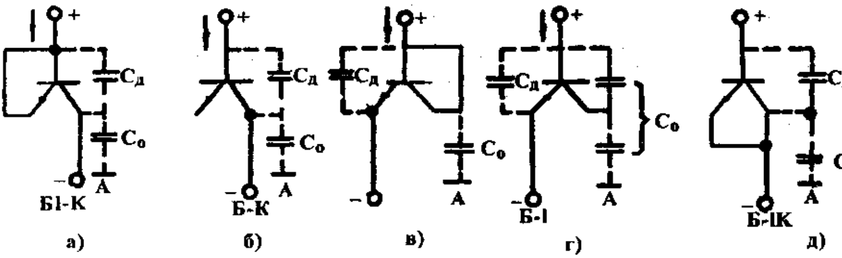
епитаксиал гатдан истифадә едилир (шәкил 8.9а). Сонра оксид гатындан үзлүк дүзәлдилир (шәкил 8.9б) вә онун пәнҹәрәләриндән *p* типли ашгарын диффузијасы тәшкил едилир. Нәтиҹәдә, епитаксиал гатда планар - диффузијалы технолокијада алынанлара бәнзәр бағлы *p-n* кечидләрлә изолә олунмуш адаҹыглар јараныр (шәкил 8.9в).

Бундан сонра планар–диффузијалы технолокијада олдуғу кими адаҹыглар әсасында транзистор структурлары формалашдырылыр. Планар-епитаксиал технолокијада ашгарлар епитаксиал гат бојунҹа бәрабәр пајланыр вә *p-n* кечидләрин сәрһәдләри даһа дәгиг олур.

МДЈ транзисторлар да бу гајда илә һазырланыр, лакин технoложи әмәлијјатларын сајы 3-3,4 дәфә, транзисторун тутдуғу саһә исә 20-25 дәфә аз олур.

Диодларын һазырланмасы. Планар технолокија илә диодлар да јухарыдакы гајдада һазырлана биләр. Лакин конструктив-технолoжи бахымдан сәрфәли олдуғуна көрә диод кими адәтән интеграл транзисторларын емиттер вә коллектор кечидләри истифадә олунур.

Диод кими истифадә олунан интеграл транзисторлар 5 мүхтәлиф схем үзрә гошулурлар (шәкил 8.10). Коллектор кечиди әсасында алынан диодлар (шәкил 8.10 д, е) ән бөјүк бурахыла билән әкс кәркинлијә (50В) маликдирләр.



Шәкил 8.10. Диод кими истифадә олунан интеграл транзисторун мүхтәлиф гошулма схемләри

Емиттер кечидиндә алынан диодларын иш сүр'әти бөјүк, әкс чәрәјанынын гијмәти исә ән кичик олур. Коллектор кечиди гыса гапанмагла емиттер кечиди әсасында алынан диод (шәкил 8.10в) стабилитрон кими ишләдилир.

Диодун тутуму (анод вә катод арасында) истифадә олунан кечидин саһәси илә мүәјјән едилир. Она көрә дә тутумун гијмәти бу кечидләр паралел гошуланда (шәкил 8.10г) максимал олур. Алтлыгла елемент арасында јаранан паразит тутум аноду вә ја катоду "јерә" шунтлаја биләр, чүнки алтлыг "јерә" бирләшмиш (торпагланмыш) олур. Емиттер кечидиндә алынан диодларда бу тутум даһа кичик олур.

Диодун ачыг вәзијјәтдән баглы вәзијјәтә кечирилмәси мүддәти (әкс чәрәјанын бәрпа мүддәти) коллектор кечиди гыса гапанмагла емиттер кечидиндә алынан диодларда минимал олур, чүнки бурада јүкләр јалныз база гатында јығылыр (коллектор кечиди гыса гапанмышдыр) (шәкил 8.10в). Дикәр вариантларда јүкләр һәм базада, һәм дә коллекторда јығылыр вә онларын сорулуб апарылмасы үчүн даһа чох вахт тәләб олунур.

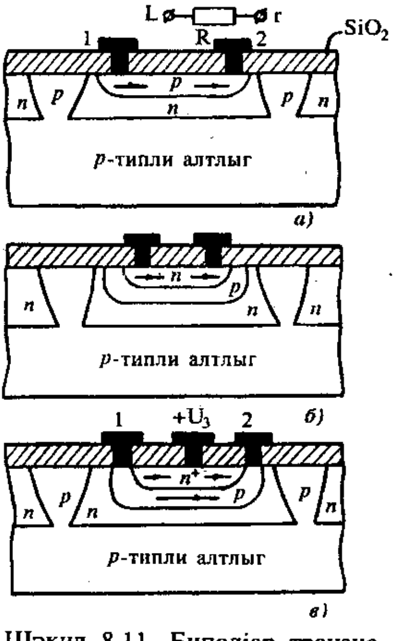
Көстәрилән вариантлардан емиттер дөврәсиндә алынан диодлар (шәкил 8.10 в, г) оптимал һесаб олунур. Ән чох истифадә олунан коллектор кечиди гыса гапанмагла емиттер кечидиндә алынан диоддур.

Резисторларын һазырланмасы. Интеграл резисторлар 3 мкм-ә гәдәр назик јарымкечиричи гат кими олурлар. Онлары алтлығын дикәр адачыгларында јарадылан транзистор структурлары илә ејни заманда формалашдырмаг лазымдыр. Белә резис-

тор диффузија резистору адланыр. Резисторлар да башга елементләрлә бағлы *p-n* кечидләри васитәси илә изолә едилир.

Практикада ән чох јајылан үсул транзистор структурунун база вә ја емиттер гатынын диффузија резистору кими истифадә едилмәсидир. База гаты үзәриндә бөјүк мүгавимәтли, емиттер гаты үзәриндә исә кичик мүгавимәтли резисторлар алыныр. База гаты әсасында алынан диффузија резисторунун структурундан көрүнүр ки, о, дикәр елементләрдән ән азы ики әкс гошулмуш *p-n* кечидләрлә изолә олунмушдур (шәкил 8.11а). Тәтбиг едилән кәркинлијин ишарәсиндән асылы олмајараг гаршы-гаршыја гошулмуш *p-n* кечидләр системи һәмишә бағлы олур.

Дөрдбучаглы формаја малик олан диффузија резисторунун мүгавимәти белә тә'јин олунур:



Шәкил 8.11. Биполјар транзисторун база (а), емиттер (б) гаты вә МОЈ-транзистору (в) әсасында һазырланмыш интеграл резисторлар

$$R = \rho\ell/(\text{в}h) = \rho_S(\ell/\text{в}) = \rho_S \cdot N_S,$$

Бурада ρ, ℓ, в, h – ујғун олараг материалын хүсуси мүгавимәти, диффузија гатынын узунлуғу, ени вә галынлығы; $\rho_s=\rho/h$-хүсуси сәтһи мүгавимәт, $N_s=\ell/\text{в}$ – тәбәгәнин ℓ узунлуғунда јерләшән вә тәрәфләри в олан квадратларын сајыдыр.

Хүсуси сәтһи мүгавимәт тәбәгәли резисторларын чәрәјан кечирмә хүсусијјәтләрини характеризә едән мүһүм кәмијјәтдир вә о, квадратын өлчүләриндән асылы олмур. Онун өлчү ваһиди Ом/ квадратдыр (Ом/м).

Биполјар транзисторун емиттер гаты әсасында алынан диффузија резисторунун да мүгавимәти (шәкил 8.11б) јухарыдакы гајдада тә'јин едилир.

База гаты әсасында

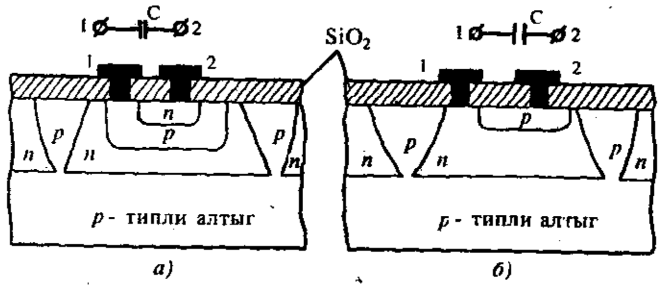
алынан диффузија резисторларынын хүсуси сәтһи мүгавимәти 100-300 Ом/квадрат, емиттер гаты әсасында алынан резисторунки исә 0,5 Ом/квадрат һәддиндә олур. Адәтән, белә резисторларын мүгавимәтләринин гијмәти 10 Ом-дан 50 кОм-а гәдәр 0,125 $мм^2$ олур ки, бу да интеграл транзисторун тутдуғу саһәдән 40-50 дәфә чохдур. *p-n* кечидләрлә изолә олунмуш диффузија резисторлары 20 Мhс-ә гәдәр тезликлә ишләјә билирләр.

Метал-оксид-јарымкечиричи структурларда резистор кими МОЈ транзисторлары истифадә олунур (шәкил 8.11в). Бурада канал резистив чәрәјан ахыдан чығыр кими тәсвир едилир вә ен кәсији јухарыдан *n* типли ашгарлы диффузија һәјата кечирмәклә кичилдилир. Бу резисторлар гејри-хәтти характеристикаја малик олурлар вә онлара ПИНЧ-резисторлар дејилир.

Конденсаторларын һазырланмасы. Јарымкечиричи интеграл микросхемләрдә конденсатор кими биполјар транзисторларын әкс гошулмуш *p-n* кечидләринин сәдд тутуму вә ја МОЈ-транзисторун кечид тутуму истифадә олунур.

Интеграл конденсаторлар әсасән биполјар транзисторларын емиттер вә коллектор кечидләри әсасында әлдә едилир (шәкил 8.12).

Емиттер кечидли конденсаторун (*а*) хүсуси тутуму (ваһид саһәјә дүшән) ән бөјүк (0,2мкф/$см^2$), дешилмә кәркинлији исә ән кичик (бир нечә волт) олур. Коллектор кечидли конденсаторун (*б*) хүсуси тутуму тәхминән 6 дәфә кичикдир, дешилмә кәркинлији исә он волтларла өлчүлүр.



Шәкил 8.12. Биполјар транзисторун емиттер (*а*) вә коллектор (*б*) кечидләри әсасында гурулмуш интеграл конденсаторлар

p-n кечидләр әсасында алынан конденсаторларын мәнфи чәһәтләри хүсуси тутумун кичиклији, транзистора нисбәтән чох саһә тутмасы, тутумун кәркинликдән асылы олмасы вә изоләедичи *p-n* кечидләринин һесабына паразит тутумларын мөвчуд олмасыдыр. Она көрә белә конденсаторлар микросхемләрдә нисбәтән аз истифадә олунур.

Елементләрарасы бирләшмәләрин вә тәмас саһәләринин һазырланмасы. Интеграл микросхемин бүтүн актив вә пассив елементләри һазырланандан сонра онлары бир-биринә әлагәләндирән вә мүәјјән тә'јинатлы принсипиал схемә ујғун олан елементләрарасы бирләшмәләри вә микросхемин көвдәсинин харичи чыхышларыны схемә гошмаг үчүн тәмас саһәләри дүзәлдилмәлидир. Бунун үчүн силисиум лөвһәсинин әввәлчәдән оксидләшдирилмиш сәтһи вакуумда үфүрмә үсулу илә чөкдүрүлмүш алүминиум гаты (0,5-2 мкм) илә өртүлүр. Онун үзәринә јенидән фоторезист чәкилир вә јенә дә фотолитографија үсулу илә лазым олмајан јерләрдә алүминиум гаты хүсуси мәһлулла әридилиб көтүрүлүр. Нәтичәдә јарымкечиричинин сәтһиндә ени 10 мкм олан алүминиум кечиричиләринин рәсми вә тәмас саһәләри галыр. Бундан сонра 20-25 мкм диаметрли гызыл мәфтилчикләрлә тәмас саһәләри ултрасәс вә ја термокомпрессија гајнағы васитәсилә чыхышларына бирләшдирилир.

8.4. Һибрид интеграл микросхемләрдә елементләрин һазырланмасы

Һибрид интеграл микросхемләрин һазырланмасында истифадә олунан тәбәгәли технолокија јалныз пассив елементләр (резисторлар, конденсаторлар вә индуктивликләр) үчүн стабил параметрләр әлдә етмәјә имкан верир. Она көрә дә белә интеграл микросхемләр резисторларын вә конденсаторларын јығымы вә ја резистив-тутум дөврәләриндән ибарәт олурлар.

Техноложи чәһәтдән һибрид интеграл схемләр дә груп үсулу илә диелектрик алтлыг үзәринә тәбәгәли пассив елементләри чәкмәклә һәјата кечирилир.

Сонрадан алтлығын үзәринә "асылмыш" компонентләр бу елементләрә бирләшдирилир. Һибрид интеграл микросхемләрдә

кениш чешидли асылмыш компонентләрин истифадә олунмасы јарымкечиричи интеграл микросхемләрә нисбәтән бир чох һалларда хүсуси схемотехники мәсәләләрин һәллини асанлашдырыр. Бунунла белә гејд етмәк лазымдыр ки, һибрид микросхемләрин е'тибарлығы, маја дәјәри вә кристалын ваһид сәтһинә дүшән елементләрин сајы вә бир сыра дикәр көстәричиләри интеграл схемләрдән писдир. Һибрид интеграл микросхемләрин истеһсалында јарарлы мәһсулун чыхышы 60-80%, јарымкечиричиләрдә исә 5-30% олур.

Дејилдији кими, һибрид интеграл схемләрин әсас компонентләри алтлыг, пассив елементләр системи, онларын бирләшмәләри вә актив ("асылмыш") компонентләрдир.

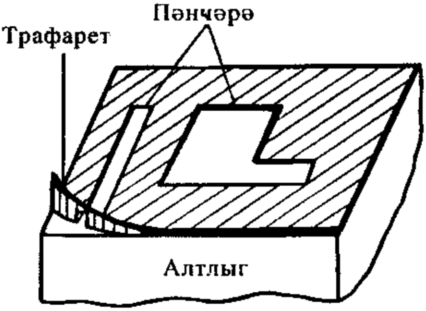
Алтлыг үчүн ән чох ишләнән материаллар шүшә-чини материаллар - ситаллардыр. Онлар јүксәк електрики изолә хүсусијјәтинә, температура, кимјәви вә абразив јејилмәјә, рүтубәт вә газ нүфузлулуғуна гаршы дајаныглыға, механики бәрклијә вә асан е'маледилмә хүсусијјәтинә маликдирләр. Бунлардан әлавә, шүшә вә чини материаллар да истифадә олунур. Алтлыглар 6х15-дән 48х60 мм-ә кими өлчүләри вә 0,5-2 мкм галынлығы олан дүзбучаглылар шәклиндә истифадә едилир.

Назик тәбәгәли вә галын тәбәгәли һибрид интеграл схемләрин һазырланма технолокијасы бир-бириндән мүәјјән гәдәр фәргләнир.

Галын тәбәгәли интеграл елементләрин һазырланмасы. Галын тәбәгәли интеграл схемләрин елементләрини һазырламаг үчүн бир нечә квадрат сантиметр саһәли диелектрик алтлығын үзәринә мүхтәлиф тәркибли пасталар чәкилир вә тәбәгә бир дәфәдән лазыми галынлығы алыр. Чәрәјан кечирән пасталар елементләрарасы бирләшмәләри, конденсаторларын лөвһәләрини вә көвдәнин чубугларына чыхышлары, резистив пасталар резисторларын алынмасы, диелектрик пасталар конденсаторларын лөвһәләри арасындакы изолә гатын вә һазыр интеграл схемин сәтһинин мүһафизәсини тә'мин едирләр. Һәр гат өзүнәмәхсус рәсмә малик олмалыдыр. Она көрә һәр гаты һазырлајаркән бу гатын лазыми јерләринә пастаны ајры үзлүјүн трафаретин пәнчәрәләриндән чәкирләр (шәкил 8.13).

Һибрид интеграл схемин тәбәгәли һиссәси һазырланандан сонра әввәлчә мүәјјән едилмиш бош јерләрә вә мүһафизә-

едичи диелектрик гатын үзәринә «асылмыш» компонентләри јапышдырырлар вә онларын чыхышларыны кечиричи гатларын ујғун тәмас саһәләри илә бирләшдирирләр.



Шәкил 8.13. Пастаны чәкмәк үчүн кристалын үзәринә гојулан үзлүк (трафарет)

Механики паста чәкилмә үсулу тәбәгәнин галынлығыны 10-20 мкм-дән аз етмәјә имкан вермир вә она көрә дә буна га-лын тәбәгәли технолокија дејилир. Бу үсул резисторларын вә конденсаторларын номиналларынын јүксәк дәгиглијини тә'мин едир. Бунунла белә технолокијанын нисбәтән садәлији мә'мулатларын дәјәрини азалдыр.

Назик тәбәгәли интеграл елементләрин һазырланмасы. Бурада даһа мүрәккәб технолокијадан вә баһа аваданлыгдан истифадә едилир, она көрә мә'мулатлар да баһа баша кәлир.

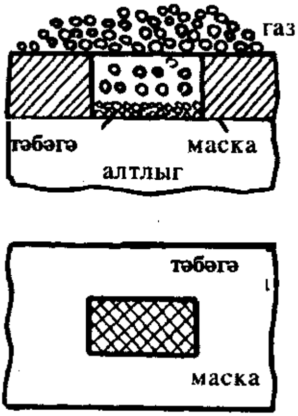
Тәбәгәләр алтлығын сәтһинә газ фазасындан чөкдүрүлүр. Бу заман тәбәгә өзүнүн верилән галынлығыны бир дәфәјә јох, тәдричән алыр: бир мономолекулјар гат о бирисинин үстүнә јығылыр вә с. (шәкил 8.14). Нөвбәти тәбәгә јетишдирилдикдән сонра газын кимјәви тәркиби вә бунунла да сонракы тәбәгәнин електрофизики хүсусијјәтләри дәјишдирилир. Беләликлә, нөвбә илә кечиричи, резистив вә диелектрик гатлары алыныр. Һәр гатын рәсми ја әсасын үзәриндә јерләшдирилән трафаретлә (галын тәбәгәли һалдакы кими, ја да сәтһдә јерләшдирилән үзлүк (јарымкечиричи интеграл схемләрдәки үзлүјә бәнзәр) васитәси илә мүәјјән едилир (шәкил 8.6).

Бунларын атом вә молекулларынын мәнбәдән алтлыға манеәсиз кечмәсини тә'мин етмәк үчүн кифајәт гәдәр атмосфер сејрәклији тә'мин едилмәлидир, јә'ни тәбәгәси чөкдүрүлмәси гапалы фәзада мүәјјән вакуум олан шәраитдә баш верилмәлидир.

Асылмыш компонентләри бундан әввәл олдуғу кими схемин һазыр олан тәбәгәли һиссәнин сәтһинә јапышдырыб елементләрин ујғун тәмас саһәләри илә бирләшдирирләр.

Тәбәгәләр кичик сүр'әтлә артдығындан 1 мкм галынлығы олан тәбәгәнин алынмасына чох вахт сәрф олунур. 1-2 мкм галынлыглы тәбәгәләр алтлыгдан асанлыгла гопа биләр, она көрә әсасән онларын галынлығы 0,5-1 мкм-дән чох олмур. Мәһз буна көрә дә бу технолокија назикгатлы технолокија адланыр. Дикәр тәрәфдән тәбәгәләрин артма сүр'әти кичик олдуғундан онларын галынлығынын тәнзим едилмәси асанлашыр вә бу да мүгавимәт вә тутумларын номиналларынын дәгиглијини артырмаға имкан верир.

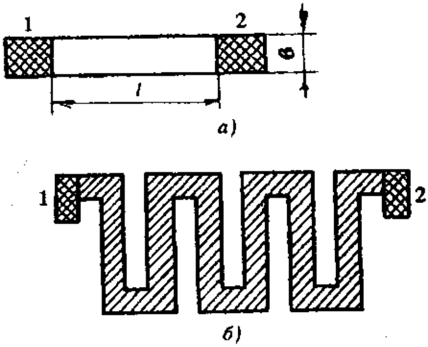
Резисторларын һазырланмасы. Бунун үчүн мүхтәлиф хүсуси сәтһи мүгавимәтә малик олан тәмиз металлардан, онларын әринтиләриндән вә микрокомпосисијалардан истифадә олунур. Металлардан хрому вә јүксәк хүсуси сәтһи мүгавимәтли танталы көстәрмәк олар. Ону тәмиз шәкилдә пассив елементләри дүзәлтмәк үчүн, оксид тәбәгәси шәклиндә исә јахшы диелектрик хүсусијјәтинә малик материал кими ишләдирләр. Метал әринтиләриндән нихром вә хром, тантал вә волфрамын азотлу, карбонлу вә силисиумлу әринтиләрини көстәрмәк олар. Адәтән әринтиләрин хүсуси сәтһи мүгавимәтләри әринтини әмәлә кәтирән металларындакындан бөјүк, мүгавимәтләринин температур әмсалы исә кичик олур. Микрокомпосисијалар електрик хүсусијјәтләринә көрә метал әринтиләринә јахындыр. Ән чох истифадә олунан дәмир, никел вә алүминиум әлавә етмәклә хром вә силисиум әсасында алынан микрокомпосисијалардыр.



Шәкил 8.14. Назик тәбәгәнин гат-гат артырылмасы

Назик гатлары алтлығын үзәринә вакуумлу үфүрмә, катод вә ион-плазмалы сәпәләнмә үсулларынын фотолитографија илә биркә тәтбиги сајәсиндә чәкирләр. Назик тәбәгәли резисторларын мүгавимәтләри күчүн номинал гијмәтинин 0,2 Вт һалы

үчүн 100 Ом-дан 50 кОм-а гәдәр олур. Адәтән, онлар дүзбучаглы шәклиндә олурлар (шәкил 8.15 а). Квадратларын сајыны вә мүгавимәтин гијмәтини јарымкечиричи резисторларда олдуғу кими һесаблајырлар. Бөјүк мүгавимәт номиналлары әлдә етмәк вә алтлығын саһәсиндән сәмәрәли истифадә етмәк үчүн резисторлара Г вә П шәкилли парчалардан ибарәт мүрәккәб формалар верирләр (шәкил 8.15б). Мүгавимәти һесабламаг үчүн мүрәккәб форманы елементар дүзбучаглылара бөлүрләр.



Шәкил 8.15. Тәбәгәли резисторларын конструктив гурулушу

Конденсаторларын һазырланмасы. Ән садә шәкилдә тәбәгәли конденсатор араларында диелектрик олан ики метал гатдан ибарәт (шәкил 8.16), мүрәккәб һалларда исә чохгатлы олур. Онларын көстәричиләринин чоху диелектрик гатынын материалындан галынлығындан вә алынма үсулундан асылыдыр. Диелектрик гатын тәркибинә көрә конденсаторун лөвһәләринин материалы сечилир.

Тәбәгәли конденсаторларын ән вачиб параметрләриндән бири онун хүсуси тутумудур: $C_0= C/S = \varepsilon\varepsilon_0/h = 0{,}0885\ \varepsilon/h$, бурада ε - лөвһәләрарасы гатын диелектрик нүфузлуғу; ε_0- електрик сабити (пф/см), S - конденсаторларын лөвһәләринин саһәси; h - диелектрик гатынын һүндүрлүјүдүр.

Диелектрик кими силисиум монооксидини көтүрәндә хүсуси тутум 5000-10000 пф/см^2 һәддиндә олур.

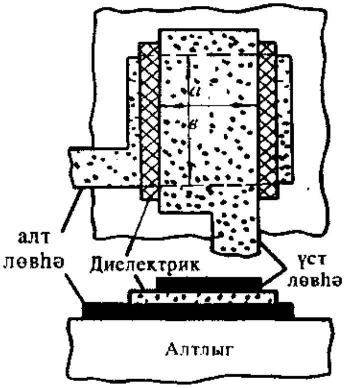
Бөјүк гијмәтли тутумлар алмаг үчүн диелектрик тәбәгә кими титан оксиди (ε-80) вә бариум-титанат (ε=1000) көтүрүлүр. Диелектрик материаллар електрик мөһкәмлији илә дә характеризә олунур ($E=U_{деш}/h$: $U_{деш}$ - дешилмә кәркинлијидир). Назикгатлы материаллар үчүн $E=0{,}1\cdot10^6$-$10\cdot10^6$В/см-дир. Диелектрик тәбәгәләринин чоху үчүн дешилмә кәркинлијинин гијмәти тә-

бәгәнин материалынын гүсурлары вә конденсаторун лөвһәләринин материалы илә мүәјјән едилир.

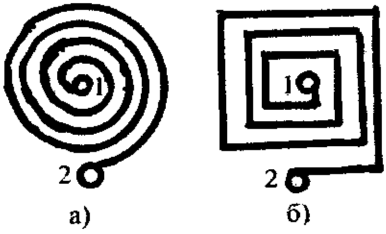
Лөвһәләр үчүн әсасән алүминиум истифадә едилир, чүнки онун атомларынын миграсија јүрүклүјү сәтһиндә оксидләшмә баш вердијиндән чох кичик олур (диелектрик назик оланда атомларын диелектрик гатына миграсија етмәси лөвһәләри гыса гапаја биләр).

Алтлығын сәтһинә кечиричи вә диелектрик тәбәгәләрин чәкилмәси үсуллары тәбәгәли резисторларын технолокијасына бәнзәрдир. Алынан тәбәгәләрин ишчи кәркинлији 15 В-а кими, тутумларын номинал гијмәтләри исә 10-10000 пф һәддиндә олур. Һибрид интеграл схемдә даһа бөјүк тутум тәләб олунанда дискрет конденсаторлардан истифадә едилир.

Назик тәбәгәли индуктив сарғачларын һазырланмасы. Белә сарғачлар даирәви вә ја дүзбучаглы спирал шәклиндә һазырланыр (шәкил 8.17). Белә сарғачларын индуктивлији 5 мкһн-дән артыг олмур ки, бу да сарғачын омик мүгавимәтиндәки иткиләрлә әлагәдардыр. Буна көрә чох вахт һибрид интеграл схемләрдә микроминиатүр индуктив сарғачлардан истифадә едирләр.



Шәкил 8.16. Тәбәгә шәкилли конденсатор



Шәкил 8.17. Һибрид интеграл микросхемләрин дәјирми (*а*) вә дүзбучаглы (*б*) спирал шәкилли индуктив сарғачлары

Мүгавимәти азалтмаг үчүн сарғачлары гызылдан дүзәлдирләр. Метал золағын ени 30-50 мкм, долаглар арасындакы мәсафә 50-100 мкм олур. Сарғачларын кејфијјәтлилији тезликлә

мүтәнасиб артығындан 3-5 долаға малик олан индуктивликләр 3-5Гһс тезликләрдә ишләјә билирләр.

Актив компонентләрин, мәфтилләрин вә тәмас саһәләринин һазырланмасы. Һибрид интеграл схемләрдә актив компонентләр кими дискрет јарымкечиричи диодлар, транзисторлар, тиристорлар, јарымкечиричи интеграл микросхем вә көвдәсиз һибрид интеграл микросхемләр ишләдилир. Бу компонентләрин көмәјилә мүхтәлиф гејри-типик функсионал говшагларын јарадылмасында гаршыја чыхан бир чох мүрәккәб мәсәләләри һәлл етмәк олар. Оптимал електрик параметрләри әлдә етмәк үчүн бир һибрид интеграл схемин алтлығы үзәриндә башга-башга технолокијаларла һазырланмыш мүхтәлиф (биполјар, МОЈ) компонентләри јығмаг мүмкүндүр.

Тәбәгәли пассив елементләр вә асылмыш компонентләр тәбәгәли кечиричиләр (мәфтилләр) вә тәмас саһәләри васитәси илә бирләшдирилир. Бу бирләшдиричи елементләрин кечиричилији јүксәк олмалы, онлар өтүрүлән сигналлары тәһриф етмәмәли, паразит әкс әлагәләр јаратмамалы вә е'тибарлы, гејри-дүзләндиричи олуб аз күјлү тәмас јаратмалыдырлар.

Тәбәгәли мәфтилләри вә тәмас саһәләрини сәпәләмәк үчүнән јахшы материаллар гызыл, күмүш, мис вә алүминиумдур. Гызыл һәм баһа, һәм дә кичик адкезија (алтлыға јапышма) хүсусијјәтинә маликдир, күмүшүн вә мисин миграсијаетмә јүрүклүјү чох бөјүкдүр. Она көрә көстәрилән материаллар никелдән, хромдан вә нихромдан олан алтлыглар илә бирликдә ишләдилир.

Сәрт чыхышлы асылмыш компонентләр тәмас саһәләринә галајлама, ултрасәс гајнағы, термокомпрессија вә лазер шүасы васитәси илә бәркидилир. Јумшаг чыхышлары олан компонентләри исә галајлајыр вә јахуд епоксид јапышганы илә јапышдырырлар.

ƏDƏBIJJAT

1. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991.-288с.
2. Алексеенко А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника, Москва: Радио и связь, 1982 г. 413 с.
3. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем: Учеб. пособие для вузов. Под ред. И.П.Степаненко – М.: Радио и связь, 1983-232с.
4. Горбачов Г.Н., Е.Е.Чаплыгин Промышленная электроника Москва.: Энергоатомиздат, 1988г. 320с.
5. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. – К.: Высшая школа,1989.- 423с.
6. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учебное пособие для вузов. – М.:Высшая школа.,1991.-622с.
7. Ефимов И.Е., Козырь И.Н., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность: Учеб. пособие для приборостроит.спец.вузов. - М.: Высшая школа,1986.-464с.
8. Жеребцов И.П. Основы электроники. Л.: Энергия, 1985
9. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов.-М.:Высшая школа,1982.-496с.
10. Криштафович А.К., Трифонюк В.В. Основы промышленной электроники: Учебник для электрорадиотехн. и электроприборостроит. спец. техникумов –М.: Высшая школа 1985.-287с.
11. Методические указания для изучения основ электроники. Баку: изд. Азерб. ГНА 1996. 64 с.
12. Основы промышленной электроники. Исаков Ю.А., Платонов А.П., Руденко В.С., Сенько В.И., Трифонюк В.В., Юдин Е.Е. - К.:- "Тэхника", 1976, -544с.
13. Руденко В.С., Сенько В.И., Трифонюк В.В. Приборы и устройства промышленной электроники.-К.:´Тэхника, 1990.-368с.

14. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Издание второе, перераб. и доп.-М.: Энергия, 1967-615с.
15. Электронные промышленные устройства. Учеб. для студентов вузов / В.И.Васильев, Ю.М.Гусев, В.Н.Миронов и др. – М.: Высш.шк., 1988 – 303 с.

МҮНДӘРИЧАТ

Кириш 2
1. Јарымкечиричиләр електроникасынын әсаслары 5
1.1. Бәрк чисмин зона нәзәријјәсинин әсаслары. Енержи зоналары 5
1.2. Јарымкечиричи материаллар һагтында мә'лумат 8
1.2.1. Јарымкечиричинин мәхсуси кечиричилији 9
1.2.2. Јарымкечиричинин ашгар кечиричилији 12
1.3. Електронларын јарымкечиричиләрдә пајланмасы вә һәрәкәт ет-мәси ганунлары 17
1.4. Електрон-дешик кечиди 20
1.5. Јарымкечиричиләрдә кечидләрин дикәр нөвләри 32
1.6. Јарымкечиричиләрдә сәтһ һадисәләри 41
1.7. Јарымкечиричиләрдә електромагнит шүаланмасы. Дахили фотоеффект һадисәси 44
1.8. Јарымкечиричи елементләрин һазырланма технолокијасы 45
2. Јарымкечиричи параметрик елементләр 49
3. Јарымкечиричи диодлар 53
3.1. Дүзләндиричи диодлар 53
3.2. Импулс диодлары 56
3.3. Стабилитронлар 58
3.4. Тунел диоду 59
3.5. Варикаплар 61
3.6. Шоттки диоду 63
4. Биполјар транзисторлар. 66
4.1. Транзисторун иш принсипи 67
4.2. Биполјар транзисторун гошулма схемләри вә статик характе-ристикалары. 71
4.3. Биполјар транзисторун динамик режими вә динамик характе-ристикалары 83
4.4. Иш режиминин вә температурун биполјар транзисторун пара метрләринә тә'сири 87
4.5. Биполјар транзисторун еквивалент схемләри вә параметрләр системи 91
5. Униполјар транзисторлар 99
5.1. p-n кечидли униполјар транзистор 99
5.2. МДЈ- транзисторлар 105
6. Тиристорлар 110
7. Јарымкечиричи фотоелектрон чиһазлары 115
7.1. Фотоелектрон шүаландырычы чиһазлар 115
7.2. Фотоелектрон шүагәбуледичи чиһазлар 122
7.3. Оптоелектрон чүтләри 138

8. Микроелектроника 145
8.1. Микроелектроника елементләри 146
8.2. Интеграл микросхемләрин тәснифаты 149
8.3. Јарымкечиричи интеграл микросхемләрдә елементләрин һазырланмасы 153
8.4. Һибрид интеграл микросхемләрдә елементләрин һазырланмасы 161
Әдәбијјат 168

© Азәрбајчан Дөвләт Нефт Академијасы, 2000

Нәшријјат редактору Х.Г.Пашајева

Чапа һазырланмышдыр 29.06.2000. Кағыз форматы 60x84 1/16. Мәтбәә кағызы. Чапы офсет үсулу илә. Һәчми 10.75 физ. чап вәрәги. Шәрти рәнк- оттиск 10.75 Учот – нәшр вәрәги 10.0. Сифариши 136. Тиражы 100 нүсхә. Гијмәти 6000 манат.

АДНА-нын мәтбәәси. Бакы – 370601. Азадлыг проспекти 20.