Р.Т.ҺҮМБӘТОВ

ЕЛЕКТРОНИКА

I һиссә
(Електрон чиһазлары)
Али мәктәбләр вә техникумлар үчүн
дәрс вәсаити

Азәрбајчан Республикасы Тәһсил Назирлији
тәрәфиндән тәсдиг едилмишдир
(369 сајлы, 26.04.2000-чи ил тарихли әмр)

«Мaариф» нәшријјаты

Бакы - 2000

6Я1.2
Һ 93

Рә'ј верәнләр:
М.Б.Намазов АзТУ-нун досенти, техника елмләри намизәди,
И.М.Исмајылов АДНА-нын досенти, техника елмләри намизәди

Редактор: досент А.М.Әлијев

Р.Т.Һүмбәтов
Електроника I һиссә (Електрон чиһазлары). Али мәктәбләр вә техникумлар үчүн дәрс вәсаити. Бакы, «Маариф», 2000, 266 сәһифәли, 129 шәкилли

Дәрс вәсаитиндә електрик сигналларынын тәснифаты, онларын әсас хүсусијјәтләри вә характеристикалары, мүхтәлиф тә'јинатлы електрик дөврләриндә чеврилмәси вә өтүрүлмәси просесләри араштырылыр. Бәрк чисимләрдә, газларда вә вакуумда електрик чәрәјанынын ахмасы хүсусијјәтләри гысача шәрһ едилир. Јарымкечиричи материалларын хусусијјәтләри, онларын үзәриндә гурулмуш мүхтәлиф тә'јинатлы чиһазлар: резисторлар, диодлар, транзисторлар, тиристорлар, оптик електрон чиһазларынын иш принсипи, дөврәјә гошулма схемләри, характерик хүсусијјәтләри, характеристикалары, параметрләри вә тәтбиг саһәләри һаггында кениш мә'лумат верилир. Ејни заманда дәрс вәсаитиндә интеграл микросхемләрин тәснифаты, јарымкечиричи интеграл микросхемләрдә актив вә пассив елементләрин һазырланмасы технолоҝијасынын мәрһәләләри изаһ едилир, һибрид интеграл микросхемләрдә пассив елементләрин һазырланма үсуллары араштырылыр. Електровакуумлу вә газбошалмалы (ион) чиһазларынын әсас невләринин гурулушу, иш принсипи, дөврәјә гошулма схемләри, характеристикалары, параметрләри вә тәтбиг саһәләри һаггында мә'лумат верилир.

Вәсаит али техники мәктәбләрин вә техникумларын "Електрон техникасы", "Автоматлашдырма вә идарәетмә", "Електротехника вә електромеханика" вә "Радиотехника" истигамәтләринин ихтисаслары үзрә тәһсил алан тәләбәләри үчүн нәзәрдә тутулмушдур. Вәсаитдән һәм дә идарәетмә вә електроника саһәсиндә чалышан мүтәхәссисләр дә фајдалана биләрләр.

$һ \frac{2302030000-39}{M652-2000}$ Е'лансыз

Б Д У-нун
Елми
китабханасы

246264

© Р.Т.Һүмбәтов, 2000

ӨН СӨЗ

Һал-һазырда техниканын бүтүн наилијјәтләри өлчмә, нәзарәт, тәнзимләмә вә идарәетмә системләриндә електрон гурғуларын кениш истифадә олунмасы илә билаваситә әлагәдардыр. Електрон гурғуларын елми-техники тәрәггидә ролу микроелектрон елементләринин јаранмасындан вә тәтбигиндән сонра даһа да артмышдыр. Инди мәишәтимиздән башлајараг космик тәдгигатлара гәдәр инсан фәалијјәтинин һеч бир саһәсини електрон чиһазлары, микросхем техникасы, микропроцессорларсыз тәсәввүр етмәк мүмкүн дејилдир.

Она көрә дә електроника вә микросхем техникасынын өјрәнилмәсинин вачиб олдуғуну гејд етмәк лазымдыр. Лакин узун илләр боју Азәрбајчан дилиндә мүвафиг дәрслик вә дәрс вәсаитәләринин чатышмамасы бу елмин әсасларынын тәдрисиндә бөјүк чәтинликләр јаратмышдыр.

Дәрс вәсаити тәртиб едиләркән мүәллифин узун мүддәт Азәрбајчан Дөвләт Нефт Академијасынын «Автоматика, телемеханика вә електроника» кафедрасында охудуғум мүһазирәләрин материалларындан истифадә олунмушдур. Ејни заманда сон вахтлар нәшр олунмуш дәрслик вә дәрс вәсаитләриндәки материалларын сечилмәси, ардычыл вә мәгсәдјөнлү изаһ олунмасы, бә'зи мүрәккәб мөвзуларын садәләшдирилмәси үзәриндә ишләмәјә сә'ј көстәрилмишдир. Тәгдим олунан мөвзуларын һәчминин бөјүк олдуғу нәзәрә алынараг, дәрс вәсаитинин ики китабдан ибарәт нәшр едилмәси нәзәрдә тутулмушдур.

Биринчи китаба електрониканын үмуми анлајышлары, јарымкечиричиләр електроникасынын ән кениш јајылмыш чиһазларынын, вакуумлу вә плазмалы електрон чиһазларынын вә микроелектроника елементләринин гурулушу вә иш принсипи, характеристикалары, параметрләри вә тәтбиги саһәләри һаггында мә'луматлар дахил едилмишдир.

Икинчи китабда мүхтәлиф тә'јинатлы електрон гурғуларынын (ачар схемләринин, күчләндиричиләрин, һармоник вә импулс шәкилли рәгсләр кенераторларынын, мәнтиг елементләринин вә мәһдудлашдырычыларын, комбинасија гурғуларын, сајғачларын, аналог-рәгәм вә рәгәм-аналог чевиричиләринин, дүзләндиричиләрин, сүзкәчләрин, стабилизаторларын вә с.) иши араштырылмышдыр.

КИРИШ

Елми-техники тәрәггинин вачиб истигамәтләриндән бири габагчыл технолокијаларын мәнимсәнилмәси, истеһсалын автоматлашдырылмасы вә механикләшдирилмәсидир. Бу истигамәтләрлә әлагәдар мүхтәлиф мәсәләләрин һәлли електрон-һесаблама техникасында баш верән ингилаби дәјишмәләрә вә халг сәнајесинин “електронлашдырылмасына” әсасланыр.

Мәһсулдар гүввәләрдә әсаслы кејфијјәт дәјишмәләрини тә’мин етмәк, јени мәһсуллар, габагчыл техника вә технолокија јаратмаг үчүн тәбии вә техники елмләрин инкишафы вә онларын әсас саһәләриндән олан бәрк чисмин физикасы, микроелектроника, квант електроникасы вә оптикасы, радио-физика вә радиоелектроника саһәләриндә тәдгигатлары кенишләндирмәк лазымдыр. Електроника саһәсиндә әлдә едилән мүвәффәгијјәтләрдән чәмијјәтин үмуми сәнаје вә елми потенсиалы чох асылыдыр.

Електроника електронларын електрик вә магнит саһәләри илә гаршылыглы тә’сири вә бунларын истифадә принсипләриндән бәһс едән елмдир. Електроникадан кениш истифадә олунмасы електрон гурғуларынын јүксәк һәссаслығы, иш сүр’әти, универсаллығы вә кичик өлчүләри илә әлагәдардыр. Јүксәк һәссаслыг исә мүхтәлиф күчләндиричиләрин көмәји илә әлдә едилир. Јүксәк иш сүр’әти електрик рәгсләринин тәбиәти илә әлагәдардыр. Електроникаын универсаллығы мүхтәлиф енержи нөвләринин (механики, истилик, ишыг, сәс, шүа енержиләри) електрик енержисинә чеврилмә имканларынын мөвчудлуғундан ирәли кәлир. Бүтүн електрон схемләринин иши електрик енержисинин е’малы вә мүхтәлиф чеврилмәләри илә әлагәдардыр. Електрон гурғуларынын өлчүләри интеграл технолокијасынын инкишафы сајәсиндә илдән илә даһа кичик олур.

Електрон чиһазлары дедикдә, иши бәрк чисимдә, маједә, вакуумда, газда вә ја плазмада електрик, истилик вә акустика һадисәләриндән истифадә олунмасына әсасланан гурғулар нәзәрдә тутулур.

Микроелектроника електрон техникасынын интеграл технолокијасына әсасланан микроелектрон гурғуларынын ишләнмәси, лајиһәләндирилмәси, һазырланмасы вә тәтбигини әһатә едән саһәдир. Микроелектрон елементләр үзәриндә гурулмуш

мүхтәлиф тә'јинатлы гурғуларын гурулуш принсипи, иши-нин характерик хүсусијјәтләри вә тәтбиги мәсәләләриндән бәһс едән саһә исә микросхем техникасы адланыр.

Електроника арамсыз олараг инкишаф едир вә бу просесдә әсас рол електрониканын елемент базасынын истеһсал технолокијасына мәхсусдур.

Електрониканын елемент базасы өз инкишафында радиолампалардан башлајараг микропросессорлара гәдәр бир нечә мәрһәлә кечмишдир.

Биринчи мәрһәлә өз башланғычыны XIX әсрин сонундан көтүрүр. Сигналлары електромагнит далғалары васитәсилә узаг мәсафәјә өтүрән радио гурғусунун ихтира едилмәси (1895-чи ил) мүасир рабитә васитәләринин инкишафына тәкан верди. Бу мәрһәлә әсасән пассив елементләр: мәфтилләр, индуктив сарғачлар, магнитләр, резисторлар, конденсаторлар, електромагнит гошучулар вә реләләрин практики тәтбиги илә характеризә олунур.

Икинчи мәрһәлә 1904-чү илдә инкилис алими Ј.Флемингин икиелектродлу лампадан електровакуум диоду кими истифадә етмәси илә әлагәдардыр. 1907-чи илдә електрик рәгсләрини күчләндирән вә кенерасија едән үч електродлу лампа-триод вә бунун ардынча күчлү кенератор лампалары ихтира олунду. Күчләндиричи лампаларын тәтбиги узун рабитә хәтләриндә сигналларын сөнмәсинин гаршысыны алмаға, симсиз телеграфдан истифадә сәси, мусигини вә тәсвири мәсафәјә өтүрмәјә имкан јаратды.

Бу мүддәтдә радиода, һәрби електроникада вә телевизијада чох бөјүк наилијјәтләр әлдә едилмиш вә електрон сәнајесинин инкишафынын әсасы гојулмушдур. Күлли мигдарда јени ихтиранын тәтбиги нәтичәсиндә актив вә пассив елементләрин һазырланмасы технолокијасы даим тәкмилләшдирилмишдир.

Һәлә илк вахтлардан електрон сәнајесиндә маја дәјәринин азалдылмасы, елементләрин өлчү вә күтләләрини, иш мүддәтинин, е'тибарлығынын артырылмасы мәсәләләринин һәлли үзәриндә апарылан ишләр кичик өлчүлү (миниатүр) лампаларын вә чини конденсаторларын јарадылмасынын әсасыны гојду. 1940-чы илләрдә елементләрин техники характеристикалары нәзәри һүдудлара чох јахынлашдығындан јени ихти-

ралар тәтбиг едилмәдән електрониканы инкишаф етдирмәк мүмкүн олмазды.

1948-чи илдә АБШ-да Д.Бардин, У.Браттејн, У.Шокли тәрәфиндән електрон лампасынын вәзифәләрини јеринә јетирән үч електродлу јарымкечиричи чиһаз - транзистор ихтира олунду. Бу чиһазларын дөврәни ачыб-бағлама хүсусијјәтләринә малик олмасы, кичик өлчүләри вә јүксәк е'тибарлығы тезликлә електрон һесаблајычы машынларын истеһсалында бир чох мүтәрәгги идејаларын тәтбигинә јол ачды. Јалныз јарымкечиричи чиһазлар әсасында мүрәккәб авиасија вә космик електрон гурғуларынын јарадылмасы мүмкүн олду. Дискрет јарымкечиричи чиһазларын јаранмасы електрониканын инкишафында үчүнчү мәрһәләни характеризә едир.

Минләрлә електрон елементләриндән ибарәт гурғу вә системләрин јарадылмасынын реаллығы електроника вә електрон сәнајесинин инкишафында јени зиддијјәтләр ортаја чыхартды. Чүнки белә гурғуларын лајиһәләндирилмәсинин чох асан олмасына бахмајараг, онларын сәһвсиз јығылмасы вә иш габилијјәтинин тә'мин олунмасы чох чәтинликләр төрәдирди. Елементләрарасы бирләшмәләр проблеминин һәлли микросхемләрин мејдана чыхмасына сәбәб олду вә бу да електрон сәнајесиндә микроелектрониканын инкишафынын әсасыны гојду. Илк интеграл схемләр 1958-чи илдә АБШ-да Д.Килби вә Р.Нојс тәрәфиндән јарадылмыш вә 1962-чи илдән башлајараг сәнаједә кениш мигјасда бурахылмаға башламышдыр.

Гејд етмәк лазымдыр ки, интеграл схемләрин тәтбигиндән әввәл гурғулар чап платалары үзәриндә јығылырды. Платада ајры-ајры кечиричи хәтләр бир јердә груп үсулу илә ејни заманда јасты текстолит вә ја шүшә-текстолит әсасын үзәриндән назик мис гатын (фолганын) кимјәви үсулла көтүрүлмәси нәтичәсиндә һазырланырды. Бу миниатүрләшдирмә проблемини там һәлл етмәсә дә бирләшмәләрин е'тибарлығыны хејли артырмаға имкан верди. Мәһз чап платаларынын инкишафы 1940-чы илләрин сонунда галынтәбәгәли, даһа сонра назиктәбәгәли һибрид интеграл схемләрин вә 1959-чу илдә исә јарымкечиричи интеграл микросхемләрин јарадылмасына кәтириб чыхарыр. «Интеграл микросхем» мәфһумунун өзү 1960-чы илләрин сонунда 1970-чи илләрин әввәлиндә мејдана кәлмишдир. Бу дөвр јарымкечиричи електроникасында јени

идејаларын вә технолокијаларын, даhа мүкәммәл чиhаз вә гурғуларын тәтбиги илә характеризә олунур. Бу мәрhәләдә интеграл електроникасынын мүрәккәбләшмә сүр'әти даhа да бөјүк олмушдур. Интеграл микросхемләр әсасында електрон гурғуларын вә системләрин јарадылмасы електрониканын инкишафынын дөрдүнчү мәрhәләсинә аиддир. Бу мәрhәләдә јаранан апаратлара микроелектрон аппаратлар дејилир.

«Микроелектроника», «микросхем», «микројығым», «микропросессор», «микро-ЕhМ», «микросхемотехника» вә «микротехнолокија» мәфhумлары өз көкләрини «микроминиатүрләшдирмә» просесиндән көтүрүлмүшдүр.

«Микро» сөзү биринчи үч мәрhәләдә hазырланан електрон чиhаз вә гурғуларына нисбәтән даhа кичик өлчүләрә малик чиhаз вә гурғуларын јарадылмасыны нәзәрдә тутур. Микросхем елементләринин сонсуз кичилдилмәси онларын функсионал имканларыны, е'тибарлығыны, иш сүр'әтини артырмаға вә сәрф етдији енержини азалтмаға имкан верир.

Микроелектрониканын бүтүн имканларындан там истифадә едилмәси үчүн онларын гурғулары вә системләринин тә'јинатыны, истисмар шәраитини, елемент базасыны вә с. нәзәрә алмагла комплекс микроминиатүрләшдирмә әсасында јаратмаг лазымдыр. Бу о демәкдир ки, гурғу вә системләрин даhа да мүрәккәбләшмәсинә бахмајараг, онларын күтләси, hәчми вә гијмәти артмамалыдыр.

Перспективдә микроелектрониканын интеграсија сәвијјәсинин даhа да артырылмасы нәзәрдә тутулур ки, бу да микросхемләр елементләринин hәндәси өлчүләрини бир чох бактерија вә молекулларын өлчүләринә јахынлашдырмаға имкан верәчәкдир. Бу ишдә функсионал електроникаја бөјүк үмид бәсләнилир. Функсионал електроника технолоҗи јох, физики интеграсија әсасында јарадылачагдыр. Физики интеграсијанын характерик хүсусијјәтләри одур ки, белә микросхемин көвдәсиндә транзистор, диод, резистор вә с. кими саhәләри ајырмаг мүмкүн дејилдир. Бу чүр функсионал хүсусијјәтләр мүхтәлиф еффектләр јарадан атом вә молекулларарасы әлагәләр hесабына реализә олунур. Белә функсионал чиhаза пјезокристал мисал ола биләр.

Сон вахтлар елм вә техниканын јени саhәси – оптоелектроника инкишаф етмәјә башламышдыр. Онун физики әса-

сыны електрик сигналларынын оптик сигналлара вә тәрсинә чеврилмәси вә шүанын мүһитләрдә јајылмасы һадисәләри тәшкил едир. Оптоелектрониканын мүсбәт хүсусијјәти ишчи тезлик-ләрин сонсуз артырылмасы вә мә'луматын паралел ишләнмәси имканларынын мөвчудлуғудур.

Игтисади вә сосиал инкишафын мүасир мәрһәләсиндә өлкә тәсәррүфатынын електронлашдырылмасы проблеми електрониканын вә микросхемотехниканын габаглајычы сүр'әтлә инкишафыны нәзәрдә тутур. Бурада әсас јери микропросессорлу интеграл микросхемләр, микро-ЕҺМ-ләр, һесаблајычы системләр вә онларын әсасында өлчмә-һесаблајычы комплексләрин, мүкәммәл идарәетмә вә тәнзим системләринин јарадылмасы тутмалыдыр. Микропросессорларын, микро-ЕҺМ-ләрин вә дикәр һесаблајычы техниканын техноложи просесләрин идарәедилмәсинә тәтбиги сәнаједә баш верән ингилабын јени мәрһәләси кими гијмәтләндирилмәлидир.

1. Електрик сигналлары вә онларын електрик дөврәләриндән кечмәси

Електрон гурғуларынын иши онларын тә'јинатындан асылы олмајараг билаваситә мә'луматын е'малы вә чеврилмәси илә әлагәдардыр.

Өјрәнилән һәр һансы просес вә ја објект һаггында бизә билик верән хәбәрләр топлусуна мә'лумат дејилир. Мә'лумат дедикдә өтүрмә, бөлүшдүрмә, чеврилмә вә ја билаваситә истифадә објекти олан хәбәрләр нәзәрдә тутулур. Ејни заманда өз вәзијјәтини заман вә мәкана көрә дәјишә билән һәр һансы бир мә'лумат мәнбәјинин олдуғу да нәзәрдә тутулур. Бу мәнбә ролуну термочүтүн електрик һәрәкәт гүввәси, сигнал лампасынын јанмасы вә с. ојнаја биләр. Мәнбәнин вәзијјәти һаггында хәбәрләр мөвчуд каналлар васитәсилә хәбәрләр гәбуледичисинә дахил олур. Беләликлә, өтүрүлән хәбәри истәнилән дәгигликлә бирмә'налы тәсвир едән вә ону е'мал едиб мәсафәјә өтүрмәјә јарарлы олан физики просесә сигнал дејилир. Сигнал гысача олараг өзүндә мә'лумат дашыјан физики просесә дејилир. Сигнала функсионал тә'јинаты нөгтәји нәзәриндән заман вә мәканда мә'луматы өтүрмә васитәси кими вә јахуд һәр һансы бир мадди мә'лумат дашыјычысы кими бахмаг олар.

1.1. Сигналларын тәснифаты вә әсас параметрләри

Сигнал мәнбәјинин, гәбуледичинин вә сигнал өтүрүлән мүһитин хүсусијјәтләриндән асылы олараг електрик, акустик вә оптик сигналлар мөвчуддур.

Електрон гурғуларында әсасән електрик сигналлары үзәриндә чеврилмәләр апарылыр. Јалныз бир груп елементләр-оптронлар мүстәсналыг тәшкил едир ки, бунларын киришиндә електрик сигналы оптик шүаланмаја, чыхышда исә әксинә чеврилир.

Сигналын үзәриндә чеврилмәләр апарылмасына бахмајараг, о дашыдығы мә'луматы сахлајыр. Бунунла бәрабәр, гејд етмәк лазымдыр ки, чеврилмәләр нәтичәсиндә иткиләр дә мүмкүндүр.

Даhа доғрусу сигнал тәhриф олуна биләр, күјләр вә әнкәлләр јарана биләр вә с.

hәр hансы хәбәрин өтүрүлмәси мәнбәнин вәзијјәтинин дәјишмәси илә әлагәдар олдуғундан сигнал бир вә ја бир нечә дәјишмәјә мә'руз галан параметрләрә мәнсуб олмалыдыр. hеч бир параметри дәјишмәјән сигнал өзүндә мә'лумат дашыја билмәз. hәр hансы чиhазын көстәричи јалныз дәјишдији заман мә'луматдашыјычы характер ала биләр. Мәсәлән, зәлзәләнин мөвчуд олдуғуну гејд едән чиhазын (сејсмографын) көстәричи диггәти јалныз фасиләдән сонра тәканларын тә'сирини hисс едәндә чәлб едир.

Сигналлары шәрти олараг статик вә динамик сигналлара бөлүрләр.

Статик сигналлар әсасән мә'луматын мүәјјән мүддәт әрзиндә өтүрүлмәси үчүн, башга сөзлә, мә'луматын сахланылыб сонрадан истифадә олунмасы үчүн ишләдилир.

Динамик сигналлар исә әсасән мә'луматын мәканда өтүрүлмәси үчүн (мәсәлән, електромагнит вә акустик далғалар) истифадә олунур.

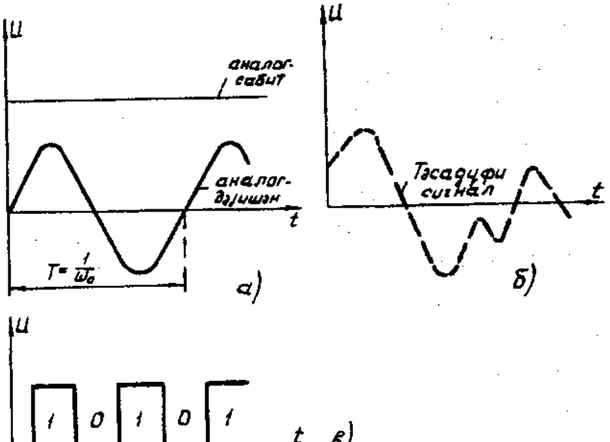
Мәнбәнин хүсусијјәтләри вә сигналын замандан асылы дәјишмәсинин характери haггында hансы илкин мә'луматын олдуғундан асылы олараг сигналлар мүәјјән едилмиш вә тәсадүфи сигналлара бөлүнүрләр.

Әкәр сигналын дәјишмәсини гәбул едилә билән дәгигликлә әввәлчәдән билмәк мүмкүндүрсә, белә сигнал мүәјјән (детерминә) едилмиш сигнал алыныр. Мәсәлән, кенератор амплитуду U_o, тезлији ω_o вә фазасы φ_o олан синусоидал кәркинлик сигналы јарадырса, онун чыхышында hәр hансы анда кәркинлијин ани гијмәти бу ифадә илә мүәјјән едилә биләр (*шәкил 1.1а*):

$$u(t)=U_o cos(\omega_o t+ \varphi_o)$$

Бу, hәмин сигналын ријази модели олуб замандан асылы мүәјјән функсијанын јазылышыдыр. Белә јазылыш сигналларын мүхтәлиф хүсусијјәтләринин вә онларын чеврилмә үсулларынын тәhлилини асанлашдырыр.

Тәсадүфи сигналларын дәјишмәсини габагҹадан мүәјјән дәгигликлә билмәк мүмкүн дејилдир, чүнки бу һалда сигнал мәнбәјинин вәзијјәти бир чох амилләрлә мүәјјән едилир (шәкил 1.1*б*). Она көрә дә һәр өлчмә серијасы өзүнүн замандан асылы функсијасы илә јазылыр. Тәсадүфи сигналлара мисал олараг електрик гида дөврәләриндә индуксија едилән сигналлары, күчләндиричиләрин күјләрини вә с. көстәрмәк олар. Там кениш мә'нада дәјишмә гануну мә'лум олмајан һәр һансы сигнал тәсадүфи һесаб едилир. Белә сигналларын јазылышы үчүн еһтимал (стохастик) нәзәријјәси ганунларындан истифадә олунур. Һәр ан үчүн бу ганунлар сигналын ајры-ајры гијмәтләринин пајланма еһтималларыны характеризә едир.



Шәкил 1.1. Сигналларын нөвләри

Сигналлар физики маһијјәтинә көрә аналог вә дискрет сигналлара бөлүнүрләр.

Аналог сигналы дедикдә ҹәрәјанын вә ја көркинлијин заманда кәсилмәјән функсијасы нәзәрдә тутулур. Аналог сигналлары сабит вә дәјишән олурлар.

Сабит аналог сигналы дедикдә бир полјарлыға малик замандан асылы јаваш дәјишән ҹәрәјан вә ја кәркинлик нәзәрдә тутулур (шәкил 1.1*а*, 1 әјриси).

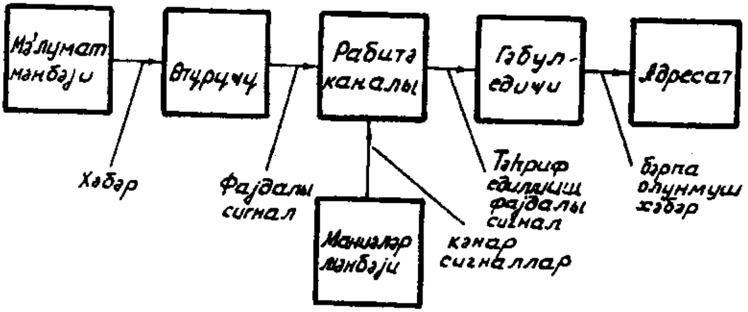
Дәјишән аналог сигналы дедикдә исә замандан асылы һәм дә ишарәси дәјишән чәрәјан вә ја кәркинлик функсијасы нәзәрдә тутулур (шәкил 1.1*a*). Буна мисал олараг хүсуси һал кими һармоник вә ја синусоидал сигналы көстәрмәк олар.

Дискрет сигналлар чәрәјанын вә ја кәркинлијин замана көрә кәсилән функсијаларындан ибарәтдир. Бу сигналлар мүәјјән мәһдуд сәвијјәләрә малик ола биләрләр. Електроникада ән чох ики сәвијјәјә - јүксәк кәркинлијә (чәрәјана) вә алчаг кәркинлијә (чәрәјана) малик олан дискрет сигналлардан истифадә олунур. Онлара импулс вә ја икилик сигналлары дејилир. Бу сигналларын гијмәтләри ики рәгәм символу («1» вә «0») илә көстәрилир (шәкил 1.1*в*).

Електрон гурғуларында сигналлар һәм кичик (мәсәлән, гурғу дахилиндә), һәм дә чох бөјүк (мәсәлән, космик фәзанын тәдгигиндә) мәсафәләрә өтүрүлә биләр. Електрик сигналларынын јајылма сүр’әтинин ишыг сүр’әтинә јахын олмасы онлардан техниканын мүхтәлиф саһәләриндә кениш истифадәсинә олунмасына зәмин јарадыр.

Һәр һансы сигнал мүәјјән мадди системлә ајрылмаз әлагәдә олур вә буна рабитә системи вә ја мә’луматы өтүрмә системи дејилир. Үмуми шәкилдә бу системи шәкил 1.2-дә олдуғу кими тәсвир етмәк олар.

Мә’лумат мәнбәји хәбәрләр формасында мә’лумат јарадыр, өтүрүчүдә бу хәбәрләр фајдалы сигналлара чеврилир. Рабитә каналында фајдалы сигналлардан башга физики тәбиәтинә көрә онлара јахын олан тәсадүфи просесләр дә өзүнү көстәрир. Бу кәнар сигналлар вә просесләр фајдалы сигналларла үст-үстә дүшәрәк онлары тәһриф едир. Она көрә дә гәбул едилән сигнал өтүрүчүдән кәлән сигналдан фәргләнир. Гәбуледичи дахил олан сигнала көрә мә’лумат мәнбәјиндән кәндәрилән хәбәри бәрпа едир. Бундан өтрү тәбиидир ки, хәбәрин сигнала чеврилмәси гајдасы әввәлдән мә’лум олмалыдыр. Бунун әсасында әкс чеврилмә һәјата кечирилир вә нәтичәдә гәбуледичи тәрәфдә мүмкүн олан хәбәрләр чохлуғундан мәһз кәндәрилән хәбәрә ујғун мә'лумат сечилиб ајрылыр.



Шәкил 1.2. Мә'луматы өтүрмә системи

Идеал һалда бу мә'лумат көндәрилән хәбәрә там ујғун олур. Лакин сигналын тәһрифи нәтичәсиндә хәбәрин бәрпасы заманы сәһвә јол верилир. Белә системдә мә'лумат ишләдичиси ролуну билаваситә инсан, јахуд техники гурғулар ојнаја биләр.

Сигналлар бир сыра параметрләрлә характеризә олунур вә үмуми һалда бу параметрләр үч әсас група бөлүнүрләр: структур, идентификасија едән вә мә'лумат дашыјан параметрләр.

Структур параметрләр сигналын сәрбәстлик дәрәчәләринин сајыны көстәрир.

Идентификасија едән параметрләр фајдалы сигналы дикәр (лазымсыз) сигналларын ичәрисиндән сечиб ајырмаг үчүндүр.

Мә'луматдашыјычы параметрләр өтүрүлән мә'луматы кодлашдырмаг үчүн истифадә олунур.

Ријази $S=Xsin\ (2\pi ft+\varphi)$ ифадәси илә тәсвир едилән сигналын мисалында мүхтәлиф типли сигналларын параметрик хүсусијјәтләрини арашдыраг. Әввәлчәдән гәбул едәк ки, мә'лумат мәнбәји *A* чохлуғундан мүмкүн хәбәрләри синусоидал рәгсләрин *X* амплитудунун мүхтәлиф гијмәтләринә чевирир. Демәли, *X* кәмијјәтинә сигналын мә'луматдашыјычы параметри кими бахмаг лазымдыр.

S сигналыны *f* тезлијинә көрә һәмин синифдән олан дикәр тезликли сигналлардан ајырырлар. Демәли, *S* сигналынын *f* параметри идентификасијаедичи параметрдир.

Бахылан сигналын мə'луматдашыјычы параметринə көрə сəрбəстлик дəрəчəлəринин сајы үмуми һалда t параметриндəн асылыдыр. Она көрə t параметри (бу һалда заман) структур параметри олур. Мə'луматдашыјычы X параметри структур параметриндəн (t-дəн) асылы олмаја да билəр. Мəсəлəн, мəнбəјин һəр һансы бир $a \in A$ хəбəринə ујғун олан амплитудун сечилмиш $x \in X$ гијмəти сигналын бүтүн давамијјəти бојунча дəјишмəз галыр. Амплитудун һəр һансы сечилмиш гијмəти илə $sin(2\pi ft+\varphi)$ һармоник топлананла əлагəдар олдуғундан өтүрүчүдə хəбəрлəрин бахылан кодлашдырма варианты $\Theta{:}A \rightarrow X$ $\Theta'{:}A \rightarrow S$ гајдасына еквивалент олур. Бурада $S=Xsin(2\pi ft+\varphi)$, башга сөзлə, мүмкүн олан хəбəр мүəјјəн амплитудлу вə сонсуз давамијјəтли һармоник сигналла мүгајисə олунур. Белəликлə, бахылан вариантда S сигналы мə'луматдашыјычы X параметринə көрə чəми бир сəрбəстлик дəрəчəсинə маликдир.

Əкəр јухарыдакы ифадəдə амплитуд (X) f параметриндəн асылы оларса, онда мүмкүн олан хəбəрлəри сигналын ајры-ајры анлардакы гијмəтлəри илə мүгајисə етмəк олар. Мəсəлəн, тутаг ки, мүмкүн олан хəбəрлəр T заман интервалында $S(t)=X(t)sin(2\pi ft+\varphi)$ сигналынын мə'луматдашыјычы параметри X(t)-нин бири-бириндəн t интервалында јерлəшəн t_1, t_2......,t_n анларындакы гијмəтлəри илə мүгајисə едилир. Бу заман $S(t)$ сигналы T заман интервалында сигналын сəрбəстлик дəрəчəсинə бəрабəр олан $n=T/\Delta t$ компонентə малик олачагдыр. Гејд етмəк лазымдыр ки, бу мисалда t параметри гијмəтлəрин сајыла билəн чохлуғуну ала билəрсə, $S(t)$ сигналы принсип е'тибарилə сонсуз сајлы сəрбəстлик дəрəчəсинə малик ола билəр.

Мə'луматдашыјычы параметр кими мүхтəлиф параметрлəр истифадə олуна билəр. Јухарыдакы ифадəдə мə'луматдашыјычы параметр кими X,f,φ параметрлəри истифадə олуна билəр, бу һалда тезлик f ејни заманда һəм мə'луматдашыјычы, һəм дə идентификасијаедичи параметр ола билəр.

Мə'луматдашыјычы параметрлəринə көрə дə сигналлар дискрет вə арасыкəсилмəз олурлар. Əкəр мə'луматдашыјычы

параметрин мүмкүн олан гијмәтләр чохлуғу сајыландырса вә мүәјјән һүдуда маликдирсә, сигнал бу параметрә көрә дискрет адланыр. Әкәр сигналын мә'луматдашыјычы параметри арасыкәсилмәз чохлуғу гәбул едәрсә, сигнал бу параметрә көрә арасыкәсилмәз адланыр. Әкәр мә'луматдашыјычы параметр бир дејил, бир нечә оларса, сигнал бир параметрә көрә дискрет вә дикәринә көрә арасыкәсилмәз ола биләр.

Гејд етмәк лазымдыр ки, сигналларын јазылышы үчүн чүрбәчүр ријази моделләрдән истифадә олунур. Лакин сигналын өтүрүлмәси просеси һеч дә дәјишилмир: өтүрмәдә хәбәр сигналын вәзијјәтинә чеврилир: сигнал рабитә каналында әнкәлләрин тә'сириндән тәһриф олунур вә онун вәзијјәти габагчадан мүәјјән едилә билмәјәчәк дәрәчәдә дәјишир: гәбуледичидә сигналын дәјишмиш вәзијјәтинә көрә өтүрүлән хәбәр һаггында гәрар гәбул едилир. Ајдындыр ки, сигналын мүхтәлиф хәбәрләри кодлашдыран вәзијјәтләри арасында фәрг нә гәдәр чох оларса, бәрпа заманы сәһвләрин јаранма еһтималы бир о гәдәр азалар. Демәли, ријази моделин көмәјилә сигналын әнкәлләрә дајаныглығыны тәдгиг етмәк үчүн моделдә сигналын мүмкүн вәзијјәтләри арасындакы фәргләрин дәрәчәси мүәјјән едилмәлидир. Буна имкан верән үсуллардан бири сигналын мүмкүн вәзијјәтләринин һәр һансы абстракт фәзада нөгтәләр шәклиндә көстәрилмәсидир. Бу фәзада һәр һансы ики нөгтә арасындакы мәсафә бу вә ја дикәр үсулла тә'јин едилир (метрик фәза). Белә фәзаларда сигналын мүмкүн вәзијјәтләри арасындакы фәргин дәрәчәси бу вәзијјәтләрә ујғун кәлән нөгтәләр арасындакы мәсафә илә ифадә олунур.

Моделдә сигналы замана көрә тәсвир етмәклә онун параметрләрини, енержисини, күчүнү, давамијјәтини вә с. тә'јин етмәк олар. Ријази јазылышларын башга-башга формалары сигналын дикәр параметрләрини даһа јахшы тәсвир едир. Чох һалларда сигналын тезлик хүсусијјәтләринин тәдгигинә хүсуси әһәмијјәт верилир. Бунун үчүн тезлик областында сигнал спектр шәклиндә тәсвир едилир. Бу спектр ријази Фурје чеврилмәси әсасында алыныр. Сигналын тезлик хүсусијјәтләринин мүәјјән едилмәси онун характеристикаларынын идентификасија

едилмәси (өн чох мә'луматдашыјычы параметрләринин тә'јин едилмәси), сүзүлмәси (әнкәлләр фонунда фајдалы сигналын сечилиб ајрылмасы) вә арасыкәсилмәз сигналын дискретләшдирмә тезлијинин сечилмәси мәсәләләринин һәллинә имкан верир. Сигналын вачиб параметрләриндән бири онун тезлик спектринин енидир. Чүнки мәһз бу параметр сигналын мә'луматы е'мал едән вә өтүрән гурғуларла узлашмасында әсас көтүрүлүр.

Сигналын замандан асылы олараг мә'лум функсија (јә'ни мүәјјән едилмиш) шәклиндә јазылдығыны гәбул едәрәк тезлик спектләринин алынмасыны вә тәһлилинин хүсусијјәтләрини арашдыраг.

Тутаг ки, тәдгиг едилән сигнал дөври замандан асылы $x(t)$ функсијасы илә ифадә олунур вә бу функсија Дирихле шәртләрини өдәјир. Башга сөзлә, функсија онун дәјишмә периоду T һәддиндә парчаланмыш-арамсыз вә парчаланмыш монотондур вә кәсилмә нөгтәләриндә мәһдуд гијмәтләр алыр. Бу һалда функсијаны Фурје сырасы шәклиндә тәсвир етмәк олар:

$$x(t) = a_o + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \text{к}\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} \text{в}_k \sin k\omega t \qquad (1.1)$$

Бу ифадәнин әмсаллары беләә тә'јин олунур:

$$в_k = \frac{2}{T}\int_o^T x(t)\sin\ k\omega\ ,tdt \qquad (\text{к} = 1,2,3...)$$

$$a_o = \frac{1}{T}\int_o^T x(t)dt;\ a_k = \frac{2}{T}\int_o^T x(t)\cos \kappa\omega tdt; \qquad (1.2)$$

Сигналын беләә тәсвир олунмасы физики чәһәтдән сабит топлананын (a_o), $\omega_1 = 2\pi/T$ тезликли биринчи һармониканын вә $2\omega_1$ вә $3\omega_1$. вә с. тезликли јүксәк һармоникаларын ајрылмасы һалына ујғун кәлир. Фурје сырасынын a_k *вә* $в_k$ $(к=1,2,3...)$ әмсалларынын гијмәтләри бу һалда сигналын тезлик спектрини тәшкил едирләр.

Фурје сырасынын дикәр јазылышы да мөвчуддур:

$$x(t) = d_o + \sum_{k=1}^{\infty} d_k \cos(k\omega_1 t + \theta_k)$$

Бурада сабит топланана d_o, амплитуда d_k вә сигналын k-чы һармоникасынын фазасы Θ_k белә тә'јин едилир:

$$d_o = a_o; d_k = \sqrt{ak^2 + B_k^2}; \theta_k = \operatorname{arctg}(-b_k / a_k)$$

d_k-нын вә Θ_k-нын $(k=1,2,3,...)$ гијмәтләринин топлусуна адәтән амплитуд вә фаза тезлик спектрләри (амплитуд спектри вә фаза спектри) дејилир. D_k-нын вә Θ_k-нын сигналын һәр һармоникасы үчүн көстәрилән гијмәтләринин тапылмасы үчүн јеринә јетирилән әмәлијјатлар ардычыллығы исә сигналын һармоник тәһлили адланыр.

Периодик сигналын јүк мүгавимәти ваһид олдуғу һалда орта күчү белә һесабланыр:

$$P_{op} = \frac{1}{T}\int_o^T x^2(t)dt = d_o^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty} dk^2$$

Көрүндүјү кими сигналын орта күчү онун амплитуд спектри илә мүәјјән едилир вә фаза спектриндән асылы дејилдир.

(1.2) ифадәсиндә $T \to \infty$ гәбул едәрәк ујғун периодик сигналын спектриндән гејри-периодик сигналын тезлик спектрини алмаг олар. Бу һалда ики гоншу һармоника арасындакы тезликләр фәрги $(\omega_1 = 2\pi/T)$ сыфра јахынлашыр, башга сөзлә, тезлик спектри дискрет (хәттивари) һалдан арамсыз (бүтөв) һала кечир. Әкәр тәдгиг олунан сигналын функсијасы $x(t)$ сонлу интервалда Дирихле шәртләрини ($\int_{-\infty}^{+\infty} / x(t) / dt \quad \infty$) өдәјирсә вә сонсуз аралыгда $(\infty; +\infty)$ интеграллана биләрсә, онда бу функсијанын тезлик спектри Фурје интегралы илә тә'јин едилир:

$$X(j\omega) = \int_{\infty}^{=\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Б Д У-нун
Елми
китабханасы

Бу чеврилмәнин физики мә'насыны ајдынлашдырмаг үчүн Фурје чеврилмәсинин әкс ифадәсинә бахаг. Бу ифадә $X(j\omega)$ тәсвириндән әкс истигамәтдә орижинала – $X(t)$ заман функсијасына кечмәјә имкан верир:

$$x(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}X(j\omega)e^{j\omega t}d\omega=\lim_{d\omega\to 0}\sum_{\omega=-\infty}^{\infty}\left[\frac{1}{2\pi}X(j\omega)d\omega\right]e^{j\omega t}$$

Көрүнүр ки, Фурје интегралы гејри-периодик $x(t)$ функсија-сыны сонсуз сајда сонсуз кичик амплитудлу

$$\Delta A(j\omega)=\frac{1}{2\pi}X(j\omega)\Delta\omega$$

вә -∞-дан +∞-а кими диапазону әһатә едән тезликли һармоникаларын чәми шәклиндә тәсвир етмәјә имкан верир. Беләликлә, $X(j\omega)$ спектрин ајра-ајры саһәләринә көрә һармоник топлананларын пајланма сыхлығыны характеризә едир вә ону чох вахт сигналын спектрал сыхлығы адландырырлар. Алынан $X(j\omega)=X(\omega)e^{j\theta(\omega)}$ ифадәсиндә $X(\omega)=|X(j\omega)|$ -сигналын амплитуд тезлик спектри, $\theta(\omega)=arg tg X(j\omega)$ исә фаза-тезлик спектридир. $x(t)$ сигналын енержисини тә'јин едәркән Парсевал бәрабәрлијиндән истифадә олунур:

$$W=\int_{-\infty}^{+\infty}x^2(t)dt=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}x^2(\omega)d\omega$$

Бәрабәрлијин сол тәрәфиндәки ифадә заман областында сигналын там енержисини, сағ тәрәфиндәки исә амплитуд тезлик спектринин пајланмасы нәзәрә алынмагла тезлик областында һесабланмыш там енержисини көстәрир.

Инди исә електрон гурғуларынын иши илә әлагәдар олан ән кениш јајылмыш сигнал нөвләринин характеристикаларыны тәфсилаты илә өјрәнәк.

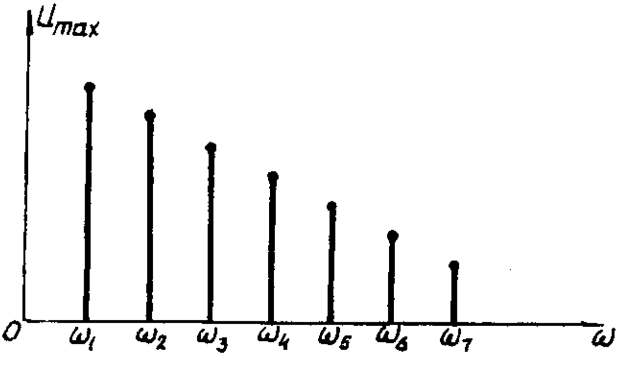
1.2. Дәјишән сигналларын әсас характеристикалары

Замандан асылы $u(t)$ функсијалы дәјишән сигнал Фурје сырасы шәклиндә belә јазылыр:

$u(t)=U_o+U_{1max}cos(\omega_o t-\varphi_1)+U_{2max}cos(2\omega_o t-\varphi_2)+U_{3max}cos(3\omega_o t-\varphi_3)+...$ бурада $\omega_o=2\pi f_o$; φ_1, φ_2, φ_3, - ајры-ајры һармоникаларын илкин фазасы, U_{1max}, U_{2max}, U_{3max}-онларын амплитудлардыр. Галан кәмијјәтләрин тә'јини јухарыда көстәрилмишдир.

Гејд едилдији кими, Фурје сырасынын мә'насы одур ки, функсија әсас тезликдән 1,2,3... вә дәфә чох тезлијә малик, илкин фазалы вә мүәјјән амплитудлара малик синусиодал рәгсләрин чәми кими тәсвир едилә биләр. Бу чәмин һәр топлананына һармоника, әсас тезликли (ω_1) рәгсләрә 1-чи һармоника, ω_2 тезликли рәгсләрә 2-чи һармоника вә с. дејилир.

U_{kmax}кәмијјәтләр топлусуна амплитуд спектри, φ_k кәмијјәтләр топлусуна фаза спектри дејилир. Чох вахт амплитуд спектри бөјүк мараг кәсб едир вә ону гысача олараг спектр адландырырлар (шәкил 1.3). Шагули парчаларын узунлуғу мүвафиг амплитудлара ујғун кәлир, онлара спектрал хәтләр дејилир.



Шәкил 1.3. Спектрин тәсвири

Јухарыдакы ифадәдән көрүнүр ки, чәм сонсуз сырадан ибарәтдир - спектр сонсуздур. Бучаг сүр'әтинин (ω) артмасы илә һармоникаларын амплитудлары азалдығындан јүксәк тезликли рәгсләри нәзәрә алмырлар вә сигналын спектрини мәһдудлашдырырлар. Мәһдудлашмыш спектрин јерләшдији тезлик интервалына спектрин ени дејилир. Спектрин мәһдудлашды-

рылмасы елә апарылыр ки, сигналын тәһрифи верилмиш һәддә олсун, башга сөзлә, сигналда олан мә'лумат итирилмәсин. Бахылан сигнал кәркинлијин орта, орта дүзләндирилмиш, еффектив вә амплитуд гијмәтләри илә характеризә олунур:

$$U_{op} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} u(t)dt .$$

Кәркинлијин орта гијмәти јухарыдакы ифадәдә U_o гијмәтинә ујғун кәлир вә сигналда сабит топлананын олдуғуну көстәрир.

Кәркинлијин орта дүзләндирилмиш гијмәти

$$U_{ор.дүз} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} a(t)dt .$$

сигналын һәм амплитуд, һәм дә фаза спектри илә мүәјјән едилир вә мүхтәлиф дүзләндиричи гурғуларын ишини характеризә едир.

Әкәр сигналда сабит мүрәккәбә јохдурса, онда орта дүзләндирилмиш кәркинлијин мүсбәт вә мәнфи јарымдалғалары бәрабәр олур.

Еффектив (тә'сиредичи) гијмәт кәркинлијин орта квадратик гијмәтидир:

$$U_{еф} = \sqrt{\frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} u^2(t)dt}$$

Бу кәркинлик јалныз сигналын амплитуд спектри илә мүәјјән едилир вә фаза спектриндән асылы олмур. О, електрик просесинин күчүнү характеризә едир вә истилик тә'납ринә көрә сабит сигналлара еквивалентдир.

Мүсбәт вә мәнфи јарымдалғаларын еффектив гијмәтләри үмуми һалда бәрабәр олмаја да биләрләр вә бири бири илә ашағыдакы асылылыгла бағлыдырлар:

$$U_{еф}^2 = (U_{еф}^+)^2 + (U_{еф}^-)^2$$

Кәркинлијин амплитуд (пик) гијмәти $U_{max}=max\ u(t)$ һәм амплитуд, һәм дә фаза спектриндән асылыдыр. О, һәм мүсбәт U^{+}_{max}, һәм дә мәнфи U^{-}_{max} јарымпериодлар үчүн тә'јин едилә биләр. Бунлар да үмуми һалда бир-биринә бәрабәр ола биләрләр.

Сигналын синусиодал формадан фәргләнмәси һармоникалар әмсалы K_h вә ја гејри-хәтти тәһрифләр әмсалы илә гијмәтләндирилир:

$$K_h = \frac{1}{U_1}\sqrt{\sum_{k=1}^{n} U_k^2}\ ;\ K_T = \frac{1}{U_{еф}}\sqrt{\sum_{k=2}^{n} U_k^2}$$

U_1 вә $U_к$ ујғун олараг 1-чи вә *к*-чы һармоникаларын еффектив кәркинликләридир.

Бу ики кәмијјәт бир-бири илә белә әлагәдардыр:

$$K_T = \frac{K_h}{\sqrt{1+K_h^2}} \approx K_h\left(1-\frac{1}{2}K_h^2\right)$$

Дәјишән сигналын *u(t)* еффектив гијмәтини һәм дә 1-чи һармониканын еффектив гијмәти вә һармоника әмсалы васитәсилә ифадә етмәк олар:

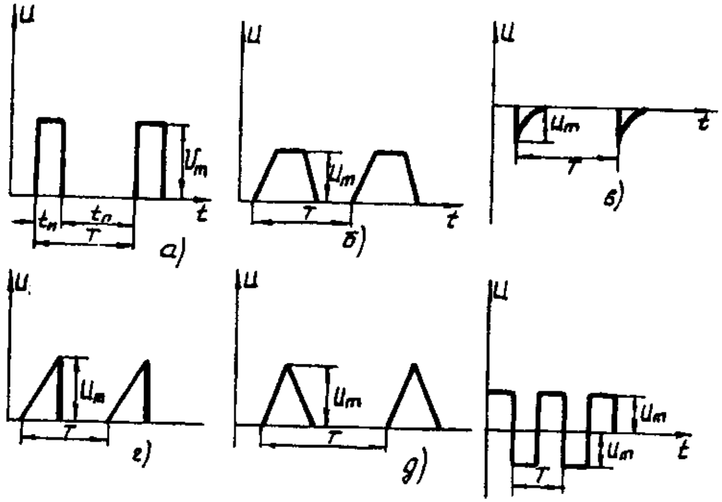
$$U_{еф} = U_1\sqrt{1+K_h^2} \approx U_1\left(1+\frac{1}{2}K_h^2\right)$$

1.3. Импулс шәкилли сигналларын әсас характеристикалары

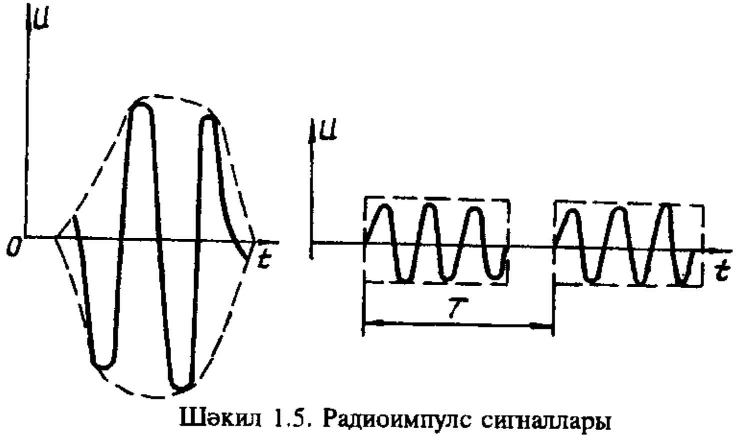
Ҹәрәјанын вә ја кәркинлијин схемдәки кечид просесләринин давамијјәтиндән кичик вә ја онунла мүгајисә едиләҹәк гәдәр бир вахт әрзиндә һәр һансы сабит сәвијјәдән (хүсуси һалда сыфырдан) бу вә ја дикәр тәрәфә дәјишмәсинә импулс дејилир.

Импулсларын мүхтәлиф нөвләри вар (шәкил 1.4.): дүзбуҹаглы (*а*), трапесија (*б*), експоненсиал (ити учлу) (*в*), мишарвари (*г*), үчбуҹаглы (*д*), ики тәрәфли (ики полјарлыглы) (*е*). Импулс сигналлары мүсбәт (*а,б,г,д*) вә мәнфи (*в*) олурлар. Бу ҹүр импулс

сигналларындан телевизијада кениш истифадә олундуғу үчүн онлара видеоимпулслар да дејилир.



Шәкил 1.4. Видеоимпулс сигналлары



Шәкил 1.5. Радиоимпулс сигналлары

Импулс сигналларынын дикәр нөвү радиоимпулслардыр (шәкил 1.5). Бу ики нөв импулсу әлагәләндирән одур ки,

радиоимпулслары әhатә едән пунктирлә чәкилмиш әјриләр видеоимпулсу тәсвир едир.

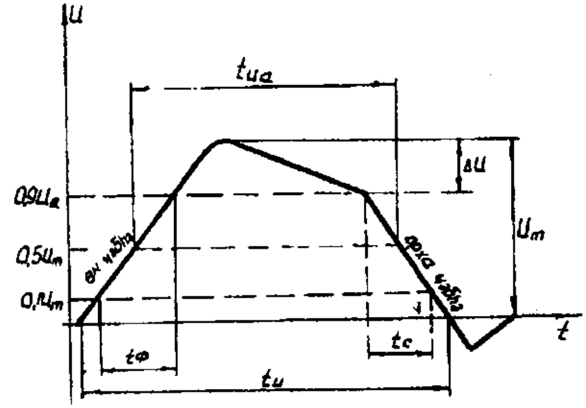
Гејд етмәк лазымдыр ки, көстәрилән импулслар идеал формаја маликдирләр. Һәгигәтдә исә реал импулслар өз адларына там ујғун формаја малик олмурлар. Реал дүзбучаглы импулс шәкил 1.6-да көстәрилмишдир.

Амплитудун јарысы *(0.5Um)* сәвијјәсиндә тә'јин едилән заман интервалы импулсун актив давамијјәти $t_{иа}$ адланыр. Һәрдән ону *0,1 Um* сәвијјәсиндә дә тә'јин едирләр.

Кәркинлик вә ја чәрәјан импулсунун ән бөјүк гијмәтинә амплитуд дејилир *(U_m)*.

Импулс өн чәбһә вә арха чәбһә анлајышлары илә дә характеризә едилир. Өн чәбһә импулсун артмасы, арха чәбһә исә азалмасы просесләринин давамијјәтләри илә мүәјјән едилир.

Чох вахт импулсун $0,1U_m$ сәвијјәсиндән 0,9 U_m сәвијјәсинәдәк артмасынын давамијјәти илә мүәјјән едилән актив давамијјәт $t_ф$ анлајышындан истифадә едилир. Аналожи олараг $0,9\ U_m$ сәвијјәсиндән 0,1 *Um* сәвијјәсинәдәк азалма мүддәти импулсун азалма давамијјәти t_c адланыр. $t_ф$ вә t_c $t_и$-нин бир нечә фаизини тәшкил едирләр.



Шәкил 1.6. Реал дүзбучаглы импулс

Онлар $t_и$– јә нисбәтән нә гәдәр кичик оларса, импулс сигналы бир о гәдәр дүзбучаглы формаја јахын олар. Һәрдән $t_ф$ вә t_c-ин әвәзинә импулсун чәбһәләри артма (азалма) сүр'әтләри илә характеризә олунур. Бу анлајыша өн (арха) чәбһәнин диклији дејилир. Дүзбучаглы импулс үчүн диклик тәхминән беләтә'јин олунур:

$$S = U_m / t_ф.$$

Импулсун ҹәбһәләр арасындакы саһәсинә јасты тәпә дејилир. ΔU јасты тәпәнин сәвијјәсинин ашағы дүшмәсини көстәрир.

Импулс енержисинин онун давамијјәтинә нисбәтинә импулсун күчү дејилир:

$$P_и = W / t_и.$$

Ејни ишарәли ики гоншу импулсун башланғычлары арасындакы вахт тәкраролунма периоду (Т) адланыр. Онун әкс гијмәтини импулсун тәкраролунма тезлији адландырырлар.

$$f = \frac{1}{T}$$

Импулс периодунун бир һиссәсини фасилә тәшкил едир. Фасилә (шәкил 1.4*а*) бир импулсун сону илә ондан сонра кәлән импулсун башланғычына гәдәр олан вахтдыр: $t_и = T - t_и$.

Импулс давамијјәтинин тәкраролунма периодуна олан нисбәтинә долма әмсалы дејилир: $\gamma = t_и / T$. Бу өлчүсүз, ваһиддән кичик әмсалдыр.

Долма әмсалынын әкс гијмәтинә бәрабәр олан кәмијјәтә импулсун сыхлығы дејилир: $q = 1/\gamma = T/t_и$.

Импулсун енержисинин периода нисбәтинә импулсун орта күчү дејилир: $P_{ор} = W/T$

Импулс күчү илә орта күчү мүгајисә етсәк көрәрик ки, онлар бир-бириндән q дәфә фәргләнирләр:

$$P_и t_и = P_{ор} T,\ P_и = P_{ор} T/t_и = P_{ор}\, q \text{ вә } P_{ор} = P_и t_и / T = P_и / q\ .$$

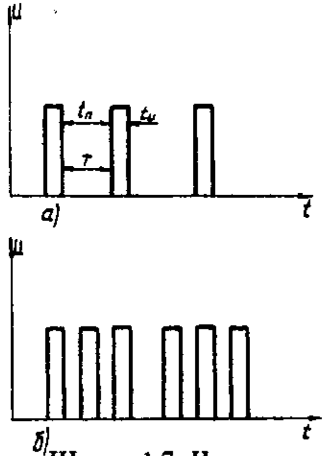
Бурадан белә нәтиҹә чыхыр ки, кенераторун импулсда тә'мин етдији күч кенераторун орта күчүндән q дәфә чох ола биләр.

Практикада чох вахт импулс ардычыллыглары үзәриндә мүхтәлиф чеврилмәләр апарылыр. Импулслар ардычыллығы (шәкил 1.7а) тезлик, период, сыхлыг долма әмсалы вә с. илә характеризә олунур. Әлавә олараг кәркинлијин (ҹәрәјанын) период әрзиндә орта вә тә'сиредиҹи гијмәти $U_{т.е}$ мүгајисә үчүн истифадә олунур:

$$U_{op} = \frac{1}{T}\int_0^{t_u} u(t)dt \; ; \; U_{m.e} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{t_u} u^2(t)dt}$$

Импулслар ардычыллығы үчүн $U_{op}=U_{max}/q$; $U_{m.e}=U_{max}/\sqrt{q}$, даһа доғрусу кәркинлијин тә'сиредичи гијмәти орта гијмәтдән $\sqrt{q}$ гәдәр бөјүкдүр.

Рәгәм техникасында импулслар јығымы ардычыллығы да кениш истифадә олунур (шәкил. 1.7*б*). Јығымларын һәр бири бир нечә импулсдан ибарәт олур. Бурада бир јығымын дахилиндәки импулслар арасындакы фасилә бә'зән дәјишән олур. Бу параметр јығымлардан тәшкил олунмуш импулс сигналынын мүһүм параметридир.



Шәкил 1.7. Импулслар ардычыллығы (*а*) в импулслар јығымы ардычыллығы (*б*)

Импулслар вә импулслар ардычыллығы заман характеристикаларындан башга спектрал характеристикаларла да характеризә олунурлар.

Мәсәлән дүзбучаглы импулс орта топланан $(U_{op}=U_{max}\ t_u/T)$ вә һармоник топлананларын чәми

$$U_{k\,max} = \frac{2\,U_{max}}{\pi k}\sin(0{,}5\,K\,\omega_0\,t_u)$$

кими тәсвир олуна биләр (*к* - һармониканын нөмрәсидир).

Импулс сигналынын спектрин ајры-ајры топлананлары бир-бириндән тәкраролунма тезлији f_o гәдәр фәргләнир. Башга сөзлә, спектрдә јалныз f_o, $2f_o$, $3f_o$ вә с. тезликләри олур. Һармоникаларын амплитудлары импулсларын амплитудлары илә мүтәнасибдир. Анчаг синусун аргументинин $m\pi$-јә бәрабәр (m-там әдәддир) олдуғу тезликләрдә $f_o=1/t_u$, $2/t_u$, $3/t_u$ вә с. онлар сыфыра чеврилир.

Спектрин ајры-ајры топлананлары дүзбучаглы импулсун ајры-ајры саһәләринин формалашмасыны мүәјјән едир. Мәсә-

лән, спектрин јүксәк тезликли һиссәси әсасән өн чәбһәнин, алчаг тезликли һиссәси исә тәпәнин формалашмасына сәрф олунур.

1.4. Електрик дөврәләринин әсас характеристикалары

Електрик дөврәләри, електрон гурғуларынын ајрылмаз һиссәләридир. Онлар гурғуларын структурларындан вә тә'јинатындан асылы олараг мүхтәлиф функсијалары јеринә јетирирләр: гурғуларын каскадлары арасында әлагә јарадыр, актив елементләрин иш режимини тә'мин едир, електрик сигналлары үзәриндә давамијјәтә, амплитуда вә фазаја (дәјишән сигналлар үчүн) көрә чүрбәчүр чеврилмәләр апарырлар.

Бу дөврәләри електрон гурғуларындан фәргләндирән одур ки, онлар киришә дахил олан сигналлары күчләндирмирләр, пассив хәтти елементләрдән тәртиб олунурлар вә онларын волт-ампер характеристикалары (чәрәјанла кәркинлијин асылылығы) Ом ганунуна ујғун кәлир. Она көрә дә бу дөврәләри електрик сигналларыны чевирән вә формалашдыран хәтти гурғулар адландырырлар.

Практикада белә хәтти гурғуларын тәркибиндә гејри-хәтти елементләр дә мөвчуд олур, анчаг онларын хүсусијјәтләри гурғуларын ишинин әсасыны тәшкил етмәдијиндән вә бир нөв әсас просеси тәһриф едән амилләр кими өзүнү көстәрдијиндән онларын ролуна мүһүм әһәмијјәт верилмир.

Јеринә јетирдији вәзифәләрә көрә хәтти гурғулары ашағыдакы нөвләрә бөлмәк олар:

1. Сигналларын давамијјәтини кенишләндирән интеграллајычы дөврәләр;

2. Импулсларын давамијјәтини гысалдан вә сигналлары диференсиаллајан диференсиаллајычы дөврәләр;

3. Сигналларын амплитудуну дәјишән резисторлу вә резисторлу-тутумлу бөлүчүләр;

4. Импулсларын полјарлығыны вә амплитудуну дәјишдирән, импулс дөврәләрини бир-бириндән ајыран, импулс кенераторларында вә формалашдырычыларында мүсбәт әкс әлагә ја-

радан, дөврәләри јүкә көрә узлашдыран, бир нечә чыхышындан импулслар алынан импулс трансформаторлары;

5. Формача мүрәккәб електрик сигналларындан верилмиш тезлик областында јерләшән топлананлары сечиб ајыран вә дикәр тезлик областында јерләшән топлананларын габағыны кәсән електрик сүзкәчләри;

6. Формасы дүзбучаглыја охшар, давамијјәти чох сабит олан импулслар јарадан хәтти формалашдырычы дөврәләр.

Хәтти гурғулар һансы елементләрдән тәшкил олунмагларындан асылы олараг RC, RL вә RLC дөврәләринә бөлүнүрләр.

Електрик дөврәләринин киришә верилән сигналлар үзәриндә чеврилмәләр апардығыны нәзәрә алараг үмуми һалда онларын ријази моделини киришә верилән сигналын (тә'сирин) чыхышда алынан сигналла (реаксијаја илә) әлагәси кими тәсвир етмәк олар:

$$u_{чых}(t)=T\cdot u_{кир}(t),$$

бурада T - дөврәнин операторудур.

Операторун әсас хүсусијјәтләринин рәһбәр тутараг онун вачиб хүсусијјәтләри һаггында ашағыдакы мүлаһизәләри етмәк олар:

1. Әкәр $T[u_{кир1}(t)+u_{кир2}(t)+...+u_{кирN}(t)]=Tu_{кир1}(t)+...+Tu_{кирN}(t)$ нисбәти ендирсә онда дөврәјә хәтти дөврә дејилир. Көрүндүјү кими дөврәнин хәттилији чыхыша верилән ајры-ајры сигналларын тә'сиринин бир-бириндән асылы олмасы илә ифадә олунур.

2. Әкәр кириш сигналынын сүрүшмәси чыхыш сигналынын да о чүр сүрүшмәсинә кәтириб чыхарарса $(u_{чых}(t\pm t_o)=Tu_{кир}(t\pm t))$, онда дөврә стасионар дөврә адланыр. Көрүндүјү кими стасионар дөврә кириш сигналынын кәлмә мүддәтинә көрә дәјишмәз (инвариант) олур. Тәркибиндә параметрләри замандан асылы елементләр (индуктив сарғач, конденсатор вә с.) олан дөврәләр стасионарлыг хүсусијјәтләринә малик олмурлар.

Тутаг ки, хәтти стасионар дөврәнин киришинә $u_{кир}(t)$ сигналы верилмишдир. Дөврәнин бу сигнала көстәрдији реак-

сиjаны өjрәнмәк үчүн делта функсиjа анлаjышы дахил едәк. Делта функсиjа ваһид саһәли, сонсуз кичик давамиjjәтли импулсун jазылышыдыр.Бу функсиjа $(\delta(t))$ $t\neq0$ гиjмәтиндә сыфра, $t=0$ гиjмәтиндә исә сонсузлуға чеврилир, она көрә $\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)dt=1$

Буна мисал амплитуду давамиjjәт илә тәрс мүтәнасиб ($1/t_{и}$) олан дүзбучаглы импулс ола биләр. $t_{и}\to0$ оланда импулсун амплитуду сонсуз артыр, лакин саһәси сабит галыб ваһидә бәрабәр олур.

Делта функсиjанын сигналы сүзмә хүсусиjjәти белә ифадә олунур:

$$\int_{-\infty}^{\infty} u(t)\,\delta(t-t_o)dt = u(t_o)$$

Башга сөзлә, ихтиjари функсиjанын $\delta(t-t_o)$-а һасилинин интегралы бу функсиjанын $t=t_o$ нөгтәсиндәки гиjмәтинә бәрабәрдир.

Буна уjғун олараг, хәтти стасионар дөврәнин киришинә верилән сигнал үчүн jаза биләрик:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{кир}(\tau)\delta(t-\tau)dt$$

Интеграл чәмин һүдуд гиjмәтини көстәрдиjиндән кириш сигналына бир-бириндән τ гәдәр сүрүшдүрүлмүш вә амплитудлары һәмин τ анларында сигналын уjғун гиjмәтләринә бәрабәр олан делта-импулсларын сонсуз ардычыллығы кими бахмаг олар. Әкәр дөврәнин делта импулсун тә'сиринә көстәрдиjи реаксиjаны мүәjjән етмәк мүмкүндүрсә онда дөврәнин хәтти вә стасионар олмасы әсасында аjры-аjры реаксиjалары топламаг јолу илә киришә верилән һәр һансы тә'сиредичи сигналын чыхышда чавабыны алмаг олар.

Дөврәнин киришә верилән делта импулсун тә'сиринә чыхышдакы чавабына $h(t)$ онун импулс (вә jа кечид) характеристикасы деjилир.

Киришә тә'сир көстәрән ихтиjари сигнала чыхыш реаксиjасы ашағыдакы интегралла ифадә олунур:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{кир}(t)h(t-\tau)d\tau$$

вə ја

$$u_{чых}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{кир}(t-\tau)h(\tau)d\tau$$

Кириш сигналынын Фурје интегралыны јазаг:

$$u_{кир}(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S_{кир}(\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

$t=t'-\tau$ илə əвəз етсəк вə штрихи атсаг аларыг.

$$u_{кир}(t-\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S_{кир}(\omega)e^{j\omega(t-\tau)}d\omega$$

Буну $u_{чых}(t)$-нин ахырынчы ифадəсиндə јеринə јазыб вə интеграллама гајдасыны дəјишсəк

$$u_{кир}(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\left(\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{j\omega(t-\tau)}d\omega\right)h(\tau)d\tau =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)\left(\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)e^{j\omega t}d\tau\right)e^{j\omega t}d\omega$$

алынар.

Мө'тəризəдəки интеграл тезлијин комплекс функсијасы олдуғундан $\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau = \dot{K}(j\omega)$ ишарə едəк.

Көрүнүр ки, $\dot{K}(j\omega)$ дөврəнин импулс функсијасы үчүн дүзүнə Фурје чеврилмəсиндəн ибарəтдир. Импулс функсијасынын дүзүнə Фурје чеврилмəсинə дөврəнин тезлик өтүрмə əмсалы вə ја комплекс тезлик характеристикасы дејилир.

Ахырынчы ифадəни ондан əввəлкиндə нəзəрə алсаг ала-

$$u_{чых}(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{кир}(\omega)\dot{K}(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

рыг.

Алынан ифадə чыхыш сигналы үчүн əкс Фурје чевирмəсинə ујғун кəлир. Она көрə дə

$$\dot{S}_{кир}(\omega)\dot{K}(j\omega) = \dot{S}_{чых}(\omega),$$

башга сөзлә, тезлик өтүрмә әмсалы кириш вә чыхыш сигналларынын спектрал сыхлыглары арасында мүтәнасиблик әмсалыдыр.

Тезлик өтүрмә әмсалы адәтән үстлү формада јазылыр:

$$\dot{K}(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi_k(\omega)}$$

Бурада $K(\omega) = |K(j\omega)|$ - дөврәнин амплитуд-тезлик характеристикасы, $\varphi_к(\omega)$ - фаза-тезлик характеристикасыдыр.

1.5. Сигналларын електрик дөврәләри васитәсилә чеврилмәси вә өтүрүлмәси просесләри

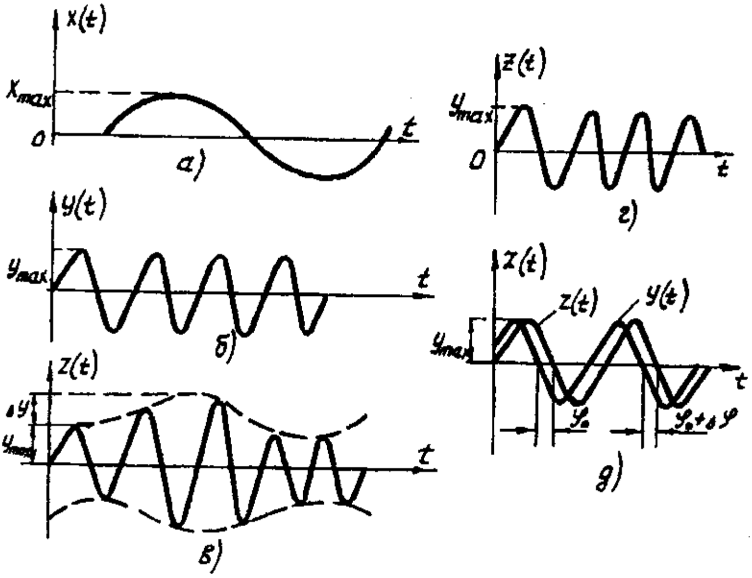
Дејилдији кими, мә'луматын електрик сигналлары васитәсилә өтүрүлмәси сигналларын електрик параметрләринин, формаларынын дәјишилмәси вә ја бу сигналларын елементләринин гаршылыглы шәрти јерләшдирилмәси јолу илә һәјата кечирилир.

Мә'луматы сигналларын физики параметрләрини дәјишмәклә өтүрәркән мә'луматдашыјычы параметр кими һармоник сигналын амплитуду, тезлији вә ја фазасы, импулсун (фасиләнин) амплитуду, полјарлығы вә давамијјәти, тезлик вә полјарлашма мүстәвиси ола биләр. Буна ујғун олараг, ашағыдакы мә'луматдашыјычы әламәтләр мөвчуддур: амплитуд, полјарлыг, заман, тезлик вә фаза әламәтләри.

Өтүрүлән мә'лумата ујғун олараг електрик сигналынын бир вә ја бир нечә физики параметринин дәјишдирилмәси просесинә модулјасија дејилир.

Модулјасија нәтичәсиндә сигнал бир нөвдән дикәринә чеврилир. Бу заман модулјасија едән сигнал мә'луматы дашыјан сигналын бу вә ја дикәр параметринә тә'сир едиб ону елә дәјишдирир ки, о, модулјасија едән сигналын мә'луматынын мәғзини өзүндә әкс етдирсин.

Модулјасија модулјасијаедичи (мә'луматлы) $X(t)$ сигналынын (шәкил 1.*8а*) мә'луматы дашыјан (дашыјычы) $У(t)$



Шәкил 1.8. Һармоник сигналларын модулјасиајсы просесләринин заман диаграмлары

сигналы илә (шәкил 1.*8б*) тә'сири нәтичәсиндә әлдә олунур вә көрүндүјү кими нәтичәви $Z(t)$ сигналы (шәкил 1.*8в*) өзүндә $X(t)$ сигналынын мәғзини әкс етдирир.

Һармоник сигнал $x(t)=A_0cos(\omega_0t\ -\varphi_0)$ шәклиндә тәсвир едилир. A_o, ω_o, φ_o – мүвафиг олараг һармоник рәгсин амплитуду, бучаг тезлији вә башланғыч фазасыдыр.

Импулс сигналы исә беләә тәсвир олунур:

$$x(t) = A_o \sum_{i=-\infty}^{\infty} x_1(t - t_o - iT_o)$$

A_o, t_o вә T_o – $x_1(t)$ импулсларынын амплитуду, башланғыч фазасы (башланғыч нөгтәјә көрә сүрүшмә) вә периодудур.

Мә'лумат дашыјычысыны һәм дашыјычы рәгсләр, һәм дә

импулсларын дашыјычы тезлији адландырырлар. Бундан асылы олараг модулјасија һармоник вә импулс модулјасијасына бөлүнүр.

Һармоник модулјасијада модулјасија едән һармоник рәгсләрдир вә модулјасија едилән (модулјасија нәтичәсиндә дәјишилән) параметрдән асылы олараг амплитуд, тезлик вә фаза модулјасијасы (шәкил 1.8) мөвчуддур. Бунларын комбинасијалары да практикада истифадә олуна биләр.

Импулс модулјасында дашыјычы ролуну импулслар ардычыллығы ојнајыр. Модулјасија едән параметрдән асылы олараг амплитуд-импулс (АИМ), енинә-импулс (ЕИМ), заман-импулс (ЗИМ) вә фаза-импулс (ФИМ) модулјасијалар мөвчуддур.

Амплитуд-импулс модулјасијасында модулјасија едән $X(t)$ функсијасына ујғун олараг импулсларын амплитуду дәјишир. Бу модулјасијанын бир һалында (АИМ 1) импулсларын формасы дүзбучаглы галыр, јалныз онларын амплитуду (һүндүрлүјү) дәјишир (шәкил 1.9), дикәриндә исә (АИМ 2) һәр импулсун тәпәси модулјасија едән функсијаны тәсвир едән әјринин мүвафиг саһәсини тәсвир едир. Тезлик-импулс модулјасијасында импулс-ларын тәкраролунма тезлији дәјишир. Бурада адәтән ја импулсларын давамијјәти, ја да онларын сыхлығы сабит галыр.

Енинә-импулс модулјасијасында исә бир һалда модулјасија едән функсијадан асылы олараг, јалныз импулсун арха чәбһәсинин, дикәр һалда исә симметрик олараг һәм өн, һәм дә арха чәбһәсинин вәзијјәти дәјишир. Импулсларын тәкраролунма периоду исә һәр импулсун ортасына көрә тә'јин едилир.

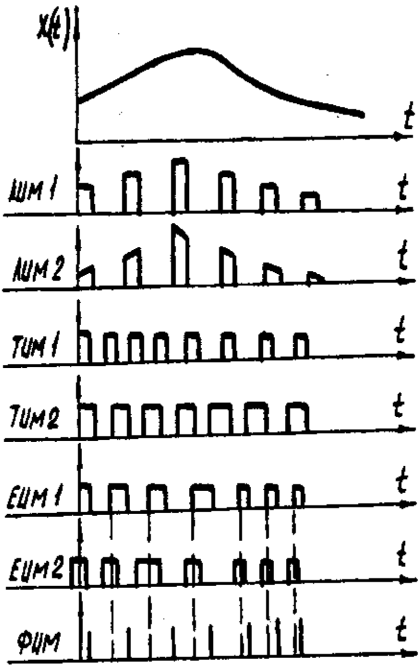
Фаза-импулс модулјасијасында модулјасија едән функсија импулсун формасыны вә параметрләрини дәјишмир вә јалныз заман оху үзрә импулсларын вәзијјәтини сүрүшдүрүр.

Бә'зән импулс модулјасијасынын бир нөвү кими код-импулс модулјасијасы да истифадә едилир. Бурада импулс групунун көмәји илә дискрет хәбәрләрин кодлашдырылмасы (кода чеврилмәси) вә өтүрүлмәси просеси баш верир. Анчаг јухарыда адлары чәкилән модулјасија нөвләриндән фәргли олараг, код-импулс модулјасијасы арасыкәсилмәз хәбәрләрин өтүрүлмәси үчүн истифадә едилә билмир. Она көрә бу үсула модулјасија-

нын бир нөвү кими јох, кодун көмәјилә дискрет хәбәрләрин өтүрүлмәси үсулу кими бахмаг лазымдыр.

Мә'луматын мүхтәлиф символларын вә ја онлара ујғун сигналларын комбинасијасына чеврилмәси просесинә кодлашдырма дејилир. Һәр конкрет хәбәрин мүхтәлиф символларын (вә ја ујғун сигналларын) комбинасијасы илә мүгајисә гајдасына (алгоритмә) код дејилир.

Кодлашдырма просесиндә өтүрүлән хәбәрләрин һәр бир чохлуғуна верилән символлар ардычыллығына код сөзү дејилир. Өтүрүлән хәбәрләр бир сыра символларын көмәји илә јазылыр ки, бунлара да 1-чи әлифба дејилир. Хәбәрләрин кода чеврилдији символлара исә 2-чи әлифба дејилир.



Шәкил 1.9. Импулс сигналларынын модулјасијасы просесләринин заман диаграмлары

Һәр һансы кода көрә хәбәрин мәзмунунун бәрпа олунмасы просесинә кодсузлашдырма дејилир. Кодсузлашдырманы һәјата кечирмәк үчүн әсас шәрт 2-чи әлифбадакы код сөзләринин 1-чи әлифбанын кодлашдырылан символларына бир мә'налы шәкилдә гаршылыглы ујғун кәлмәсидир.

Кодлашдырма үчүн бир гајда олараг рәгәмли сигналлардан истифадә олунур, башга сөзлә рәгәмли кодлашдырма апарылыр.

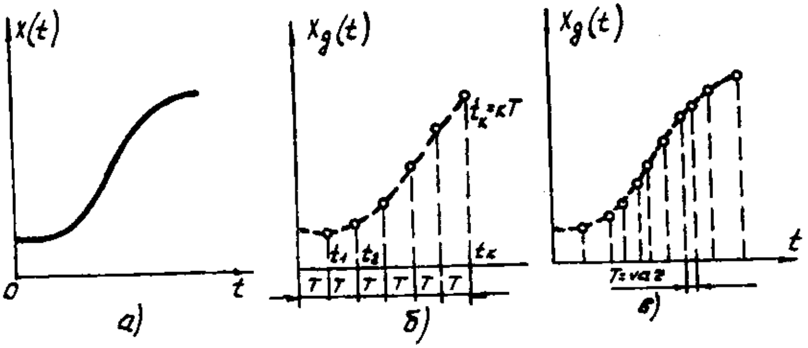
Кодлашдырма заманы өтүрүлән мә'лумат импулсларын тезлијиндән, амплитудундан вә давамијјәтиндән асылы олмур.

Кодлашдырма просеси ајрылмаз сурәтдә арасыкәсилмәз кәмијјәтләрин дискрет кәмијјәтләрә чеврилмәси илә бағлыдыр.

Белә чеврилмәнин әсасыны дискретләшдирмә (замана көрә квантлама), сәвиjjәjә көрә квантлама вә бунларын топлусу - комбинә едилмиш квантлама тәшкил едир.

Замана көрә дискретләшдирмә арамсыз $X(t)$ сигналынын бу сигналын адәтән бир-бириндән бәрабәр (шәкил 1.10*б*) фәргләнән вә jа дәjишән (шәкил 1.10*в*) T заман парчасына уjғун көлән ани $X_д(кT)$ гиjмәтләри ардычыллығына чеврилмәсинә деjилир.

Ики гоншу дискретләшдирмә аны арасындакы заман аралығына дискретләшдирмә аддымы вә jа замана көрә квантлама аддымы деjилир.



Шәкил 1.10. Замана көрә дискретләшдирмә просеси

Квантлама аддымы Т елә сечилир ки, дискрет функсиjа мүмкүн гәдәр арамсыз функсиjаны дәгиг тәсвир етсин, jә'ни квантламада арамсыз функсиjада олан мә'лумат мүмкүн гәдәр аз итсин. Котелников теореминә көрә f_c тезлиjиндән jүксәк тезликли топлананлара малик олмаjан $X(t)$ заман функсиjасы тамамилә өзүнүн бир-бириндән $1/2f_c$ интервалы гәдәр фәргләнән анлардакы гиjмәтләри илә тә'jин едилир. Беләликлә, әкәр фаjдалы $X(t)$ сигналы f_c тезлиjиндән jүксәк тезликләрә малик деjилсә $T=1/2f_c$ аддымы илә квантлашдырма апарараг, дискрет функсиjанын арамсыз функсиjаны дәгиг тәсвир етмәjинә

зә'мин јаратмаг олар. Башга сөзлә, квантламада мә'лумат иткиси олмур: $x(t) = x\left[\frac{k}{2f_c}\right]$ $k = 1,2,...n$

Ону гејд етмәк лазымдыр ки, теорем сигналын дискрет гијмәтләринин сечилмәси арасындакы интерваллары мүәјјән едир. Интервалын $1/2f_c$ гијмәтинә нисбәтән гысалдылмасы мүмкүндүр, лакин мә'насыздыр, $1/2f_c$-дән јухары артырылмасы исә мүмкүн дејилдир.

Котелников теореми арамсыз функсијанын сыраја (Котелников сырасына) ајрылмасына әсасланыр:

$$x(t) = \sum_{\kappa=-\infty}^{+\infty} x(\kappa T)\frac{\sin \omega_c(t-\kappa T)}{\omega_c(t-\kappa T)}.$$

Бурада ω_c арамсыз функсијанын спектринин мәһдудлашдырычы тезлијидир.

$X(\kappa T)$ гијмәтләринин ардычыллығы гәфәсәшәкилли функсија тәшкил едир. $g_\kappa(t)=[\sin\omega_c(t-\kappa T)]/[\omega_c(t-\kappa T)]$ исә гијмәтләрин функсијасыдыр. Беләликлә, $X(t)$ функсијасы әсас (база) $g_\kappa(t)$ функсијалары системи үзрә Котелников сырасына ајрылыр, $X(\kappa T)$-нин дискрет анлардакы гијмәтләри исә ајырма әмсалларына бәрабәр олур.

Гијмәтләрин $g_\kappa(t)$ функсијасынын ашағыдакы хүсусијјәтләри вардыр:

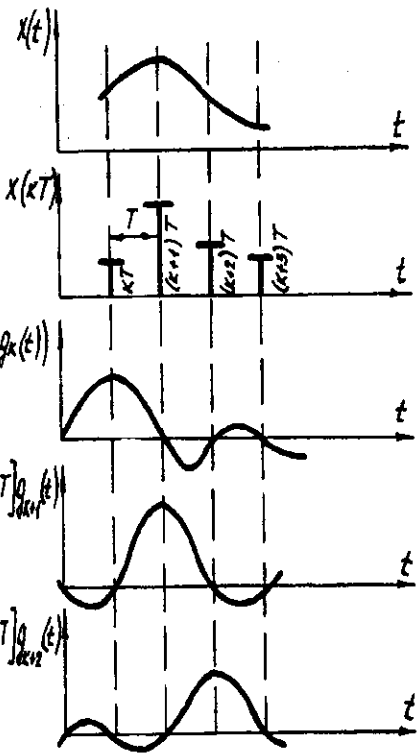
1) $t=\kappa T$ анында функсија ваһидә бәрабәр олан ән бөјүк гијмәти алыр;

2) $t=nT$ $(n\neq\kappa)$ анында функсија сыфра бәрабәр олур;

3) функсијалар сонсуз бөјүк заман интервалында ортогонал олурлар.

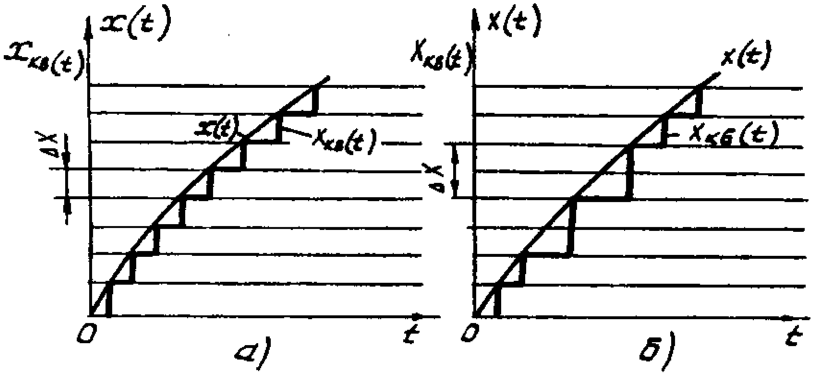
Арамсыз функсијанын Котелников сырасына ајрылмасынын практики маһијјәти ондадыр ки, рабитә каналы васитәсилә көрүнүшү мә'лум олан гијмәтләр функсијасы јох, јалныз гәфәсәшәкилли $X(\kappa T)$ функсијасынын гијмәтләри өтүрүлүр (шәкил 1.11). Гијмәт функсијаларыны чәкиләрилә топламаг јолу илә илкин арамсыз функсијаны әлдә едирик.

X(t) сигналыны бәрпа етмәк үчүн *0*-дан f_c-јә гәдәр тезлик бурахма золағы олан алчаг тезлик сүзкәчинин киришинә сигналын $t_i=кT$ анларындакы дискрет гијмәтләринә ујғун енсиз импулслар ардычыллығы вермәк лазымдыр. Тәбиидир ки, реал алчаг тезлик сүзкәчинин характеристикаларынын идеалдан фәргләнмәси нәтичәсиндә арамсыз функсијанын бәрпасында хәталар әмәлә кәлир.



Шәкил 1.11. Арамсыз функсијанын Котелников сырасына ајрылмасы

Арамсыз дәјишән кәмијјәтин пилләпилләдәјишән кәмијјәтә чеврилмәси просесинә сәвијјәјә көрә квантлама дејилир. Бу һалда пилләләрин өлчүләри сабит вә ја дәјишән ола биләр (шәкил 1.12 *а,б*). Ичазә верилән квантлама сәвијјәләринин сајы *m* сигналын максимал сәвијјәси X_{max} вә сәвијјәјә көрә квантламанын аддымы ΔX-лә мүәјјән едилир: $m=X_{max}/\Delta X$. Комбинә едилмиш квантламада арамсыз *X(t)* сигналы замана вә сәвијјәјә көрә квантланыр. Бурада арамсыз сигнал функсијасы замана көрә квантлама аддымы *(T)* гәдәр бир-бириндән араланан дискрет гијмәтләрлә әвәз едилир вә онларын амплитудлары ән јахын квантлама сәвијјәләри илә мүәјјән едилир.



Шәкил 1.12. Сәвијјәјә көрә дискретләшдирмә просеси

Дејилдији кими, квантланмыш арамсыз сигнал хәта илә бәрпа олунур вә хәта квантланмыш дискрет импулсларын гијмәтләри илә өлчмә нөгтәләриндә арамсыз сигналын гијмәтләри арасындакы фәрглә мүәјјән едилир. Квантланманын хәтасы (вә ја квантлама күјү) квантлама күјүнүн күчү илә (тәхминән) тә'јин едилир:

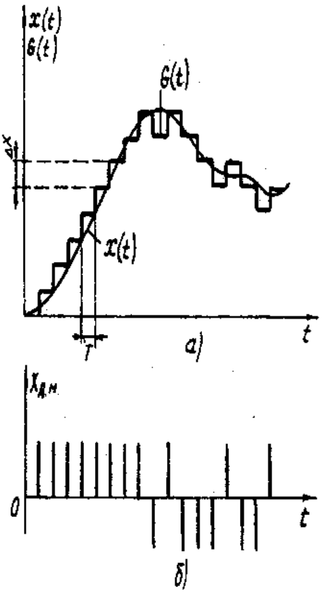
$$\sigma_{кв}^2 = T^2/12 .$$

Дискрет кодлашдырма делта модулјасијада вә импулс-код модулјасијасында билаваситә истифадә олунур. Делта модулјасијада арамсыз илкин сигнал изләјичи пилләвари сигналла апроксимасија едилир. Бунларын бир–биринә ујғунлуғу замана көрә квантлама аддымы T вә сәвијјәјә көрә ΔX тә'јин едилир (шәкил 1.13).

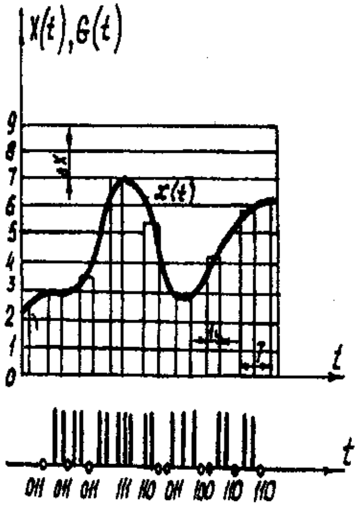
Пилләвари G(t) сигналынын функсијасына ујғун олараг онун пиллә-пиллә дәјишдији анларда модулјасија едилмиш $X_{дм}$ сигналы алыныр. Бу сигнал $G(t)$ функсијанын дәјишмә истигамәтиндән асылы олараг мүсбәт вә ја мәнфи полјарлыға, сабит амплитуда вә давамијјәтә малик тәк импулслар шәклиндә олур. Бу импулслар чари сечилмә илә онун гаршыда көзләнилән гијмәтләри арасындакы фәргин ишарәсини тәсвир едир. Гаршыда

көзләнилән гијмәт кими бундан әввәлки сечилмәнин квантланмыш гијмәти көтүрүлүр.

Беләликлә, дискрет модулјасија едилмиш хәбәр һәр нөгтәдә бирмәртәбәли икилик кодла кодланыр.



Шәкил 1.13. Дискрет модулјасија просеси



Шәкил 1.14 Импулс-код модулјасијасы просеси

Импулс-код модулјасијасында арамсыз сигнал әввәлҹә замана вә сәвијјәјә көрә квантланыр, сонра исә сигналын сәвијјәсинин һәр дискрет гијмәтинә мүвафиг код комбинасијасы ашыланыр. Беләликлә, илкин хәбәр дискрет гијмәтләрә ујғун код комбинасијалары илә өтүрүлүр. Бу комбинасијалар арамсыз $X(t)$ сигналыны тәсвир едән дискрет гијмәтләрә ујғун кәлир.

Код комбинасијасында ваһид елементләрин сајы n кодун әсасы вә квантлама сәвијјәләринин сајы m илә тә'јин едилир. Импулс-код модулјасијасында адәтән икилик код истифадә олундуғундан: $n=log_2m$ (вә ја $m=2^n$).

Квантлама аддымы T Котелников теоременә көрә тә'јин едилир. Квантлама сәвијјәләринин сајы m исә n-ин мүтләг там

əдəд олмасыны нəзəрə алмагла сигналын лазыми дəгигликлə ифадə олунмасы илə тə'јин едилир. Мəсəлəн, үч мəртəбəли икилик коддан истифадə едилдикдə $n=3$-дүр. Бурада импулсун олмасы 1-ə, олмамасы исə 0-а ујғун кəлир (шəкил 1.14). Модулјасија едилəн сигнал $X(t)$ $2^n=2^3=8$ сəвијјəјə бөлүнүр. Һəр сəвијјəјə өз икилик коду ујғун кəлир. Заман охунда бу код 3 импулсдан ибарəт комбинасија илə тəсвир олунур. Бу импулслардан һəр бири бир квантлама аддымы интервалында тутдуғу мөвгејə ујғун олан "чəкијə" (2^0, 2^1 вə ја 2^2) малик олур. Верилмиш квантлама аддымында бу вə ја дикəр чəкили импулсун олмасы квантлама сəвијјəсини мүəјјəн едир. Мəсəлəн, 3 импулсун һамысынын олмасы (икилик 111 коду) квантлама сəвијјəсинин 7-јə бəрабəр олдуғуну көстəрир (шəкил 1.14*б*).

1.6. Електрон гурғуларынын електрик дөврəлəринин əсас хүсусијјəтлəри

Јухарыда гејд етдик ки, хəтти дөврəлəрдə волт-ампер характеристикалары хəтти характер дашыјыр вə бу ону нəзəрдə тутур ки, дөврəлəрин параметрлəри (мүгавимəти, тутуму, индуктивлији) сабитдир вə тəтбиг олунан кəркинлик вə ахан чəрəјандан асылы олмур. Бунунла əлагəдар гејд етмəк лазымдыр ки, конструктив ишлəнмəсиндəн, сигналларын амплитуду вə ја күчүндəн асылы олараг, ејни дөврəлəр һəм хəтти, һəм дə гејрихəтти ола билирлəр.

Хəтти гурғулар һəм електрон гурғуларында, һəм дə микросхемотехникада кениш истифадə едилдијинə көрə онларын бир чох хүсусијјəтлəринин өјрəнилмəси вачибдир.

Интегралладјычы дөврə. Чыхыш сигналы кириш сигналынын интегралына бəрабəр олан дөрдгүтблүјə интегралладјычы дөврə дејилир. Кириш вə чыхыш сигналлары ејни ваһидлə өлчүлəрсə, белə дөврəнин јеринə јетирдији əмəлијјат бу чүр ифадə едилə билəр:

$$u_{чых}(t)=к\int_0^t u_{кир}(t)dt$$

Бурада к мүтәнасиблик әмсалыдыр (c^{-1}).

Ән садә интеграллајычы дөврә ролуну конденсатор вә ја индуктив сарғач ојнаја биләр. Конденсаторлу дөврәдә (шәкил 1.15а) кириш чәрәјаны i, чыхыш кәркинлији исә u_c гәбул едиләрсә вә илкин $u_{co} = 0$ шәртилә

$$u_c(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i(t)\,dt$$

Бурада кириш вә чыхыш сигналларынын ваһидләри мүхтәлифдир.

Кириш сигналы кими $u_{кир}(t)$ көтүрүләрсә, конденсатору долдуран $i(t)$ чәрәјаны R мүгавимәтиндән ахыр. Белә мүгавимәт ролуну сигнал мәнбәји олан кәркинлик кенераторунун чыхыш мүгавимәти ојнаја биләр. (шәкил 1.15*б*). R мүгавимәтинин олмасы дөврәни там интеграллајычы јох, квазиинтеграллајычы дөврәјә чевирир ("квази" сөзүнү "демәк олар ки" кими гәбул етмәк олар):

$$i = i_c = i_R = \frac{u_{кир}(t) - u_{чых}(t)}{R}$$

$$u_c = u_{чых}(t) = \frac{1}{RC}\int_0^t [u_{кир}(t) - u_{чых}(t)]dt$$

Әкәр $u_{чых}(t) << u_{кир}(t)$ шәрти тә'мин едиләрсә

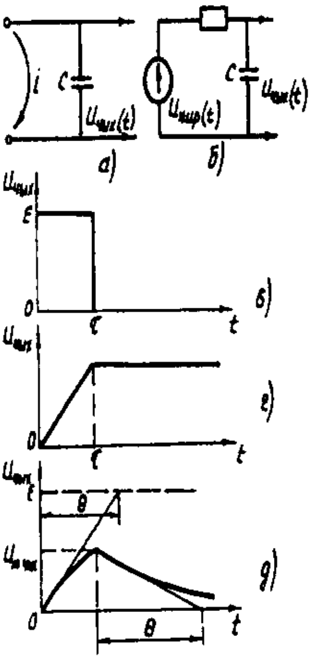
$$u_{чых}(t) \approx \frac{1}{\theta}\int_0^t u_{кир}(t)dt, \quad \theta = RC$$

Демәли, интеграллаһанын үмуми шәрти $u_{чых}(t) << u_{кир}(t)$ -нин өдәнилмәсидир.

Һармоник кириш сигналыны $(u_{кир}(t) = U_m \cos\omega t)$ интеграллајаркән 90^0 фаза сүрүшмәси алыныр, чүнки косинусоидал функсијанын интегралы синуса ујғун кәлир. Белә фаза сүрүшмәси о вахт тә'мин едилә биләр ки, $i(t)$ чәрәјаны фазача $u_{кир}(t)$ кәркинлији илә үст-үстә дүшсүн. Онда конденсатордакы кәркинлик чәрәјандан вә ујғун олараг кириш кәркинлијиндән 90^0 кери галачагдыр. $u_{кир}(t)$ вә $i(t)$–нин ејни фазада олмасы актив

R вә тутум Xc мүгавимәтләриндән ибарәт дөврәнин мүгавимәтинин актив олмасыны, јә'ни $R>>Xc$ олмасыны тәләб едир.

$Xc=1/\omega C=T/2\pi C$ олдуғундан бу бәрабәрсизлијә $\theta=RC>>T$ шәрти еквивалент олачагдыр. Демәли, RC дөврәсинин заман сабити һармоник рәгсин периодундан чох-чох бөјүк олмалыдыр. Импулс сигналыны интеграллајаркән интеграллама шәрти $\theta>>\tau$ кими ифадә олуначагдыр. Бурада нәзәрә алмаг лазымдыр ки, импулсун спектриндә һәмишә $\omega=0$ нөгтәсинин әтрафында јерләшән елә кичик тезликләр ола биләр ки, онлар үчүн $\theta>>T$ шәртини θ-нын сон гијмәтиндә өдәмәк мүмкүн олмасын. Нәтичәдә спектрин алчаг тезликләринин гејри-кафи интегралланмасындан спектрал хәта әмәлә кәлир. Бу исә заман хәтасыны јарадыр. Спектрин алчаг тезликләри әсасән импулсун тәпәсинин формалашмасына тә'сир көстәрдијиндән заман хәтасы импулсун тәпәси интегралланаркән нәзәрә чарпачаг һәддә, импулсун өн чәбһәсинә јахын саһәләри интегралланаркән исә чох кичик олур.



Шәкил 1.15 Интеграллајычы дөврә (*а,б*) вә импулс сигналларынын интегралланмасы (*в,г,д*)

Тутаг ки, интеграллајычы дөврәнин киришинә аналитик чәһәтдән ашағыдакы ифадә илә тәсвир едилән тәк импулс верилир (шәкил 1.15*в*):

$-\infty<t<0$ оланда $u(t)=0$

$0\leq t\leq\tau$ оланда $u(t)=Um$

$\tau<t<\infty$ оланда $u(t)=0$

Өзү дә U_m=E-дир.

Чыхыш кәркинлији $u_{кир}(t)$ функсијасынын интегралына бәрабәр олачагдыр:

$t<0$ оланда $u_{чых}(t)=0$

$0<t<\tau$ оланда $U_{чых}(t) = K\int_0^{\tau} Edt = E\kappa T$

$t>\tau$ оланда $u_{чых}(t)=Ek\tau=const$

Идеал интеграллајычынын чыхыш кәркинлијинин графики шәкил 1.15*г*-дә көстәрилмишдир. Реал дөврәдә чыхыш кәркинлији E амплитудлу импулс јарадан мәнбәдән R резистору васитәсилә конденсаторун долмасындан алынан кәркинлијә бәрабәр олур:

$t<0$ оланда $u_{чых}(t)=0$

$0\leq t\leq\tau$ оланда $u_{чых}(t)=E(1-e^{-t/\theta})$

$t>\tau$ оланда $U_{чых}(t)= E(1-e^{-\tau/\theta})e^{-(t-\tau)/\theta}$

Реал дөврәнин чыхыш кәркинлијинин графики шәкил 1.15*д*-дә көстәрилмишдир.

Дүзкүн интеграллама шәртинә $(\theta>>\tau)$ әсасән киришә импулс тә'сир едән мүддәтдә чыхышдакы кәркинлик кими ифадә олунур:

$$U_{чых}(t) = E(1 - e^{-t/\theta}) \approx E\frac{t}{\theta}$$

Көрүндүјү кими әввәлчә $u_{чых}(t)$, демәк олар ки, хәтти олараг дәјишир, бу һалда T/θ мүтәнасиблик әмсалынын (K) ролуну ојнајыр. t-нин гијмәтләри артдыгча интеграллама сәһви артыр вә експоненсиал кәркинлик кетдикчә кәркинлијин дәјишмәсинин илкин саһәсинә ујғун дүз хәтдән фәргләнир.

Реал дөврәни идеал дөврәдән фәргләндирән одур ки: а) интеграллама јалныз кириш импулсунун өн чәбһәси әтрафында $t<<\theta$ һалында дүзкүндүр, t артдыгча интеграллама хәтасы артыр: б) реал дөврә сонсуз "јаддаша" малик олмур, әкәр идеал дөврәдә $t>\tau$ гијмәтләриндә $u_{чых}(t)=const$ олурса, реал дөврәдә импулсун тә'сири кәсиләндән сонра конденсатор бошалыр вә кәркинлик експоненсиал ганунла азалыр.

Дөврәнин заман сабити нә гәдәр бөјүк оларса $0<t<\tau$ интервалында чыхыш сигналынын хәттиликдән фәргләнмәси бир о гәдәр кичик олар. Чыхыш сигналынын амплитуду дөврәнин заман сабитинә әкс мүтәнасиб олур: $U_{mчых} \approx E\tau/\theta$. Чыхыш кәркинлијинин амплитудуну кичилтмәклә интеграллама дәгиглији артырылыр.

Интеграллајычы дөврәләр аналог һесаблама машынларында интеграллама әмәлијјатыны јеринә јетирмәк, гида дөврәләриндә импулс әнкәлләри оларкән дөјүнмәләри һамарламаг, дүзбучаглы импулслары үчбучаглы импулслара чевирмәк вә импулсларын давамијјәтини кенишләндирмәк үчүн истифадә олунурлар.

Диференсиаллајычы дөврә. Чыхыш сигналы һәр бир анда кириш сигналынын төрәмәсинә бәрабәр гијмәтләр алан дөврәјә дифференсиаллајычы дөврә дејилир. Мәсәлән, әкәр кириш вә чыхыш сигналлары кәркинлик оларса, онда

$$u_{чых}(t) = K\frac{du_{кир}}{dt}$$

олмалыдыр.

$к$ әмсалынын ваһиди мүтләг санијә олмалыдыр, башга һалда сағ вә сол һиссәдә ваһидләр ејни олмајачагдыр.

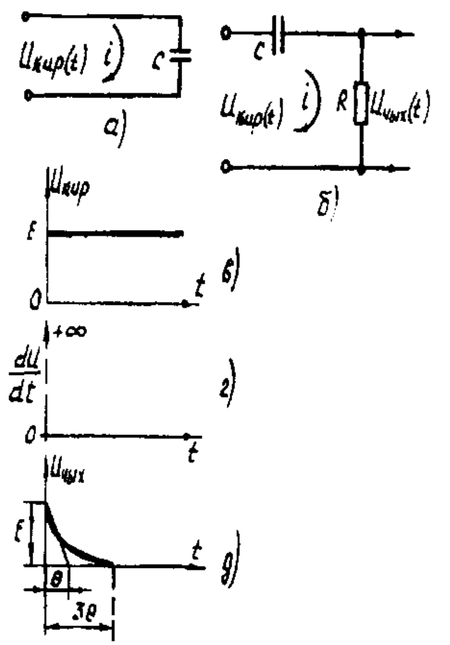
Идеал диференсиаллајычы ролуну конденсатор вә ја индуктив сарғач ојнаја биләр. Конденсаторун кириш сигналыны $u_{кир}(t)$ чыхыш сигналыны $i(t)$ гәбул етсәк, бунларын әлагәси белә ифадә олунар (шәкил 1.16*а*):

$$i(t) = C\frac{du_{кир}}{dt},$$

јә'ни, чәрәјан дөврәдәки кәркинлијин төрәмәсинә мүтәнасибдир. Анчаг белә дөврәни практики мәгсәдләр үчүн истифадә етмәк мүмкүн олмур, чүнки бу дөврәдә чәрәјанын гијмәтини бу вә ја дикәр гајдада өлчә билән елемент јохдур. Она көрә дә чыхыш сигналы мүшаһидә олуна билмир. Чыхыш сигналыны

мүшаһидә вә гејд етмәк үчүн раһат олан шәкилдә алмаг мәгсәдилә дөврәјә R мүгавимәти гошулур (шәкил 1.16б). Онун кәркинлији чәрәјана мүтәнасибдир: $U_R=iR$.

Кәркинлијин замана көрә дәјишмәләрини һәр һансы бир чиһазын (мәсәлән, осиллографын) көмәјилә изләмәк олар. Бурада да гејд етмәк лазымдыр ки, R мүгавимәтинин әлавә едилмәси дөврәни диференсиаллајычыдан квазидиференсиаллајычы дөврәјә чевирир. Һәгигәтән белә дөврә үчүн



Шәкил 1.16 Диференсиаллыјычы дөврә (а,б) вә импулс сигналынын диференсиалланмасы

$$i=i_c=C\frac{dU_c}{dt}=C\frac{d[u_{кир}(t)-u_{чых}(t)]}{dt}$$

$$u_{чых}(t)=iR=RC\frac{d[u_{кир}(t)-u_{чых}(t)]}{dt}$$

Чыхыш сигналынын кәркинлији $u_{кир}(t)$-$u_{чых}(t)$ фәргинин төрәмәсинә мүтәнасибдир. Јалныз $u_{чых}(t) \ll u_{кир}(t)$

$$u_{чых}(t) \approx \theta\frac{du_{кир}(t)}{dt}$$

һалында алыныр. Беләликлә, кириш сигналынын дүзкүн диференсиалланмасы јалныз бу шәрт өдәнәндә мүмкүндүр.

Киришә һармоник $u_{кир}(t)=U_m\cos\omega t$ сигналы вериләндә диференсиаллама сигналын фазасынын 90^0 сүрүшдүрүлмәсинә (косинусун төрәмәси синуса мүтәнасиб олдуғундан) ујғун кәлир. Көстәрилән RC дөврәсиндә чыхыш кәркинлијинин 90^0-јә јахын сүрүшмәсини јалныз чәрәјанын дөврәдә тутум характерли олмасы һалында әлдә етмәк олар (чәрәјан верилән кәр-кин-

лиjи 90^0 габагламалыдыр). $u_{чых}(t)=iR$ кәркинлиjи чәрәjана мүтәнасиб вә онунла бир фазададыр - синфаздыр. Чәрәjанын тутум характерли олмасы үчүн дөврәнин мүгавимәтинин әсасән тутумла мүәjjән едилмәси вачибдир: $Xc>>R$. $X_c=1/\omega C=T/2\pi C$ олдуғундан $X_c>>R$ шәрти $T/2\pi>>RC$ шәртилә еквивалент олур вә jа $\theta<<T$ алыныр. Бу ахырынчы ифадә дифференсиаллаjычы дөврәнин һармоник рәгсләрин дифференсиалланмасы үчүн заман сабитини тапмаға имкан верир.

Импулс сигналларыны дифференсиаллаjаркән бу ахырынчы шәрт спектрин импулс енержисинин әсас һиссәсини өзүндә дашыjан бүтүн һармоник топлананлары үчүн jеринә jетирилмәлидир. Әкәр енержинин әсас һиссәсинин топлананларын 1-чисинин паjына дүшдүjүнү нәзәрә алсаг, онда спектрин ән jухары тезлиjи кими периоду $T_j=\tau$ олан $\omega_j=2\pi/\tau$ тезлиjини көтүрмәк олар. Онда дифференсиаллама шәртинә көрә $\theta<<T_j$, вә jа $\theta<<\tau$ jазмаг олар.

Бу бәрабәрсизлик өдәнәрсә спектрин нисбәтән алчаг тезликләри үчүн дифференсиаллама шәртләри әввәлчәдән jеринә jетириләчәкдир. Лакин спектрдә ω_j-дән дә jүксәк тезликләр мөвчуддур. Чүнки бу тезлик шәрти олараг "jухары" кими гәбул едилмишдир. Спектрин 2-чи, 3-чү вә с. топлананларынын тезлиjи $2\pi/\tau$ –дан jүксәкдир. Лакин импулсун бу топлананларын паjына дүшән енержиси о гәдәр дә бөjүк деjилдир. $\theta=RC$–нин сон гиjмәтиндә һәмишә импулсун спектриндә елә һармоника тапылачагдыр ки $\theta<<T$ шәрти ондан башлаjараг артыг өдәнмәjәчәкдир. Бу һалда jүксәк тезликләрин геjри-кафи дифференсиалланмасы нәтичәсиндә спектрал хәта әмәлә кәлир. Спектрал хәта заман хәтасына чеврилир. Спектрин jүксәк тезликләри импулсун өн чәбһәсини формалашдырдығындан вә онун тәпәсинин характеринә аз тә'сир көстәрдиjиндән бу заман хәтасы әсасән импулсун өн вә арха чәбһәләри әтрафында өзүнү көстәрир. Мәсәлән, $u_{кир}(t)=E\cdot 1(t)$ пилләвари кәркинлик үчүн (шәкил 1.16*в*) $t=0$ нөгтәсиндә $du_{кир}(t)/dt\to\infty$ (шәкил 1.16*г*), галан нөгтәләрдә исә төрәмә сыфра бәрабәрдир.

Реал RC дөврәсинин чыхышында кәркинлик $u_{чых}(t)=U_R$ експоненсиал асылылгла ифадә олунур (шәкил 1.16*д*)

$t<0$ оланда $u_{чых}(t)=0$

$t\geq 0$ оланда $u_{чых}(t)=E\ e^{-t/\theta}$

Идеал дифференсиаллајычы вә реал RC дөврәсинин сигналларынын максимал фәргләнмәси $t=0$ нөгтәсиндә мүшаһидә олунур: идеал дөврә үчүн чыхыш сигналы сонсуздур, реал дөврәдә исә E кәркинлик пилләсиндән артыг ола билмәз. 3RC интервалы әрзиндә дифференсиаллама хәтасы (сәһви) кетдикчә азалыр; $t>3RC$ оланда реал вә идеал дөврәләрин чыхыш сигналлары ејни вә сыфра бәрабәр олурлар.

Дифференсиаллајычы дөврәләр аналог һесаблама машынларында ријази дифференсиаллама әмәлијјатыны апармаг, һармоник сигналларын фазасыны мүәјјән 90^0-јә јахын бучаг гәдәр дөндәрмәк үчүн вә гысалдычы дөврәләр кими истифадә олунурлар.

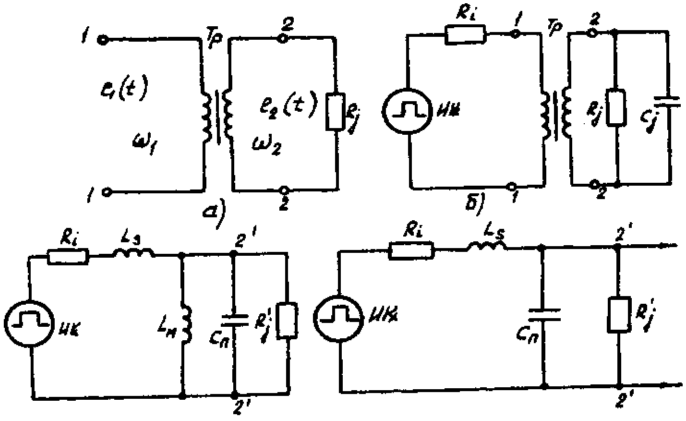
Импулс трансформатору. Ферромагнит нүвәјә малик олан вә импулс сигналларынын өтүрмәси үчүн ишләдилән трансформатора импулс трансформатору дејилир. Белә трансформаторларда ферритләр вә ја пермаллој әсаслы ишләнмиш ифрат магнитләшмә иткиләри аз олан нүвәләрдән истифадә олунур. Дөврәләри ајырма функсијаларындан әлавә белә трансформатор һәм дә импулс сигналларынын полјарлығыны вә амплитудуну дәјишир, мүгавимәтләри узлашдырыр вә сигналлары бир-бириндән асылы олмајан бир нечә дөврәләрин киришинә вермәк үчүн ајырыр. Сонунчу һалда трансформатор бир нечә икинчи долаға малик олур. Импулс трансформаторунун шәрти тәсвири шәкил 1.17*а*-да көстәрилмишдир. 1-чи долаға гошулан импулслар мәнбәјинин кәркинлији магнит селиндән асылыдыр:

$$e_1=\omega_1\frac{d\phi}{dt};$$

2-чи долағын чыхышында кәркинлик $e_2=\omega_2\frac{d\phi}{dt}$.
Бурадан

$$e_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} e_1,$$

вә ја $e_I=ne_I$. ω_1, ω_2, – долаглар сајы, $n=\omega_2/\omega_1$-кәркинлијин трансформасија әмсалыдыр.



Шәкил 1.17. Импулс трансформаторунун шәрти тәсвири *(а)*; сигналы өтүрмә схеми *(б)*; еквивалент схеми *(в)*; вә импулсун тәпәсинини өтүрмә һалы үчүн еквивалент схеми *(г)*

Дүзбучаглы импулсун импулс трансформаторундан кечмәсини араштыраг. Јүк елементләринин 1-чи долаға кәтирилмәсини динамик $C_{дин}$ вә паразит C_j тутумлары вә дикәр әламәтләри нәзәрә алмаг шәртилә сигналы өтүрмә схемини (шәкил 1.17*б*) шәкил 1.17*в*-дәки кими тәсвир етмәк олар. Бурада R_i импулс кенераторунун чыхыш мүгавимәтидир. Кенератор амплитуду $U_m=E$ вә давамијјәти τ олан импулслар јарадыр. L_s – трансформаторун сәпәләнмә индуктивлији, $L_м$-магнитләшмә индуктивлијидир, $C_п=C'_j+C_{дин}$; $R_j=R_j/n^2$; $C'_j= n^2C_j$.

Белә схем бир-бириндән асылы олмајан үч реактив енержи топлајанына *(C_m, L_s вә $L_м$)* малик олдуғуна көрә 3-чү тәртибли дифференсиал тәнликлә ифадә олунур. Тәнлијин јүксәк тәртиби трансформаторда кедән кечид просесләрини ваһид аналитик дүстурларла јазмаға имкан верир. Она көрә просес ики һиссәјә бөлүнүр: "ити" кедән просесләр областы

импулсун өн вә ја арха ҹәбһәсинин өтүрүлмәсинә, "јаваш" кедән просесләр областы импулсун тәпәсинин өтүрүлмәсинә ујғун кәлир. Бу үсулла кифајәт едән дәгиглик сахламагла бу просесләри ифадә едән тәнликләрин тәртибини азалтмаг мүмкүн олур. $L_м$-дә импулсун өн ҹәбһәси формалашан заман ҹәрәјан дәјишилмәдијиндән ити просесләрин тәһлили заманы $L_м$-и еквивалент схемдән чыхарырлар (шәкил 1.17*г*). Импулсун өн ҹәбһәсинин формалашмасы мәрһәләсиндә чыхыш кәркинлији ашағыдакы гијмәтини алмаға ҹан атыр.

$$K_{\partial\gamma} E = \frac{R'_j}{R'_j + R_i} E$$

$$Z = \frac{\sqrt{K_g}}{2}\left(\frac{\rho}{R_j} + \frac{R_i}{\rho}\right)$$

әмсалынын гијмәтиндән асылы олараг кәркинлијин дәјишмәси рәгси $(z>1)$, критик $(z=1)$ вә апериодик $(z>1)$ ола биләр.

Практикада $0.5<z<1$ сахламагла критик вә ја зәиф рәгси режим әлдә едирләр. $Z=1$ һалы үчүн импулсун өн ҹәбһәсинин давамијјәти K_∂, L_c вәC_n дән асылыдыр:

$$t_\phi \approx 2\sqrt{K_\partial L_s C_n}$$

Импулсун тәпәсинин трансформатордан кечмәсини араштыраг.

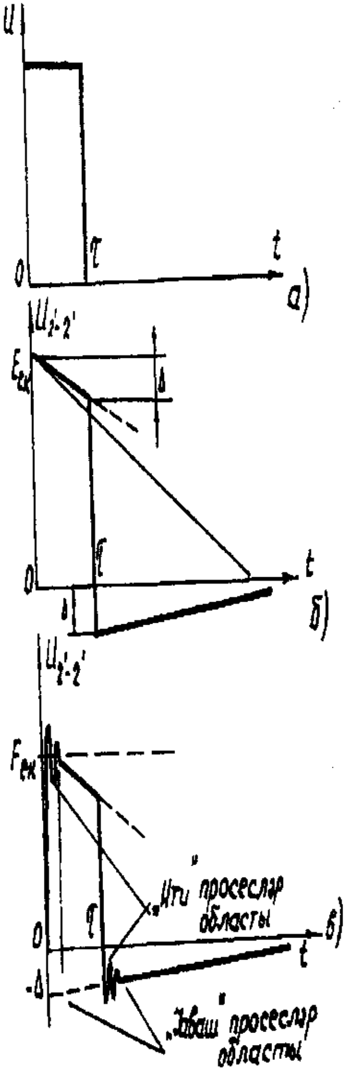
$0<t<\tau$ интервалында кенераторун е.һ.г. сабитдир $e(t)=E=const$. Кәркинлијин вә ҹәрәјанын јаваш дәјишмәләриндә $di_l/dt\to 0$. Она көрә кичик гијмәтә малик L_s-дәки кәркинлик

$$U_s = L_s\frac{di_1}{dt} = 0 \qquad \text{олур.}$$

Бундан әлавә $\frac{dU_{2'-2'}}{dt}\to 0$ вә она көрә дә кичик паразит тутумун ҹәрәјаны

$$i_{c_T} = C_n\frac{dU_{2'-2'}}{dt} = 0$$

алыныр.



Шәкил 1.18 Импулс сигналынын трансформатор – дан кечмәси диаграмлары

Бунлара әсасән L_s гыса гапанмыш саһә, C_T исә ајрылмыш дөврә кими гәбул едиләрәк схемдән чыхарылыр. Схемдә јалныз бир реактив енержи јығычысы $L_м$ галыр вә о, бир тәртибли диференсиал тәнликлә ифадә едилир. Белә схем ардычыл гошулмуш LR дөврәсиндән ибарәт олур вә дөврәнин импулс кәркинлијинин амплитуду $E_{ек}$, чыхыш мүгавимәти $R_{ек}$ олур: $E_{ек}=ER/(R'_i+R_j)$; $R_{ек}=R_iR'_j/(R_i+R'_j)$; $\theta=L_м/R_{ек}$ $t=0$ анында $i(t)$-ин магнитләшмә чәрәјаны, даһа доғрусу $R_{ек}$ $L_м$ дөврәсиндә үмуми чәрәјан сыфра бәрабәрдир (шәкил 1.18б).

$t>0$ оланда $L_м$ чәрәјаны артмаға башлајыр вә һүдуд $E_{ек}/R_{ек}=E/R_i$ гијмәтинә експоненсиал ганунла јахынлашыр:

$$i(t)=\frac{E}{R_i}(1-e^{-t/\theta})$$

Буна ујғун $L_м$ -дә кәркинлик дәјишир: $u_{2-2}(t)=E_{ек}e^{-t/\theta}$

$t=\tau$ анында бу кәркинлик $U_{2-2}(\tau)=E_{ек}e^{-\tau/\theta}$ гијмәтинә гәдәр азалыр вә магнитләшмә чәрәјаны

$$i(\tau)=\frac{E}{R_i}(1-e^{-\tau/\theta})$$

гијмәтини алыр.

Импулсун тәпәсинин $E_{ек}$ сәвијјәсинә көрә азалмасы $\Delta=E_{ек}-u_{2-2}(t)=E_{ек}(1-e^{-\tau/\theta})$ олачагдыр. Импулсун тәпәси өтүрүләндән сонра

$t=\tau$ анында E_{ek} сыфра гәдәр азалачагдыр. Бу заман магнитләшмә чәрәјаны j гијмәтини вә истигамәтини итн дәјишә билмәдијиндән импулс гуртаран илк анда $j=j(\tau)$ олачагдыр. Сонра чәрәјан експоненсиал ганунла азалараг R_{ek}-$L_м$-мәнбә дөврәсиндә гапаныр. Бу заман R_{ek} мүгавимәтиндә гурғунун көвдәсинә көрә мәнфи ишарәли кәркинлик дүшкүсү јараныр.

Кәркинлијин мәнфи "гујруғунун" амплитуду беләтә'јин олунур:

$$U_{пг}=i(\tau)R_{ek}=E_{ek}(1-e^{-\tau/\theta})=$$

"Гујруғун" давамијјәти магнитләшдирмә чәрәјанынын сөнмәсинин кечид просесинин давамијјәтинә бәрабәрдир:

$$t_r=3\theta=3L_м/R_{ek}$$

Чыхыш кәркинлијинин там графики шәкил 1.18в-дә көстәрилмишдир.

Сүзкәчләр. Електрик сигналларынын сүзкәчләри фајдалы вә лазымсыз сигналларын гарышығындан тәләб олунан сигналын сечилиб өтүрүлмәси үчүн истифадә олунур. Сүзкәчләрин сигналы аз зәифләтдији тезлик областына бурахма золағы, сигналы чох зәифләтдији тезлик областына исә сахлама золағы дејилир. Сигналын күчләнмәси вә зәифләнмәси арасында фәрг нә гәдәр бөјүк оларса, сүзмә хүсусијјәтләри бир о гәдәр чох өзүнү көстәрир.

Бурахма вә сахлама золагларынын гаршылыглы јерләшмәсиндән асылы олараг сүзкәчләр бир нечә група бөлүнүрләр:

1) Ашағы тезлик сүзкәчләри 0-дан һәр һансы ω_2 тезлијинә гәдәр бурахма золағына вә һәр һансы бир ω_{c2} тезлијиндән сонсузлуға гәдәр сахлама золағына маликдирләр.

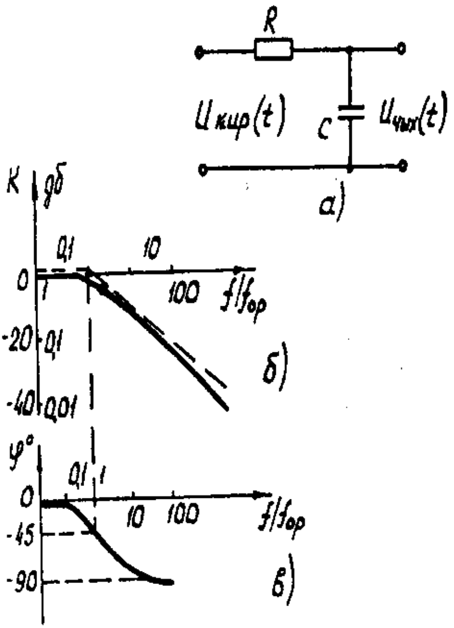
2) Јухары тезлик сүзкәчләри һәр һансы ω_1 тезлијиндән сонсузлуға кими бурахма золағына вә 0-дан $\omega_{c1}<\omega_1$ тезлијинә гәдәр сахлама золағына маликдир.

3) Золаглы сүзкәчләр һәр һансы бир ω_1 тезлијиндән дикәр $\omega_2<\omega_1$ тезлијинә гәдәр бурахма золағына вә 0-дан $\omega_{c1}<\omega_1$ вә $\omega_{c2}<\omega_2$ -дан сонсузлуға кими сахлама золағына маликдирләр.

4) Режекторлу (габаг кәсән) сүзкәч 0-дан ω_1 тезлијинә гәдәр вә $\omega_2<\omega_1$ тезлијиндән сонсузлуға гәдәр бурахма золағына вә ω_{c1}-дән $\omega_{c2}<\omega_{c1}$ -ә кими сахлама золағына маликдир.

Бу әсас нөвләрдән башга, һәр һансы бир бурахма золағында һәм сигналы күчләндирә, һәм дә зәифләдә билән коррексијаедичи сүзкәчләр вә өтүрмә әмсалы тезликдән асылы олмајан, фаза сүрүшмәси исә тезлијә мүтәнасиб олан фаза корректорлары да истифадә едилир.

Практикада ишләдилән, мүхтәлиф характеристикалара малик мүрәккәб сүзкәчләр типик сүзкәчләрин јығымындан ибарәт олур.



Шәкил 1.19. Ашағы тезликләр сүзкәчинин схеми (*а*) амплитуд-тезлик (*б*) вә фаза-тезлик (*в*) характеристикалары

Ашағы тезлик сүзкәчләри алчаг тезликли сигналлары дәјишмәдән өтүрүр, јүксәк тезликләрдә исә сигналы зәифләдир вә чыхышда кириш сигналына нисбәтән фаза кечикмәси јарадыр (шәкил 1.19*а*). Сүзкәчин амплитуд вә фаза тезлик характеристикалары белә ифадә олунур:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 R^2 C^2}};$$

$$\varphi(\omega) = -arctg\ \omega RC$$

Бу характеристикалар диаграмда көстәрилмишдир (шәкил 1.19*б,в*).

Бурада $f_{ор}$ – сәрһәд

тезлиjидир, бу тезликдә $K(\omega)=1/\sqrt{2}$, jә'ни 3дб һәддиндә дәjишир.

$$K(\omega)=1/\sqrt{2}=1/\sqrt{1+\omega_{op}^{2}R^{2}C^{2}}$$ jазараг

сәрһәд тезлиjинин гиjмәтини тапмаг олар:

$$f_{op}=(1/2\pi)\omega_{op}=1/2\pi RC$$

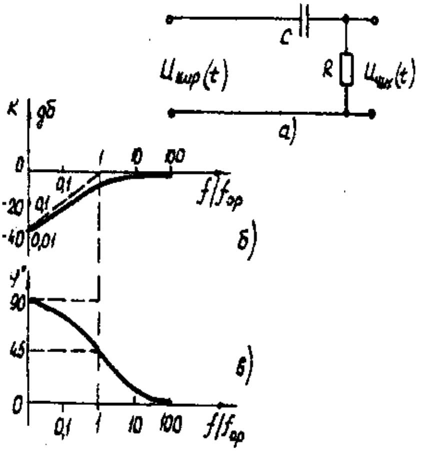
Бу тезликдә фаза сүрүшмәси -45^0 тәшкил едир.

Шәкилдән көрүнүр ки, амплитуд тезлик характеристикасыны ики асимптотун көмәjилә тәсвир етмәк олар:

1) $K(\omega)=1$- бу $f<<f_{op}K(\omega)=0_{дб}$ алчаг тезликликләрдә сигналын сөнмәмәсинә уjғун кәлир.$(K(\omega)=O_{дб})$

2) Jухары тезликләрдә $f<<f_{op}$ оланда $K(\omega)\approx 1/(\omega RC)$, jә'ни күчләнмә әмсалы тезликлә тәрс мүтәнасибдир вә тезлик 10 дәфә артаркән K(ω) 10 дәфә, jә'ни декадада 20дб вә jа октавада 6дб-ә гәдәр азалыр.

3) $K(\omega)=1/\sqrt{2}$ - бу $f=f_{op}$ тезлиjиндә 3дб сөнмәjә уjғун кәлир.



Шәкил 1.20. Алчаг тезлик сүзкәчинин схеми (a) амплитуд–тезлик (*б*) вә фаза-тезлик (*в*) характеристикалары

Jүксәк тезлик сүзкәчи jүксәк тезликли сигналлары дәjишмәдән өтүрүр, кичик тезликләрдә исә сигналын сөнмәсинин вә кириш сигналына көрә фазасынын габаға дүшмәсини тә'мин едир (шәкил 1.20*a*).

Амплитуд-тезлик вә фаза тезлик характеристикалары (шәкил 1.20*б* вә *в*) белә ифадә олунур:

$$K(\omega)=\frac{1}{\sqrt{1+1/\omega^{2}R^{2}C^{2}}};$$

$$\varphi(\omega)=\mathrm{arctg}\frac{1}{\omega RC}$$

Сәрһәд тезлији f_{op}=1/2πRC, фаза сүрүшмәси (f_{op} тезлијиндә) +45^0 тәшкил един.

Амплитуд-тезлик характеристикасы ики асимптотдан ибарәтдир:

1. Јухары тезликләрдә $f>>f_{op}$ K(ω)=1 (сөнмә јохдур).

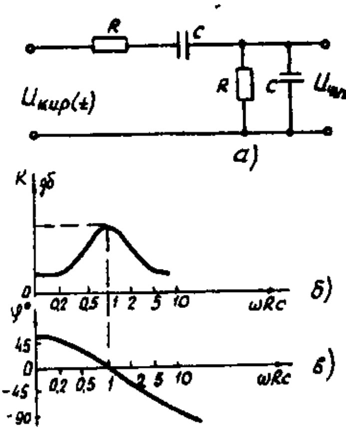
2. Ашағы тезикләрдә $f<<f_{op}$ K(ω)≈ωRC , јә'ни – күчләнмә әмсалы тезлијә мүтәнасибдир, өзү дә асимптотун маиллији декадада +20дб вә ја октавада 6дб тәшлил един.

3. $f=f_{op}$ оланда K(ω)=1/√2, јә'ни амплитудун сөнмәси – 3дб тәшкил един.

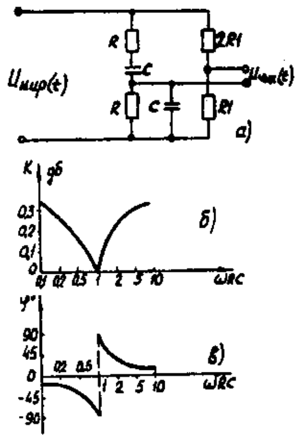
Золағлы сүзкәч ики ардычыл гошулмуш јухары вә ашағы тезлик сүзкәчләриндән ибарәтдир (шәкил 1.21*а*).

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega RC} - \omega RC\right)^2 + 9}};$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{1 - \omega RC}{3\,\omega RC}$$



Шәкил 1.21. Золаглы сүзкәчин схеми (*а*) амплитуд-тезлик (*б*) вә фаза-тезлик (*в*) характеристикалары



Шәкил 1.22. Вин көрпүсүнүн схеми (*а*) амплитуд-тезлик (*б*) вә фаза-тезлик (*в*) характеристикалары

Максимал күчләнмә әмсалы $\omega RC = 1$ гијмәтиндә әлдә едилир. Демәли, резонанс тезлији $f_p = 1/2\pi RC$-ә бәрабәрдир. Бу тезликдә фаза сүрүшмәси сыфра, күчләнмә әмсалы $K_p = 1/3$-ә бәрабәрдир.

Вин көрпүсү RC типли золаглы сүзкәчдир вә мүәјјән тезлик областында сигналлары зәифләдиб сахламаг үчүн истифадә олунур. RC сүзкәчинә әлавә резисторлу бөлүчү гошулмушдур вә бу тезликдән асылы олмајан $1/3u_{кир}$–ә бәрабәр кәркинлик тә'мин едир (шәкил 1.22*а*). Бурада резонанс тезлијиндә чыхыш кәркинлији сыфра бәрабәр, амплитуд тезлик характеристикасы исә минимум гијмәт алыр (шәкил 1.22*б*). $\omega RC \neq 1$ оланда

$$K(\omega) = \frac{1 - (\omega RC)^2}{3[1 - (\omega RC)^2]^2 + (3\omega RC)^2};$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{3\omega RC}{(\omega RC)^2 - 1}$$

Бир мангалы сүзкәчләрин характеристикаларындан даһа јахшы характеристикалар әлдә етмәк үчүн, мәсәлән, сүзкәчин өтүрмә әмсалыны даһа сүр'әтлә азалтмаг үчүн чохмангалы сүзкәчләрдән истифадә олунур. Бунун үчүн *n* алчаг тезлик сүзкәчи ардычыл гошулур. Белә системин өтүрмә функсијасы белә ифадә олунур:

$$W(S) = \frac{1}{(1 + a_1 S)(1 + a_2 S)\ldots(1 + a_n S)}.$$

Бурада $a_1, a_2, \ldots a_n$ – һәгиги мүсбәт әмсаллар, $S = S/\omega_{op}$- нормаллашдырылмыш комплекс дәјишәндир.

Өтүрмә әмсалынын көкләри мәнфи вә һәгиги кәмијјәтләрдир ки, бу да *n* тәртибли RC сүзкәчин характеристикасына ујғун кәлир.

2. ЕЛЕКТРОН ЧИҺАЗЛАРЫН ИШИНИН ФИЗИКИ ӘСАСЛАРЫ

2.1. Електрон чиһазлары һаггында үмуми мә'лумат

Електрон чиһазлары елә гурғулардыр ки, бунларын иши бәрк чисимдә, маједә, вакуумда, газда вә плазмада електрик, истилик, оптика вә акустика һадисәләринин истифадә олунмасына әсасланыр.

Бу чиһазларын јеринә јетирдији функсијалар үмуми шәкилдә ја мә'луматын, ја да енержинин чеврилмәсиндән ибарәтдир.

"Електрон чиһазлары" мәфһуму онунла әлагәдардыр ки, сигналларын вә енержинин чеврилмәси просесләри ја електронларын һәрәкәти һесабына, ја да билаваситә онларын иштиракы илә баш верир. Гурғулар мә'лумат сигналларыны чевирәрәк күчләндирмә, кенерасија, мә'луматы өтүрмә, сахлама, јығма вә мә'луматы күјләрдән ајырма әмәлијјатларыны һәјата кечирирләр.

Електрон гурғулары тә'јинатларына, физики хүсусијјәтләринә, әсас електрик параметрләринә, конструктив–техноложи әламәтләрә, ишчи мүһитин нөвүнә вә с. көрә тәснифатлашдырылырлар.

Сигналларын нөвүндән вә мә'луматын е'мал үсулундан асылы олараг, мөвчуд чиһазлар електрик-чевиричи, електрик-ишыг, фотоелектрик, термоелектрик, акустоелектрик вә механоелектрик гурғулара бөлүнүрләр.

Електрик-чевиричи чиһазларда јалныз електрик сигналлары чеврилир, електрик-ишыг чиһазларында електрик сигналы оптик (ишыг) сигналына, фото вә термоелектрик чиһазларында ујғун олараг, оптик вә истилик сигналлары електрик сигналларына, акустоелектрик-чиһазларында акустик сигналлар електрик сигналларына (вә әксинә) вә механоелектрик чиһазларында механики сигнал електрик сигналына чеврилир. Електрон чиһазларынын ән бөјүк групуну електрикчевиричи чиһазлар тәшкил едир. Бу група мүхтәлиф типли јарымкечиричи диодлар, биполјар вә саһә тә'сирли транзисторлар, тиристорлар, електровакуум лампалары, газбошалма чиһазлары дахилдир.

Електроишыг чиһазларындан ишыг диодларыны, лүминессент конденсаторлары, лазерләри, електрон-шүа боруларыны көстәрмәк олар. Фотоелектрик чиһазлар групуна јарымкечиричи фотодиодлар, фототранзисторлар, фоторезисторлар аид едилә биләр. Акустоелектрик чиһазлардан акустоелектрик күчләндиричиләри, кенераторлары, сүзкәчләри, сәтһи акустик далғалар да кечиикдирмә хәтләрини вә с. көстәрмәк олар.

Ишчи мүһитин нөвүнә көрә електрон чиһазлары јарымкечиричи, електровакуум, газбошалмалы гурғулара бөлүнүрләр.

Тә'јинатына вә јеринә јетирдији функсијаја көрә чиһазлар дүзләндиричи, кенератор, гошучу, чевиричи вә индикасија едән гурғулара бөлүнүрләр. Ишчи тезликләр диапазонуна көрә алчаг, јүксәк вә ифрат јүксәк тезликли чиһазлар олур.

Күчә көрә чиһазлар ашағы, орта күчлү вә күчлү гурғулара бөлүнүрләр. Јухарыдакы мә'луматлардан көрүнүр ки, електрон чиһазлары бир-бириндән кәскин фәргләнән чүрбәчүр групплара бөлүнүрләр. Буна бахмајараг, онларын гурулушунда, ишиндә вә с. охшар чәһәтләр дә чохдур. Она көрә дә бу гурғуларын ишинин әсасландығы физики просесләрин өјрәнилмәси чох вачибдир.

2.2. Електронларын електрик вә магнит саһәләриндә һәрәкәти

Електрон мәнфи електрики јүклү чәһәтдән елементар һиссәчикдир. Атомдакы електронларын сајы маддәнин нөвүндән асылы олур вә маддәнин елементләрин дөври системиндәки атом сырасына бәрабәр олур. Атомларда електронлар нүвә илә вә бир-бири илә гаршылыглы һәрәкәтдә олурлар. Харичи орбитләрдә јерләшән електронлар гоншу атомларын тә'сириндән вә ја башга сәбәбләрдән (мәсәлән, гыздырылма нәтичәсиндә) өз орбитләрини тәрк едә билирләр. Бунун нәтичәсиндә онлар сәрбәст електрон олараг атомлар арасында мүхтәлиф сүр'әтләрлә вә мүхтәлиф истигамәтләрдә һәрәкәт едә билирләр.

Електрик вә магнит саһәсинин көмәјилә вә електронларын һәрәкәт јолуна мадди сәдд гојмагла онларын һәрәкәтинә тә'сир етмәк вә нәтичәдә онларын ахыныны идарә етмәк мүмкүндүр.

Електрик саһәсиндә јерләшән електрона F_E=-qE гүввәси тә'сир едир. Бурада $q=1,6\cdot10^{-19}$ Кл електронун јүкү; Е-електрик саһә кәркинлијинин векторудур. Мәнфи ишарәси ону көстәрир ки, F_E гүввәси електрик саһә кәркинлији векторунун (Е) истигамәтинин әксинә јөнәлмишдир.

Електрик саһәсинин тә'сириндән електрон һәрәкәтини сүр'әтләндирә, јавашыда вә истигамәтини дәјишә биләр.

Магнит саһәсиндә һәрәкәт едән електрона онун һәрәкәт истигамәтинә перпендикулјар олан F_M=-q(vB) гүввәси тә'сир едир. Бурада v електронун һәрәкәт сүр'әти вектору, В-магнит саһәсинин индуксијасыдыр.

Магнит саһәсинин тә'сириндән јалныз електронун һәрәкәт сүр'әтинин истигамәтини дәјишмәк мүмкүндүр.

Әкәр електрон електрик вә магнит саһәси тә'сир едән фәзада һәрәкәт едәрсә, она нәтичәви $F=F_E+F_M$=-q[E+vB] гүввәси тә'сир едир.

Бу гүввәнин тә'сириндән електрон һәм енержисини (сүр'әтини), һәм дә һәрәкәт трајекторијасыны дәјишә биләр.

2.3. Електрон емиссијасынын нөвләри

Вакуумда вә ја газда електрик вә магнит саһәсиндә һәрәкәт едән сәрбәст електрон ахыны јаратмаг үчүн електронун бәрк чисимдән кәнара чыхмасыны тә'мин етмәк лазымдыр. Буну бәрк чисмә кәнар мәнбәдән енержи вермәк јолу илә һәјата кечирмәк олар.

Кәнардан верилән енержинин (истилик, фото, електрик вә с.) тә'сириндән електронларын бәрк чисимдән кәнара чыхмасы һадисәсинә електрон емиссијасы дејилир.

Електронун бәрк чисимдән белә кәнара чыхмасы үчүн о, кристаллик гәфәсәнин ионларынын чазибә гүввәләрини дәф етмәли, башга сөзлә мүәјјән иш көрмәлидир. Бу ишә електронун чыхыш иши дејилир вә бу иш волтларла өлчүлүр.

Бәрк чисмә тәтбиг едилән енержинин нөвүндән асылы олараг електрон емисијасынын дөрд нөвү олур: термоелектрон, фотоелектрон, електростатик вә икинчи електрон емиссијасы.

Термоелектрон емиссијасы маддәнин гыздырылмасы нәтичәсиндә баш верир. Температурун мүәјјән гијмәтләриндә електронларын алдығы истилик енержиси онларын чыхыш ишини јеринә јетирмәси үчүн кифајәт едир.

Термоелектрон емиссијасында чәрәјан сыхлығынын чисмин температурундан асылылығы belә ифадә олунур: $J=A_0T^2e^{A/кT}$.

Бурада $A_0=10\div300А/(cm^2K^2)$ бәрк чисмин материалындан асылы сабит кәмијјәт; К- Болсман сабити, А-електронун чыхыш ишидир.

Емиссијанын бу нөвү електровакуум чиһазларында вә електрон-шүа боруларында истифадә олунур.

Фотоелектрон емиссијасы маддәнин сәтһинә тә'сир едән кәнар електромагнит шүаланмасы илә әлагәдардыр. Белә емиссијанын баш вердији чисмә (катода) фотоелектрон катоду вә ја фотокатод дејилир.

Фотоелектрон емисијасынын әсасыны А.Г.Столетовун вә А.Ејнштејнин тапдығы ганунлар тәшкил едир. Столетов ганунуна көрә фоточәрәјан чисми шүаландыран ишыг селинә мүтәнасибдир: $J_ф=кФ$ (бурада к мүтәнасиблик әмсалыдыр). Емиссија олунмуш електронларын кинетик енержиси оптик рәгсләрин тезлији (ν) илә мүәјјән едилир вә Ејнштејн ганунуна әсасән белә тапыла биләр: $mv^2/2=h\nu-A$.

Бурада, h-Планк сабити, А-чыхыш иши, ν-емиссија едилмиш електронларын сүр'әтидир.

Кинетик енержинин сыфра бәрабәр олдуғу ($h\nu_{кр}=A$) ишыг шүасынын тезлијинә фотоелектрон емиссијасынын һәдд тезлији вә ја фотоеффектин гырмызы далғалы сәрһәдди дејилир.

Маддәләрин чыхыш ишләри мүхтәлиф олдуғундан ајрыајры маддәләрдән фотоелектрон емиссијасы мүәјјән бир $\nu_{кр}$ тезликләрдә баш верир. Фотокатодларын һәссаслығы емиссијаедилмиш електронларын чисмин үстүнә дүшән фотонларын сајына нисбәти илә гијмәтләндирилир.

Емиссијанын бу нөвү фотоелектрон чиһазларында истифадә едилир.

Електростатик (автоелектрон) емиссија катодун сәтһинә тә'сир едән гүввәтли електрик саһәси илә әлагәдардыр. Катодун

jахынлығында она нисбәтән бөјүк мүсбәт потенсиала малик електрод јерләшдириләрсә електрик саһәсинин тә'сириндән катодун сәтһиндә енеркетик сәддин галынлығы хејли азалыр. Електрик саһә кәркинлијинин мүәјјән бир гијмәтиндә електронларын бир чоху катодун сәтһиндән кәнар фәзаја чыха биләр вә бөјүк емиссија чәрәјаны јарана биләр. Бу һадисәјә електростатик вә ја автоелектрон емиссијасы дејилир. Емиссијанын бу нөвүнү әлдә етмәк үчүн електрик саһә кәркинлији 10^6В/см-дән јүксәк олмалыдыр.

Икинчи електрон емиссијасы бәрк чисмин сәтһинин сүр'әтли јүкләнмиш һиссәчикләрлә (мәсәлән електронларла) бомбардман етдикдә баш верир. Әкәр бомбардман үчүн електрон сели истифадә олунарса, сәтһдән вуруб чыхарылан икинчи електронларын сајынын сәтһә дүшән илкин електронларын сајына нисбәтинә икинчи електрон емиссијасы әмсалы дејилир: $\sigma=n_2/n_1$.

Металлар вә јарымкечиричиләр үчүн $\sigma\approx1$ олур, чыхыш иши кичик олан елементләрдән ибарәт мүрәккәб бирләшмәләрдә $\sigma>1$ олур.

Икинчи електрон емиссијасы һадисәси електровакуум, газбошалма, фотоелектрик вә башга чиһазларда баш верир.

2.4. Газларда електрик чәрәјаны

Әввәлчә газларда електрик бошалмасынын һәр бир нөвү үчүн характерик олан үмуми физики просесләри өјрәнәк. Газ мүһитиндә илкин сәрбәст електронлар вә ионлар термоелектрон, фотоелектрон емиссијасы нәтичәсиндә, мүхтәлиф тәбиәтли шүаланмалар вә кәнар ишыг селләринин тә'сириндән јарана биләрләр. Әкәр газбошалмалы чиһазын електродларына (анода мүсбәт олмагла) кәркинлик вериләрсә електронлар анода, ионлар исә катода тәрәф һәрәкәтә башлајачаглар.

Електронлара електродлararасы фәзада нејтрал газ атомларыны һәјәчанландыра (ионлашдыра) биләчәк гәдәр енержи верән анод вә катод арасындакы потенсиаллар фәргинә һәјәчанланма (ионлашма) кәркинлији дејилир. Катоддан чыхан илкин електронлар електрик саһәсиндә сүр'әтләнәрәк газ молекулларыны вә атомларыны ионлашдырыр. Бунун нәтичәсиндә

әлавә сәрбәст електронлар јараныр ки, бунлар да анода тәрәф һәрәкәт заманы ионлашдырма просесиндә иштирак едәчәкдир. Ионлашма нәтичәсиндә әмәлә кәлән ионлар да катода тәрәф һәрәкәт едәрәк онун сәтһиндән јени електронлар (икинчи) гопарырлар ки, бунлар да ионлашдырмада иштирак едирләр. Беләликлә, електронларын сајы селвари шәкилдә артараг дајаныглы бир вәзијјәтә кәлиб чыхыр ки, бу вәзијјәт дә електрик саһә кәркинлији, газын тәзјиги, бошалма каналынын диаметри, газын нөвү, кәнар ионлашдырычы мәнбәнин олмасы, катодун температуру вә материалы, харичи дөврәнин мүгавимәти илә мүәјјән едилир. Чох вахт газбошалмасы заманы електродлараарасы фәзанын һәр бир ваһид һәчминдә електронларын вә ионларын һәчми јүкләри бир-биринә бәрабәр олур. Ионлашмыш газын белә вәзијјәтинә газбошалма плазмасы дејилир.

Мүсбәт ионлар електронларын јүкләрини компенсасија етмәклә електродлар арасындакы чәрәјаны артырырлар. Үмуми чәрәјанын 99,75%-и електродларын, 0,25%-и исә ионларын пајына дүшүр. Буна бахмајараг, мүсбәт ионларын мөвчудлуғу бошалма аралығынын кечиричилијинә чох бөјүк тә'сир көстәрир.

Сәрбәст електронларла вә ионларла долу фәзада онлар бири-бири илә тоггушурлар вә бунун нәтичәсиндә нејтрал атомлар јараныр. Бу просесә рекомбинасија дејилир. Рекомбинасија адәтән спектрин көрүнән һиссәсиндә фәзаја енержи шүаланмасы илә мүшајиәт едилир. Бу заман газ ишыг сачыр. Тәзә ионлашманын баш вермәдији рекомбинасија просесинә деионлашдырма (ионсузлашдырма) дејилир.

Електрик бошалмасынын јаранмасы вә сахланмасы үчүн електродлар арасында елә електрик саһәси јарадылмалыдыр ки, о, електронлары газ атомларыны ионлашдыра биләчәк дәрәчәдә сүр'әтләндирә билсин. Бу кәркинлијин гијмәти газын нөвүндән, тәзјигиндән вә електродлар арасындакы мәсафәдән асылыдыр. Дикәр тәрәфдән бошалма аралығында сәрбәст електронларын лазыми консентрасијасыны тә'мин едән емиссија мәнбәјинин олмасы вачибдир.

Бунунла әлагәдар олараг сәрбәст вә гејри-сәрбәст бошалма мөвчуд олур. Сәрбәст бошалманын әмәлә кәлмәси вә давам етмәси үчүн кәнар емиссија мәнбәји тәләб олунур. Геј-

ри-сәрбәст бошалмада исә бунун үчүн кәнар емиссија мәнбәјинин (термокатод, фотокатод вә ионлашдырычы шүаланма) олмасы тәләб олунур.

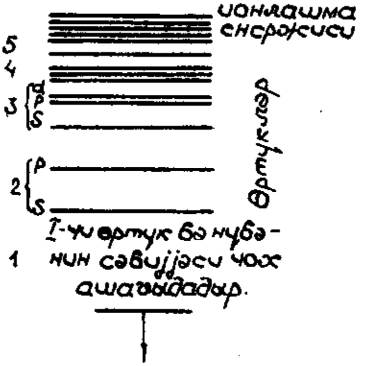
Гејд етмәк лазымдыр ки, електродларарасы фәзада газын тәзјиги 1,133-133Па һәддиндә олур. Әсасән, тә'сирсиз газлар (неон, аргон), һидрокен вә һәм дә чивә бухары ишләдилир. Газын нөвү ишыгланманын рәнкини мүәјјән едир. Ионлашма вә рекомбинасија һадисәләри чиһазларын ән актив һиссәси олан катод әтрафы саһәдә баш вердијиндән ишыгланма катод әтрафында баш верир.

Газбошалма фәзасында чәрәјан ахаркән баш верән бүтүн бу просесләр јығымына електрик бошалмасы дејилир. Чиһаз дахилиндә јаранан шәраитдән асылы олараг бошалманын мүхтәлиф нөвләри олур.

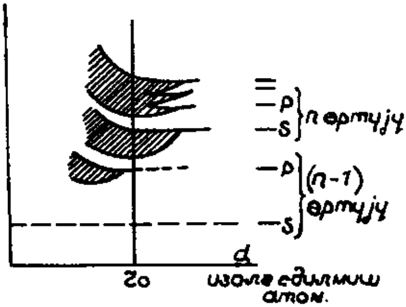
2.5 Бәрк чисмин зона нәзәријјәсинин әсаслары. Енержи зоналары

Зона нәзәријјәси јарымкечиричиләрин кәмијјәтчә тәһлилинин әсасыны тәшкил едир. Һәр һансы изолә олунмуш атом електронлар үчүн ичазә верилмиш дискрет енержи спектри илә характеризә олунур (шәкил 2.1). 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 атомларарасы 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 2.2).



Шәкил 2.1. Изолә олунмуш атомун енержи сәвијјәси



Шәкил 2.2. Ајрыча атомун ичазә верилмиш енержи сәвијјәсинин чисмин ичазә верилмиш енержи сәвијјәсинә чеврилмәси

Беләликлә, атомлararасы мәсафәси r_0 олан кристал үчүн мүәјјән зона диаграмы әлдә едилир. Бу диаграмда ичазә верилмиш зоналарын ардынча гадаған олунмуш зоналар кәлир (шәкил 2.3). Бу зоналарын ени бир нечә електронволт (еВ) һәддиндә олур вә бәрк чисимдә атомларын сајындан (чисмин өлчүләриндән) асылы олмур.

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 2.2).

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.

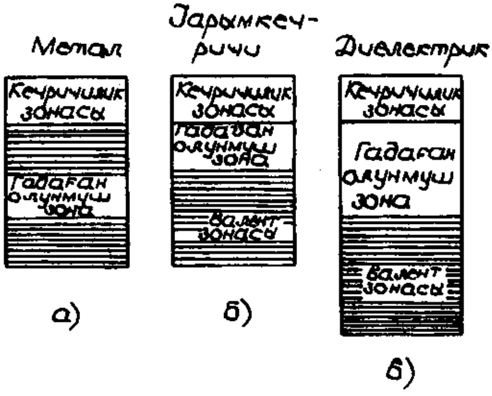
Бәрк чисимдә кечиричилик о вахт јараныр ки, електрон даһа јүксәк гоншу енержи сәвијјәсинә кечә билсин. Демәли, кечиричиликдә јалныз азад сәвијјәләри олан зоналарын електронлары иштирак едә биләр. Белә азад зоналар јухары ичазә верилмиш зоналарда һәмишә мөвчуд олурлар, чүнки изолә едилмиш атомда јүксәк 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 2.3). 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.

Диелектриклəрлə јарымкечиричилəрин фəрги ондадыр ки, диелектриклəрдə гадаған олунмуш зонанын ени даһа бөјүкдүр. Кечиричилик зонасы демəк олар ки, бүтөв гəбул едилдијиндəн бурада електронларын енержиси вакуумда изолə олунмуш електронунку кими арамсыз дəјишə билəр. Она көрə кечиричилик зонасындакы електронлара сəрбəст електронлар дејилир. Сəрбəстлик бу һалда јалныз чисмин дахилиндə јердəјишмə имканыны нəзəрдə тутур.



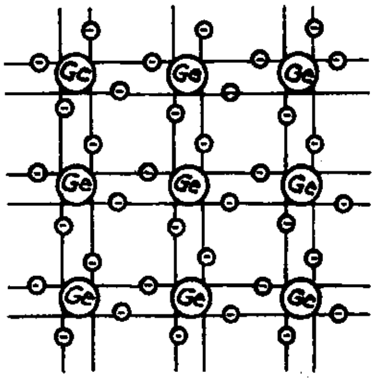
Шəкил 2.3. Метал (а), јарымкечиричи (б) вə диелектрикин (в) T=0°K-дə зона структуру

3. ЈАРЫМКЕЧИРИЧИЛӘР ЕЛЕКТРОНИКАСЫНЫН ӘСАСЛАРЫ

3.1. Јарымкечиричи материаллар һагтында 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.

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.



Шәкил 3.1. Керманиумун тетраедрик кристал гәфәсәсинин атомларын валент әлагәләрини көстәрән "мүстәви" еквиваленти

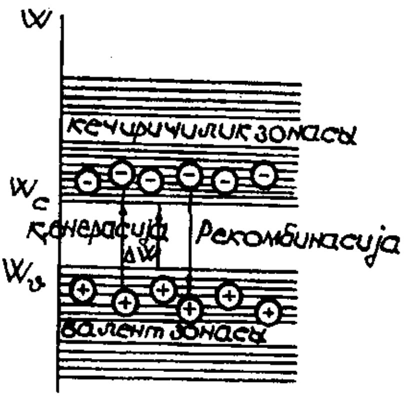
Ән кениш јајылмыш јарымкечиричи материаллар дөври системин IV групуна аид олан керманиум (Ge) вә силисиумдур (Si). Бунлардан башга селен (Se), галлиум арсенид (GaAs), галлиум фосфид (GaP), силисиум карбид (SiC) вә башгалары да кениш истифадә олунур. Јарымкечиричинин, мәсәлән керманиумун, кристал гәфәсәси 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 3.1). Нүвәләрин мүсбәт јү-

ку електронларын јүкү илә компенсасија едилир вә кристал үмумиҗјәтлә 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.

3.2. Јарымкечиричинин мәхсуси кечиричилији вә онун температурдан асылылығы

Јарымкечиричиләрдә електрик кечиричилији механизми бәрк чисмин зона нәзәријјәсинә әсасән изаһ едилә биләр. Дејилдији кими, мүтләг сыфыр температурда вә һеч бир ашгар олмајанда бүтүн електронлар атомларарасы 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 3.2. 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 3.2). Нәтиҹәдә 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 електронун 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 1$см^3$ 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 дашыјычыларынын 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°С-дә 3500см²/Всан); μ_p-дешикләрин јүрүклүјүдүр (керманиум үчүн 1700см²/Всан). Јүрүклүк 1В/см саһә кәркинлијиндә јүклү һиссәчикләрин истигамәтләнмиш сүр'әтинә дејилир. Бу сүр'әт онларын сәрбәст гачыш мүддәтинә мүтәнасибдир: $\mu = t_{сәрб} = l_{ор}/\upsilon_{ор}$; $l_{ор} \approx 1/T$ 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 јараныр. 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:

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

μ_0-отаг температурундакы (Т) јүрүклүкдүр.

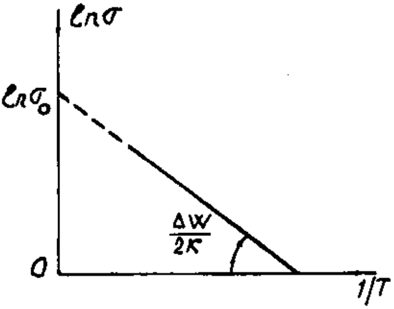
Буну нәзәрә алмагла кечиричилији тә'јин едәк:

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

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.

Көрүндүјү кими температур артдыгча јарымкечиричинин кечиричилији артыр (металларда азалыр). Кечиричилијин температурдан асылылығы шәкил 3.3-да көстәрилмишдир.

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



Шәкил 3.3. Мәхсуси кечиричилијин температурдан асылылығы

3.3. Јарымкечиричинин ашгар кечиричилији вә онун температурдан асылылығы

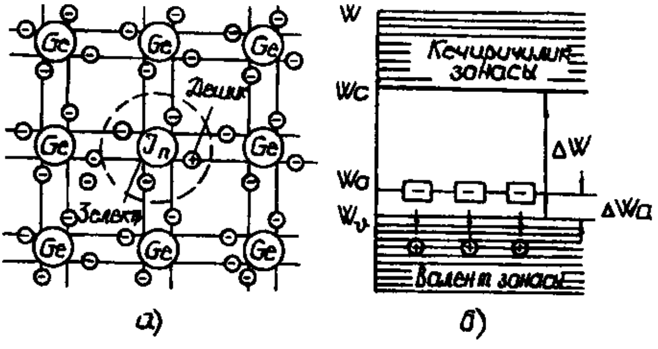
Јарымкечиричи чиһазларын иши бир гајда оларат ашгар кечиричилији һадисәсинә әсасланыр.

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.

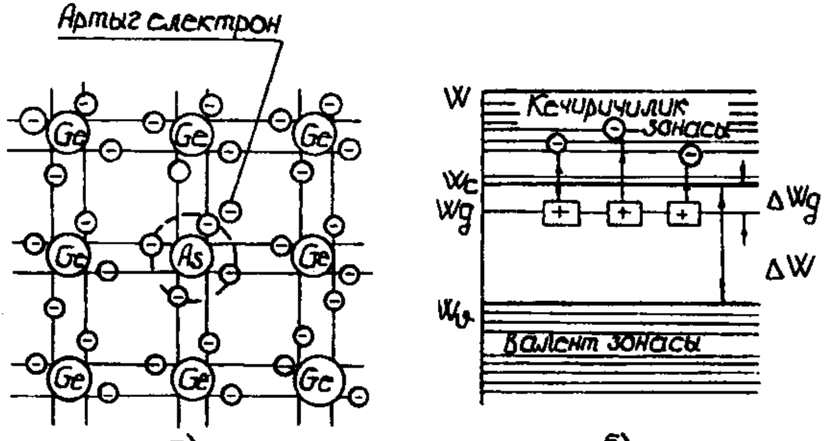
Әкәр керманиума ашгар кими 5-валентли арсен әлавә едиләрсә, о, керманиумун гоншулугда јерләшән дөрд атому илә ковалент әлагә јарадар, онун 5-чи електрону артыг (сәрбәст) галар (шәкил 3.4*а*) вә о кечиричилијин јаранмасында иштирак едә биләр. Бу һалда кечиричилик зонасынын ашағы һиссәсинин јахынлығында әлавә енержи сәвијјәси-донор сәвијјәси $W_д$ јараныр (шәкил 3.4*б*).



Шәкил 3.4. 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 $\Delta W_\partial = W_c - W_\partial = 0,1eB$ 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.



Шәкил 3.5. 5-валентли ашгар атомунун кристал гәфәсиндә керманиум атомуну әвәз етмәси (*а*) вә гадаған олунмуш зонада донор сәвијјәсинин јаранмасы (*б*)

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 3.5*a*). 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 3.5*б*). Индиум үчүн гадаған олунмуш зонанын ени $\Delta W_a = W_c - W_v = 0{,}16 eB$ олдуғундан отаг температурунда бу азад енержи сәвијјәләри асанлыгла електронларла тутулур, валент зонасында исә бош сәвијјәләр – дешикләр әмәлә кәлир.

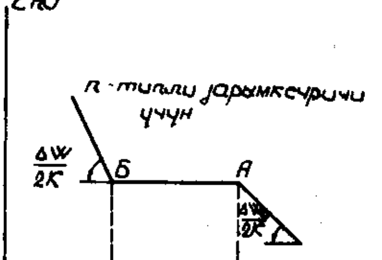
Үчвалентли ашгар әлавә едиләндә кристалда дешикләрин сајы електронлардан чох олур. Бу һалда јарымкечиричидә дешик кечиричилији үстүнлүк тәшкил едир, чүнки електронларын сајы әввәлки кими мәхсуси кечиричиликлә мүәјјән едилир. Белә јарымкечиричидә дешикләр әсас, електронлар исә гејри-әсас јүкдашыјычылары һесаб едилир. Белә артыг дешикләр әмәлә кәтирән ашгара "акцептор", јарымкечичиријә 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 исә јарымкечиричи кристала нә гәдәр ашгар әлавә едилдијини бир мисалла арашдыраг.

Керманиумун $1см^3$ һәчминдә 10^{22} атом олур вә 20^0C-дә 10^{13} сәрбәст електрон вә о гәдәр дә дешик әмәлә кәлир. Көрүнүр ки, јүкдашыјычыларынын сајы атомларын сајынын милјон вә милјардда бир фаизини тәшкил едир. (Гејд едәк ки,металларда сәрбәст електронларын сајы атомларын сајына јахындыр). Јарымкечиричидә ашгар кечиричилијинин үстүнлүк тәшкил етмәси үчүн $1см^3$ һәчмдәки ашгар атомларынын сајы мәхсуси јүк дашыјычыларынын сајындан чох олмалыдыр. Мәсәлән, керманиум үчүн 20^0C-дә ашгар атомларынын сајы $1см^3$ һәчмдә 10^{13}-дән чох олмалыдыр. Бу о демәкдир ки, керманиум милјард атомуна гаршы бир ашгар атому әлавә олмалыдыр. Буна бахмајараг, јарымкечиричинин кечиричилијинин характери вә гијмәти кәскин дәјишир.

Ашгарлы јарымкечиричидә $n \cdot p = n^2$ шәрти өдәнир. Рекомбинасија нәтичәсиндә гејри-әсас јүк дашыјычыларынын сајынын n_i-дән аз олмасына бахмајараг, ашгарлы јарымкечиричидә јүкдашыјычыларынын үмуми сајы мәхсуси јарымкечиричидәкиндән ($2n_i$) чох олур. Бу исә ашгарлы јарымкечиричинин мүгавимәтинин азалмасына кәтириб чыхарыр.

Ашгарын әлавә олунмасы кечиричилијин температурдан асылылығынын да дәјишмәсинә сәбәб олур (шәкил 3.6).



Шәкил 3.6. Ашгарлы јарымкечиричинин кечиричилијинин температурдан асылылығы

Әјридә I саһә алчаг температурлар үчүн характерикдир. Бурада кристал гәфәсәсинин рәгсләринин енержиси ΔW_∂-дән чох, ΔW-дән аздыр. Бу температурларда анчаг тәк-тәк (јүксәк енержиси олан) електронлар валент зонасындан кечиричилик зонасына кечә биләрләр. Буна көрә I саһәдә мәхсуси кечиричиликлә әлагәдар олан кечиричилик нәзәрә

алынмыр вә кристалын електрик кечиричилији донор сәвијјәсиндән кечиричилик зонасына кечән електронларла мүәјјән едилир. "А" нөгтәси о температура аиддир ки, онда бүтүн ашгар електронлары кечиричилик зонасына кечмишдир, анҹаг 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.

3.4. Електронларын јарымкечиричиләрдә пајланмасы вә һәрәкәт етмәси ганунлары

Бәрк ҹисимдә иҹазә верилмиш зоналарын һүндүрлүјү бојунҹа енержи сәвијјәләри бәрабәр пајланмыр: онларын сыхлығы гадаған олунмуш зонанын сәрһәддиндән кечиричилик вә валент зоналарынын ичәрисинә доғру дәјишир. Беләки, W енержиси олан һәр бир сәвијјәјә мүәјјән P(W) ујғун кәлир. P(W) бәрк ҹисмин ваһид һәҹминә 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 дешикләр 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:

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

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 беләифадә 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.

3.5. Електрон-дешик кечидинин хүсусијјәтләри. Кечидин волт - ампер характеристикасы

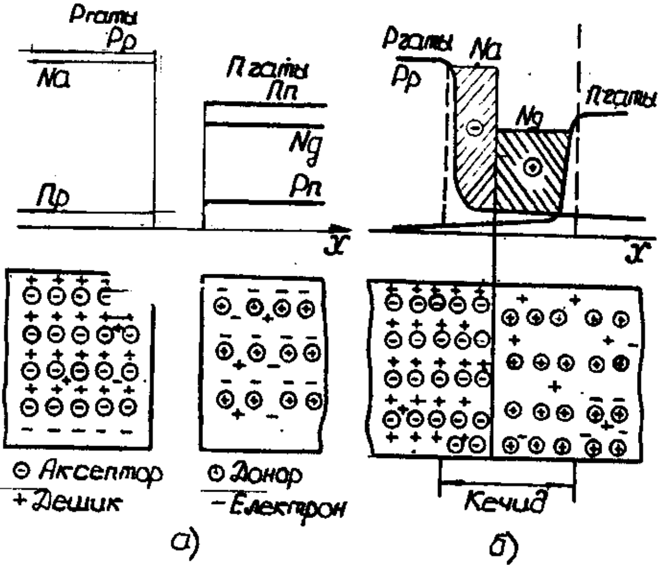
Бир тәрәфи *n* типли, дикәр тәрәфи *p* типли кечиричилијә малик олан ики гоншу јарымкечиричи саһәсинин тәмас (контакт) сәрһәддинә електрон-дешик кечиди вә ја *p-n* кечид дејилир.

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. Мүәјјәнлик үчүн белә гәбул едилир ки, *p* тәбәгәси *n* тәбәгәсинә нисбәтән һәмишә даһа кичик мүгавимәтә малик олур (p_p>>n_n).

Тәмасдан габаг һәр ики тәбәгәдә сәрбәст јүкдашыјычыларынын вә ашгарларын консентрасијалары шәкил 3.7*a*-да көстәрилмишдир. Јахшы тәсәввүр етмәк үчүн консентрасијаларын фәрги һәгигәтдә олдуғундан хејли аз көтүрүлмүшдүр.



Шәкил 3.7. *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 сәр-

бәст електронларын консентрасијасы азалачаг вә донор атомларынын компенсасија едилмәмиш мүсбәт јүкү өзүнү көстәрәчәкдир (шәкил 3.7б).

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

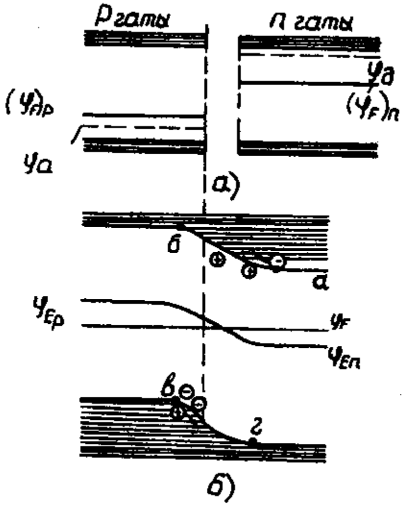
Белә, компенсасија едилмәмиш фәза јүкләринин јарандығы саһәјә кечид саһәси дејилир вә онун ени онда бир микронла өлчүлүр. Мүтәһәррик јүкдашыјычыларынын һәр ики һиссәдә консентрасијасы кәскин азалдығындан бу саһәни һәм дә касыблашмыш вә ја түкәнмиш саһә адландырырлар.

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 акцепторларын консентрасијасы донорларын консентрасијасындан чох олдуғундан ($N_a>N_д$), 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 3.8*а*-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 3.8*б*).



Шәкил 3.8. *р* вә *п* гатларынын тәмасда олмадығы (*а*) 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 *п* гатындакы електронлара чох кичик илкин енержи лазымдыр ки, а-б саһәсиндәки диклији дәф едиб сол тәрәфә кечсинләр. *р* 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, *р* гатынын дешикләри кифајәт гәдәр илкин енержијә малик олмалыдырлар ки, "мајенин" сыхыб-чыхарма гүввәсини дәф едиб в-г саһәсиндә потенсиал сәддин сәвијјәсинә дүшә билсинләр. *п* гатынын дешикләри исә сәрһәддә чатарларса "үзәрәк" асанлыгла сол тәрәфә кечә биләрләр.

п гатынын аз енержили електронлары вә *р* гатынын аз енержили дешикләри сәдди кечә билмирләр вә елә бил ки, она дәјиб кери гајыдырлар. Бу дашыјычыларын сәрһәдә кирмә мәсафәси онларын енержисинә мүтәнасибдир. Шәкил 3.8*б*-дә сәрһәд саһәсиндә солда ионлашмыш аксептор атомлары, сағда исә ионлашмыш донор атомлары көстәрилмишдир. Мә'лумдур

ки, онларын сәвијјәләри ујғун гатын дәринлиjи бојунҹа јерләшмишләр. Онлары јалныз сәрһәд јахынлығында кәстәрилмәси илә бу саһәдә ионларын јүкүнүн компенсасиjа олунмадығы гејд олунур. Доғрудан да "а" нөгтәсиндән солда Ферми сәвијјәси илә кечиричилик зонасынын диби арасындакы мәсафә кетдикҹә артыр. Бу о демәкдир ки, а-б саһәсиндә бу зонанын електронларла тутулма еһтималы азалыр. Она көрә дә әкәр "а" нөгтәсиндән сағда електронлар донор ионларын мүсбәт јүкүнү компенсасиjа едә биләр вә *n* гаты нејтрал олурса, "а" нөгтәсиндән солда електронларын консентрасиjасы кәскин азалыр вә беләә компенсасиjа баш вермир. Ејни сөзләри "в" нөгтәсиндән сағдакы аксептор ионларынын јүкү һаггында да демәк олар.

Кечиди тәһлил едәркән кечидин ичәрисиндә сәрбәст јүкдашыjычыларынын консентрасиjасынын сыфра бәрабәр, кечиддән кәнарда исә мүвазинәтдә олдуғу гәбул едилир. Даһа доғрусу һесаб едилир ки, електрик саһәси јалныз кечид саһәсиндә мәһдудлашыр.

Белә идеаллашдырылмыш пилләвари кечид үчүн мүвазинәт һалында потенсиал сәддинин һүндүрлүjү белә тә'јин едилир:

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

φ_{Ep} вә φ_{En} - гатларын дәринлиjиндә ујғун електростатик потенсиаллардыр. Бу потенсиаллары гатлардакы сәрбәст електронларын консентрасиjасы илә ифадә етсәк

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

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

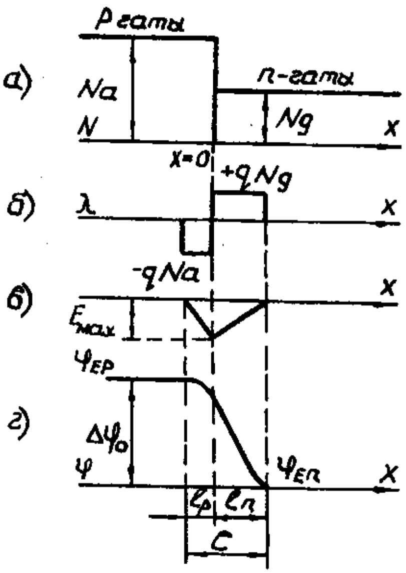
аларыг.

Нәтиҹәдә потенсиал фәрги кими $\Delta\varphi_0 = \varphi_T \ln\frac{n_n}{n_p}$ тә'јин олунур. Бурада N_c кечиричилик зонасынын 1см^3 һәҹминдә ефектив вәзиjjәтләр сыхлығыдыр. Физики мә'насына көрә N_c

$\varphi_F \to \varphi_c$ һалында јарымкечиричидә електронларын максимал консентрасијасыдыр. $n \cdot p = n^2_i$ 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 3.9. Пиллавари *p-n* кечиддә мүвазинәт һалында ашгарларын консентрасијасынын (*а*), јүкләрин сыхлығынын пајланмасы (*б*) вә саһә кәркинлијинин (*в*)

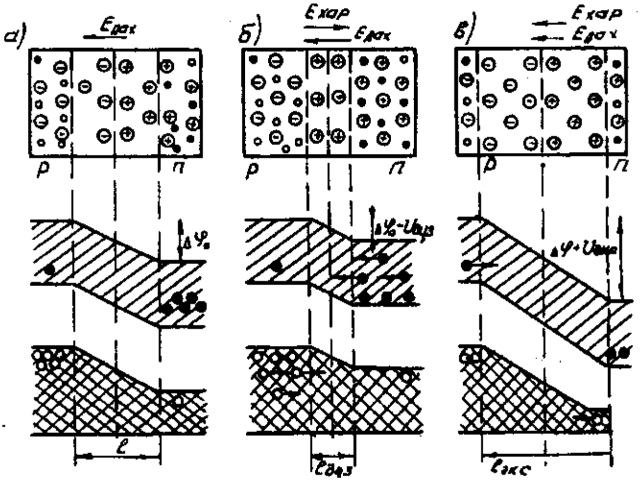
Јухарыдакы мүлаһизәләр тәмамилә кечидин мүвазинәт һалына аиддир. Бу һал үчүн ашгарларын консентрасијасынын, јүкләрин сыхлығынын, саһә кәркинлијинин вә потенсиалын пајланмасы шәкил 3.9-да көстәрилмишдир.

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 зоналары һәмишә *p* гатына ујғун зоналара нисбәтән ашағыда олмалыдыр.

Шәкил 3.10*а*-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 $E_{дах}$ экс оларса (шәкил 3.10*б*) онда кечиддәки нәтичәви көркинлик вә потенсиал сәддинин һүндүрлүјү азалар.



Шәкил 3.10. 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 беләифадә олунур:

$$p_n = p_{n_0} e^{U_{хар}/\varphi_T}; \quad n_p = n_{p_0} e^{U_{хар}/\varphi_T}.$$

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:

$$\Delta p_n = p_{n_0}\left(e^{U_{xap}/\varphi_T} - 1\right);$$

$$\Delta n_p = n_{p_0}\left(e^{U_{xap}/\varphi_T} - 1\right).$$

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 белә 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 3.10*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 $p_п$ вә $n_р$ 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 белә гошулмасына әкс истигамәтдә гошулма дејилир. Кечиддән ахан чәрәјанын аналитик ифадәси беләдир:

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

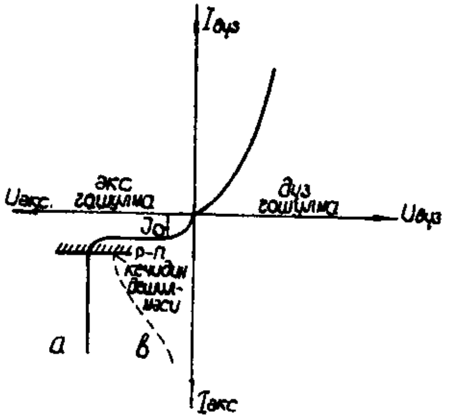
Бурада J_0-кечиддән ахан әкс чәрәјандыр. Она истилик чәрәјаны да дејилир. Онун гијмәти температурун сабит гијмәтиндә јарымкечиричинин физики хүсусијјәтләри илә мүәјјән едилир.

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 3.11-дә көстәрилмишдир. Көрүндүјү кими кәркинлијин мүсбәт гијмәтләриндә (дүз гошулма) $J_0 e^{\frac{U_{хар}}{\varphi_T}}$ һасили артыр, мәнфи гијмәтләриндә исә сыфра гәдәр азалыр вә чәрәјан J_0-а бәрабәр олур. Әкс чәрәјанын гијмәти дүз чәрәјандан чох-чох кичик олду-

ғундан һесаб олунур ки, кечид чәрәјаны биртәрәфли кечирмәк (вентил) хүсусијјәтинә маликдир.

Әкс кәркинлијин јүксәк гијмәтләриндә әкс чәрәјанын гијмәти артыр вә әкәр о, мәһдудлашдырылмаса кечид "дешилир" вә бир тәрәфли чәрәјан 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 3.11. *p-n* кечидинин волт-ампер характеристикасы.

Тунел вә селвари дешилмә електрик саһәсинин мөвчудлуғу илә әлагәдардыр. Истилик дешилмәси кечиддә сәпәләнән күчүн артмасы вә бу заман сәпәләнән истиликлә әкс чәрәјан аханда кечиддә ајрылан күч арасында таразлығын позулмасы илә әлагәдардыр. Сәтһи дешилмә кристалын үзәриндә сәтһ јүкүнүн мөвчуд олмасы илә әлагәдардыр.

Дешилмәнин нөвләри һаггында гыса мә'лумат верәк.

Тунел дешилмәси. Јүксәк електрик саһәсинин тә'сириндән јарымкечиричидә енержи зоналары әјилир вә елә бил ки, гадаған олунмуш зона енсизләшир. Бунун нәтичәсиндә 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 экс 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 кечиричилик зонасына кечән електронларын сајынын артмасы демәкдир ки, бу да гадаған олунмуш зонанын ененин 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 белә 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 артығча 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 јаранаыр. Диффузија тутуму кечидин ишинә чох тә'сир етмир, чүнки о һәмишә кечидин кичик дүз мүгавимәти илә шунтланмыш олур.

3.6. 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.

3.6.1. Јарымкечиричи - метал кечиди

Илк јарымкечиричи чиһазлар (нөгтәви тәмаслы диодлар) јарымкечиричинин металла тәмасы әсасында гурулмушдур. Тәчрүби јолла тапылмышдыр ки, метал ијнәни тәбии јарым-

кечиричи минерал кристалларынын бә'зиләр илә тохундурмаг нәтичәсиндә зәиф дәјишән сигналлары дүзләндирмәк олар. Белә чиһазлар чох садә вә е'тибарсыз ишләмәләринә бахмајараг мүасир транзистор електроникасынын инкишафына вә даһа мүкәммәл нөгтәви диодлар јарадылмасына тәкан вермишләр. Интеграл схемләрдә металын јарымкечиричи илә (силисиумла) тәмасы ики чүр истифадә олунур: 1) интеграл схемин елементләриндә чәрәјан вә кәркинликләри тәтбиг едән гејри-дүзләндиричи омик тәмаслар; 2) хүсуси дүзләндиричи тәмаслар (Шоттки диодлары).

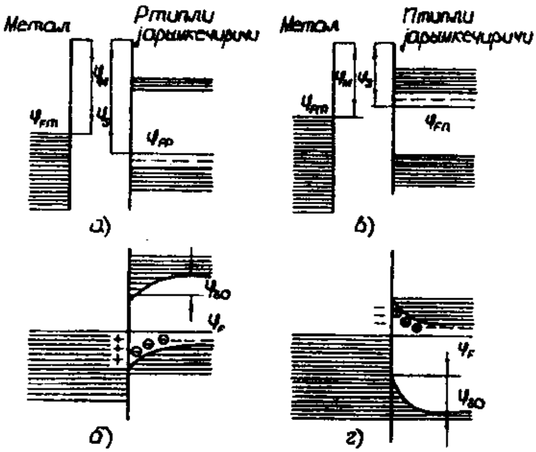
Метал-јарымкечиричи тәмасын структуру һәр шејдән әввәл һәр ики гатда Ферми сәвијјәләринин гаршылыглы јерләшмәси илә мүәјјән едилир.

Шәкил 3.12-дә метал вә јарымкечиричи гатлары тәмасда олмаздан габагкы (*а,в*) вә тәмасдан сонракы (*б,г*) һаллар үчүн зона диаграмлары көстәрилмишдир.

Шәкил 3.12 (*а-в*)-дә көстәрилән диаграмлар $\varphi_F > \varphi_{Ep}$ һалы үчүн чәкилмишдир. (φ_E-металда Ферми сәвијјәсидир). Бу о демәкдир ки, јарымкечиричинин кечиричилик зонасында јерләшән һәр һансы φ сәвијјәсинин електронла тутулма еһтималы металда јерләшән ејни сәвијјәнин тутулма еһтималындан аздыр. Башга сөзлә, јарымкечиричинин кечиричилик зонасы металын она ујғун саһәсинә нисбәтән електронларла пис долур. Она көрә тәмас јаранан кими електронларын бир һиссәси металдан *p* типли јарымкечиричијә кечир. Јарымкечиричинин сәтһә јахын гатында әлавә електронларын јаранмасы рекомби насијаны сүр'әтләндирир. Бунун нәтичәсиндә әсас јүк дашыјычыларынын-дешикләрин сајы азалыр вә металла сәрһәдин јахынлығында акцептор ионларынннын компенсасија едилмәмиш јүкү өзүнү бүрузә верир. Електрик саһәси әмәлә кәлир, бу да електронларын сонракы ахынына мане олур вә тәмас саһәсиндә мүвазинәт јараныр. Енержи зоналары ашағы истигамәтдә әјилирләр.

Шәкил 3.12*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.



Шәкил 3.12. Дүзләндиричи метал-јарымкечиричи тәмасынын зона диаграмлары

Зоналарын әјилмә областы һәчми јүкләрин областына ујғун кәлир, онларын узунлуғу $\ell = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon|\varphi_s|}{qN}}$ 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, чыхыш ишләринин фәрги илә характеризә едирләр. Зона диаг-

рамларында чыхыш иши Ферми сәвијјәси илә сәрбәст електронун бәрк ҹисимдән кәнардакы сәвијјәси арасындакы енержи ''мәсафәси''дир. Шәкил 3.12-дә металдан вә јарымкечириҹидән чыхыш ишләри $\varphi_м$ вә φ_s -лә ишарә едилмишдир. $\varphi_м$-φ_s=$\varphi_{мs}$ фәргинә (волтларла өлчүлүр) тәмас потенсиал фәрги дејилир.

$\varphi_М$ вә φ_s чыхыш ишләринин нисбәтиндән асылы олараг, електронлар бир гатдан дикәринә кечирләр. Әкәр $\varphi_м < \varphi_s$-дирсә ($\varphi_{мs} < 0$) (шәкил 3.12а) електронларын металдан јарымкечириҹијә, $\varphi_м > \varphi_s$ оларса исә ($\varphi_{мs} > 0$) (шәкил 3.12б) јарымкечириҹидән метала кечирләр.

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

Шәкил 3.12-дә көстәрилән һәр ики тәмас јарымкечириҹинин тәмасјаны гатында касыблашмыш гатларын әмәлә кәлмәси илә фәргләнир. Бурада әсас јүкдашыјыҹыларын консентрасијасы тәмасдан аралыгда мөвҹуд 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 хариҹи кәркинлијин ишарәсиндән асылы олараг φ_s потенсиалы вә ујғун олараг тәмасјаны гатын мүгавимәти дәјишәҹәкдир.

Әкәр мүсбәт гүтб метала, мәнфи гүтб исә јарымкечириҹијә гошуларса тәмасда потенсиал сәдди (шәкил 3.12а) артаҹаг, тәмасјаны гат әсас јүкдашыјыҹыларына-дешикләрә көрә даһа да касыблашаҹаг вә мүвазинәт һалына нисбәтән даһа бөјүк хүсуси мүгавимәтә малик олаҹагдыр. Демәли, belә ишарәли кәркинлик бу тәмас үчүн әкс кәркинликдир. Һәмин ишарәли кәркинлик икинҹи тәмаса тәтбиг едиләрсә потенсиал сәдди азалар, тәмасјаны гат әсас јүк дашыјыҹылары илә-електронлар-

ла зәнкинләшәр вә онун мүгавимәти таразлыг һалына нисбәтән азалар. Демәли, белә ишарәли кәркинлик бу тәмас үчүн дүз кәркинликдир.

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

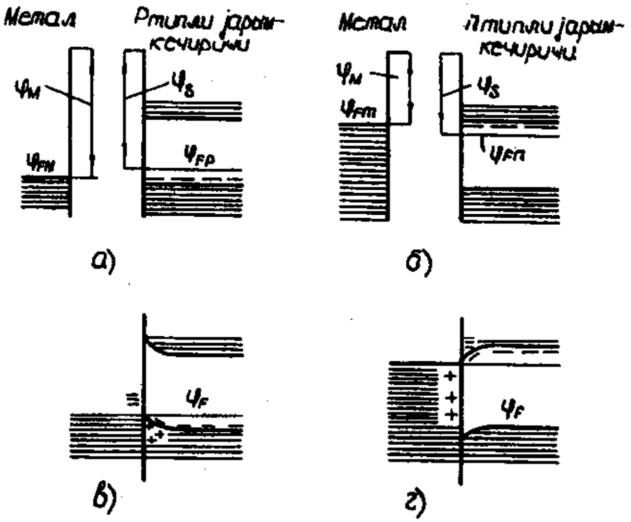
Тутаг ки, металын *p* типли јарымкечиричи илә тәмасында $\varphi_{MS}<0$ (шәкил 3.13 *б,г*). Ајдындыр ки, биринчи һалда електронлар јарымкечиричидән метала кечәчәк вә зоналар јухары истигамәтдә әјиләчәк, икинчи һалда исә електронлар металдан јарымкечиричијә кечәчәк вә зоналар ашағы истигамәтдә әјиләчәкләр. 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 3.13 -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 сәвиііәси 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 хүсусиііәтиндән 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 компен-



Шәкил 3.13. Гејри-дүзләндиричи метал-јарым кечиричи тәмасын зона диаграмлары

сасија 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 өртүрләр вә ону n^+ гата чевирирләр. Бу һалда алиминиум атомлары илә артыгламасы илә компенсасија баш вермир.

3.6.2. Јарымкечиричи-диелектрик кечиди

Јарымкечиричинин һәмсәрһәд олдуғу мүһитин хассәләри сәтһјаны гатын хүсусијјәтинә тә'сир едир. Буну јухарыда араштырдығымыз 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.

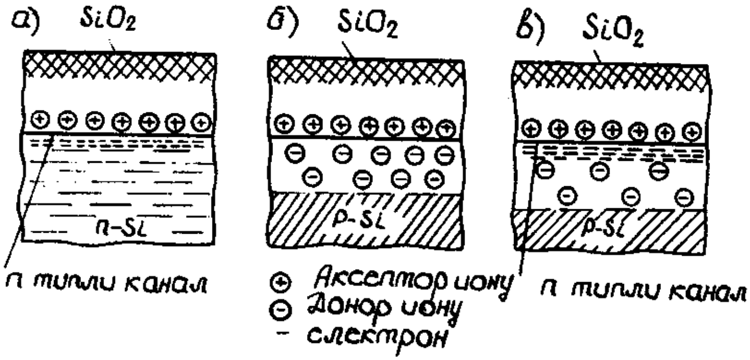
SiO_2 тәбәгәсинә хас олан донор ашгарлары адәтән силисиумла сәрһәдин јахынлығында јығышыр. Она көрә SiO_2 тәбәгәсиндә силисиумла сәрһәддә мүсбәт јүкләнмиш донор атомларындан ибарәт назик гат әмәлә кәлир, бу атомларын вердији електронлар исә силисиумун сәтһјаны гатына кечирләр. Бу кечидин нәтичәсиндә 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 3.14а).

Силисиум *p* типли оланда исә онда оксиддән кечән електронлар ја јарымкечиричинин сәтһјаны гатыны касыблашдырараг мәнфи аксептор ионларыны "ашкар" едирләр (шәкил

3.14*б*), ја да касыблашдырылмыш гатла бәрабәр назик инверсион гат јарадырлар (шәкил 3.14*в*).

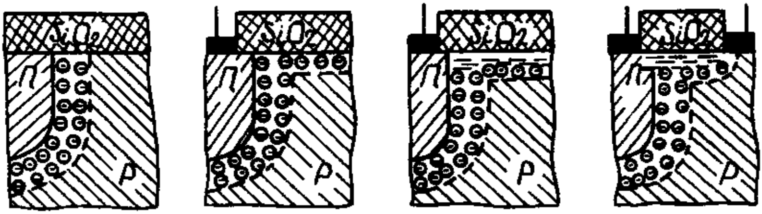
Силисиумда зәнкинләшмиш, касыблашмыш вә инверсион гатларынын јаранмасы јарымкечиричи чиһазларын вә интеграл схемләринин ишинә бөјүк тә'сир көстәрир.

Si - SiO_2 сәрһәддинин харичи саһәләринин бу сәрһәддә бирләшән планар *p-n* кечидинә тә'сирини араштыраг.



Шәкил 3.14. Силисиум оксидлә һәмсәрһәд олан сәтһјаны гаты: *а*) зәнкинләшмиш гат; *б*) касыблашмыш гат; *в*) инверсион каналлы касыблашмыш гат

Шәкил 3.15-дә оксид тәбәгәси олмајан һалда *p-n* кечидин "шагули" (јан) саһәси көстәрилмишдир. Оксид тәбәгәси оланда *p* типли силисиумда јаранан сәтһјаны касыблашмыш гат (шәкил 3.14*б*) илкин "шагули" гатла гарышыр (шәкил 3.15*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.



а) б) в) г)

Шәкил 3.15. Сәтһин јахынлығында планар *p-n* кечидинин структуру: *а*) оксиддә донор ашгары олмајанда; *б*) оксиддә донор ашгары оланда

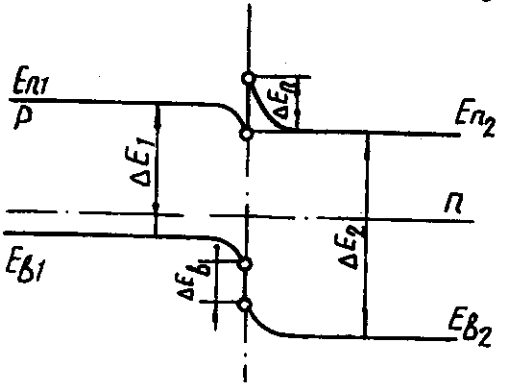
Әкәр *p* типли силисиум касыблашмыш гатла бәрабәр инверсион *n* типли канал јарадырса (шәкил 3.14*в*), онда канал кечидин *n* гаты илә бирләшир вә елә бил ки, бу гаты сәтһдә узадыр (шәкил 3.15*в*). Нәтичәдә бундан әввәлки кими касыблашмыш гатын нәтичәви саһәси артыр. Лакин бу һалда касыблашмыш гат сәтһдән чәрәјан бурахан *n* типли канала 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 3.15*г*).

3.6.3. 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 3.16*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 $E_{в_1}$ вә $E_{в_2}$ енержиләринин бәрабәр олмамасы илә әлагәдардыр. Она көрә електронлар вә дешикләр үчүн потенсиал сәддләр мүхтәлиф олур: електронлар үчүн кечиричилик зонасында потенсиал фәрги дешикләр үчүн валент 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 јарымкечиричи чиһазларын иш кејфијјәтинә мүсбәт тә'сир көстәрир.



Шәкил 3.16. Һетерокечидин зона диаграмы.

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

3.7. Јарымкечиричиләрдә сәтһ һадисәләри

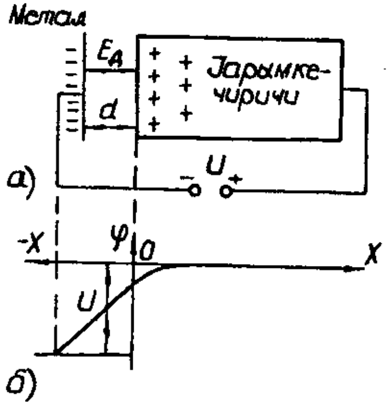
Гејри-мәһдуд өлчүләрә малик кристалда ичазә верилмиш сәвијјәләрин һамысы мәһдуд өлчүлү кристалда да мөвчуд олур.

Гәфәсәнин гырылмасы јалныз она кәтириб чыхарыр ки, кристалын сәтһинин јахынлығында гејри-мәһдуд кристал үчүн гадаған олунмуш һәдләрдә ичазә верилмиш дискрет сәвијјәләр вә ја зоналар јараныр. 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 јапышма 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 дашыјычыларын 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 3.17). Метала мүсбәт вә ја мәнфи потенсиал верилир. Метал лөвһәдәки 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

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



Шәкил 3.17 Метал-диелектрик-јарымкечиричи структурда саһә еффекти (а) вә потенсиал пајланмасы (б)

Ашгарлы јарымкечиричи үчүн

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

Бурада N ионлашмыш ашгарларын консентрасијасыдыр.

$N \gg n_i$ 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 беләә 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 процесләри 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.

3.8. 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 атомлararасы әлагәләри гырмаг үчүн кифајәт едән әлавә енержи әлдә едирләр. Нәтичәдә кристалда сәрбәст јүкдашыјычыларын сајы артыр, мадданин 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 белә 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, ренткен шүаланмасы), һәм дә јүксәк енержили һиссәчикләрин мәнбәји (електрон то-

пу, 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.

3.9. Јарымкечиричи елементләрин һазырланма технолокијасы

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.

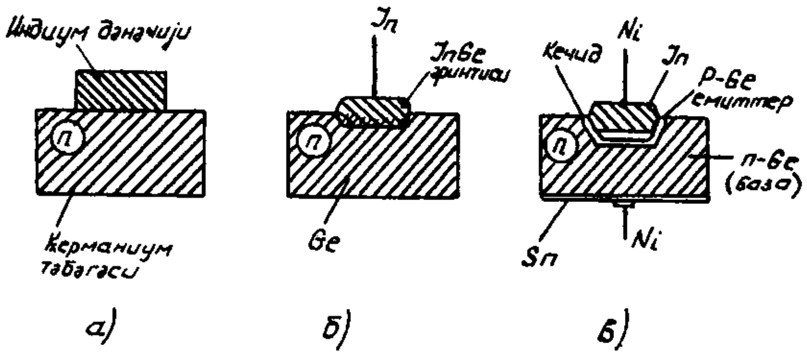
Әритмә үсулунда әсас олараг галынлығы 0,1-0,2 мкм олан *n* типли керманиум тәбәгәси көтүрүлүр. Онун үзәринә акцептор материалындан (адәтән индиумдан) ибарәт дәнәчик гојулур (шәкил 3.18*а*). Сонра тәбәгә вә дәнәчији вакуум вә ја һидрокен собасына јерләшдириб 450-550°C температура гәдәр гыздырырлар ки, бу температурда дәнәчик вә тәбәгәнин она јахын олан гаты әријир вә мүәјјән тәркибли әринти әмәлә кәлир (шәкил 3.18*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. Лөвһәнин 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 алынмасын-

да 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.



Шәкил 3.18. Әритмә үсулу илә кечидин һазырланмасы: *а*) илкин вәзијјәт; *б*) әритмә просеси; *в*) сон нәтичә

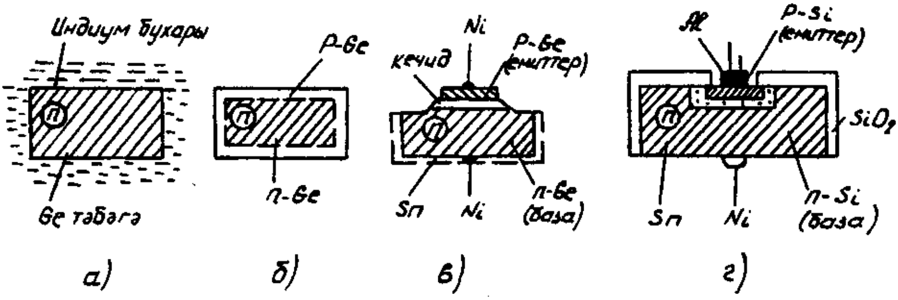
Мәсәлән, *p* типли керманиум емиттерли *p-n* кечид алмаг үчүн *n* типли назик керманиум тәбәгәси көтүрүлүр. Бу тәбәгә акцептор маддәсинин бухары илә долу собаја јерләшдирилир. Тәбәгә керманиумун әримә температуруна гәдәр (900^{0}C) гыздырылыр. Бу заман акцептор атомлары интенсив сүрәтдә бухар фазасындан тәбәгәнин дәринликләринә кирир вә тәбәгәдә *p* типли назик сәтһи гат јарадырлар (шәкил 3.19). 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 3.19*в*).

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 3.19*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.



Шәкил 3.19. Кечидин диффузија үсулу илә һазырланмасы:
а) диффузија просеси; *б*) аралыг структур; *в*) сон меза-структур;
г) планар структур

4. ЈАРЫМКЕЧИРИЧИ ПАРАМЕТРИК ЕЛЕМЕНТЛӘР

Бү 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.

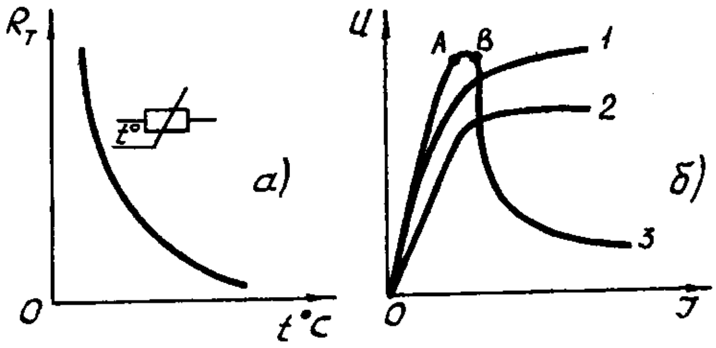
Ән кениш јајылмыш термисторлар мәнфи температур әмсалына маликдирләр: температур артдыгча онларын мүгавимәти азалыр. Бу, температурун тә'сириндән терморезисторун дахилиндә сәрбәст јүкдашыјычыларынын консентрасијасынын вә онларын јүрүклүјүнүн артмасы илә әлагәдардыр. Терморезисторун мүгавимәтинин температурдан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

$$R_T = Ae^{B/T}$$

Бурада *A*-термисторун ишчи көвдәсинин өлчүләриндән вә јарымкечиричинин хүсуси мүгавимәтиндән асылы әмсал, *B*-ја-

рымкечиричинин хүсусијјәтләри илә мүәјјән едилән температура һәссаслыг әмсалыдыр.

$R_T=f(T)$ асылылығы вә термисторун шәрти ишарәси шәкил 4.1*а*-да көстәрилмишдир. Бу асылылыға терморезисторун температур характеристикасы дејилир. Терморезистордакы кәркинлијин чиһаздан ахан чәрәјандан асылылығына исә статик волт-ампер характеристикасы дејилир (шәкил 4.1*б*). Бурада бири-бириндән формасы, өлчүләри вә сојутма шәраити илә фәрг-



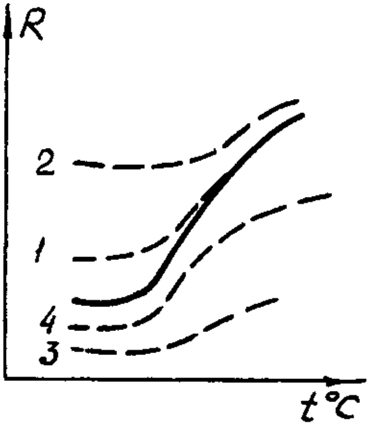
Шәкил 4.1. Термисторун температур (*а*) вә волт-ампер (*б*) характеристикалары

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 кәркинлик ашағы дүшүр. Бурада мүгавимәтин азалмасы чәрәјанын артмасыны габаглајыр вә бу кәркинлијин азалмасына кәтириб чыхарыр (3 әјриси).

Терморезисторлар јухарыда сајыланларындан башга 20°С-дә номинал мүгавимәт $R_{Tном}$; 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.



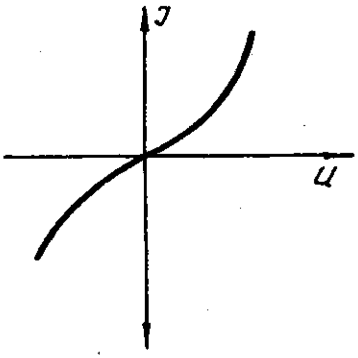
Шәкил 4.2. Позисторун температур характеристикалары

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 4.2-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.

Позисторларын характеризә олундуғу әсас параметрләр термисторлара ујғундур.

Позисторлар 100 hс 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 4.3). Характеристика симметрик олдуғундан варистор һәм дәјишән, һәм дә сабит чәрәјан дөврәләриндә ишләдилә билир.



Шәкил 4.3. 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.

5. 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 кеманиумдан, 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.

5.1. Дүзләндиричи диодлар

Ади дүзләндиричи диодлар мәһдуд тезлик диапазонунда (50hс-100khс) 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

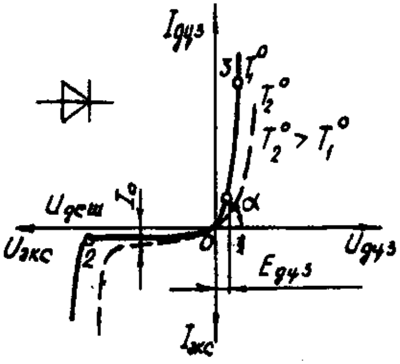
$$J_{дүз} = J_0\left(e^{\frac{U_{дүз} - J_{дүз} r_б}{\varphi_T}} - 1\right)$$

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 5.1, I квадрант) бу шәкилдә ифадә 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:

$$J_{әкс} = J_0 + J_T + J_c$$



Шәкил 5.1. Дүзләндиричи диодун волт-ампер характеристикасы

Диодун волт-ампер характеристикасынын ишчи һиссәси дүз гошулма һалына ујғун кәлән хәтти (омик) һиссәдир (шәкил 5.1, 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);

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

$U_{экс}$ - диодун әкс кәркинлији;

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

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

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

$U_{экс\ max}$ - 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 дејилир), $J_{дүз.ор}$ -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 чев-

рилмәләри 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);

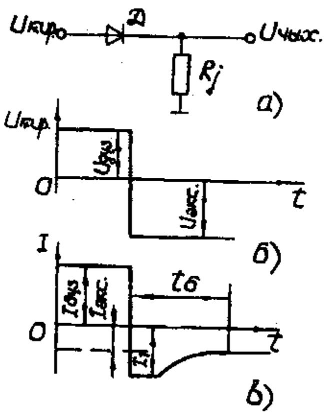
Δf - тезлик диапазону.

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

5.2. 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, ҹәрәјан вә кәркинлик диаграмлары шәкил 5.2-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 ҹәрәјан J_I кәскин артыр вә сонра дајаныглы вәзијјәтә $J_{экс}$ кәлиб чыхыр. Бу һадисә ачыг *p-n* кечидинин јүкдашыјыҹыларыны топлама еффектинә малик олмасы илә әлагәдардыр. Бу еффектин маһијјәти белә изаһ олуна биләр. *p-n* кечиддән дүз ҹәрәјан аханда јүкдашыјыҹыларынын инжексијасы баш верир вә кечид јахынлығында гејри-әсас таразлыгсыз јүкдашыјыҹыларын консентрасијасы кечид саһәсиндә гејри-әсас таразланмыш јүкдашыјыҹыларын консентрасијасындан хејли артыг олур. Дүз ҹәрәјан нә гәдәр бөјүк олса гејри-әсас јүкдашыјыҹыларын консентрасијасы вә кәркинлик әкс истигамәтдә дәјишилән анда әкс ҹәрәјан бир о гәдәр чох олур. Таразлыгсыз дашыјыҹыларын өмрү мәһдуд олдуғундан рекомбинасија нәтиҹәсиндә вә кечиддән кетмәк һесабына онларын консентрасијасы тәдриҹән азалыр. Она көрә дә мүәјјән $t_б$ мүддәтиндән сонра таразлыгсыз гејри-әсас јүкдашыјыҹылары тамамилә јох олурлар вә әкс ҹәрәјан нормал гијмәтини алыр (бәрпа олунур).



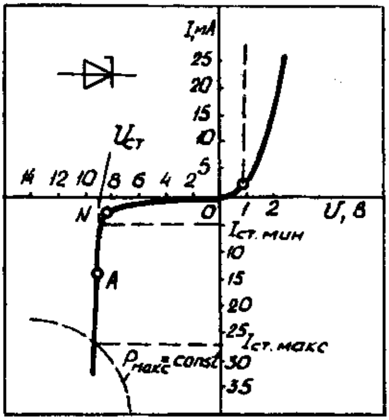
Шәкил 5.2. Импулс диодунун гошулма схеми, ҹәрәјан вә кәркинлик диаграмлары

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

5.3. 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 5.3). 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 5.3. 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 стабилләшдирмә кәркинлијини $U_{ст.ном}$, $J_{ст.min}$, $J_{ст\ мах}$, P_{max}, $J_{ст.ном} \approx \frac{J_{ст.max} - J_{ст.min}}{}$ диференсиал мүгавимәти $r_д = dU_{ст}/dJ_{ст}$, стабилләшдирмә кәркинлијинин темпе-

ратур 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.

5.4. Тунел диодлары

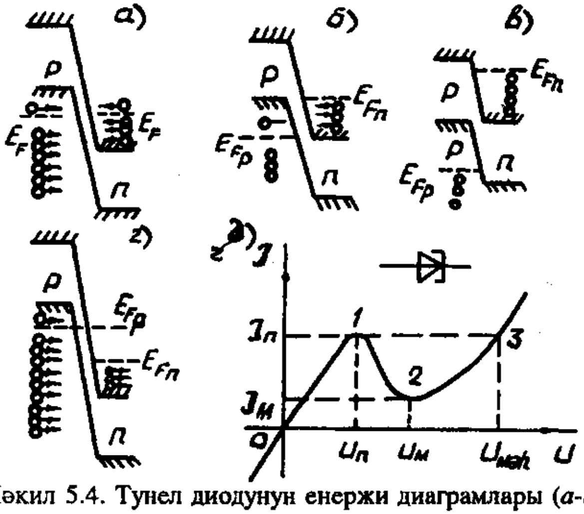
Тунел диодларынын иш принсипи електрон-дешик кечидиндә баш верән тунел еффектинә әсасланыр. Тунел еффекти чиһазын волт-ампер характеристикасында дүз гошулма һалында мәнфи мүгавимәтли һиссәнин јаранмасына кәтириб чыхарыр (шәкил 5.4*д* 1-2 һиссәси).

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 вериләрсә 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 5.4*б*). Нәтичәдә *p* гатындан *n* гатына јөнәлмиш чәрәјан јараныр вә онун гијмәти кәркинлик артдыгча максимал гијмәтә $J_п$ чатыр (0-1 һиссәси). $U_п$ кәркинлијиндә *n* гатынын Ферми сәвијјәси *p* гатынын валент зонасынын ән јухары сәрһәдинә ујғун кәлир. Дүз кәркинлијин даһа да артырылмасы нәтичәсиндә диодун чәрәјаны минимал J_m гијмәт алыр (1-2 саһәси). Бу, "сивишән" електронларын сајынын азалмасы илә әлагәдардыр. Бунун сәбәби исә ондадыр ки, зоналарын үст-үстә дүшмә дәрәчәси азалдыгча *n* гатынын кечиричилик 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 кечиричилик зонасынын ашағы сәрһәди илә үст-үстә дүшүр (шәкил 5.4*в*). Кәркинлијин сонракы артымы дүз чәрәјаны артырыр (шәкил 5.4*д*). Бу ади диодда олдуғу кими кечидин потенсиал сәддинин азалмасы илә әлагәдардыр.



Шәкил 5.4. Тунел диодунун енержи диаграмлары (*а-г*) вә волт-ампер характеристикасы (*ғ*)

Әкәр тунел диодуна әкс кәркинлик тәтбиг едиләрсә n гатындан р гатына "сивишән" електрон ахыны демәк олар ки, дәјишмир, гаршы истигамәтдәки ахын исә зоналарын үст-үстә дүшмә дәрәчәси чохалдығындан артыр (шәкил 5.4*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.

5.5. Варикаплар

Хүсуси конструксијаја малик олан вә дәјишән тутумлу конденсатор кими истифадә едилән јарымкечиричи диода варикап дејилир. Варикапын иш принсипи електрон 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:

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

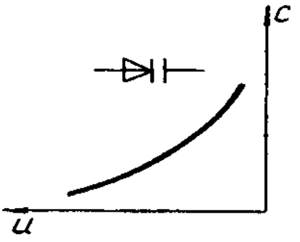
Буну нәзәрә алсаг:

$$C_k = S\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N_\partial}{2\left|\Delta_{\varphi_0} - U\right|}}$$ аларыг.

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

Көрүндүјү кими, тутумун гијмәти кәркинликдән асылыдыр. Бу асылылыға волт-фарад характеристикасы дејилир (шәкил 5.5).

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.



Шәкил 5.5. Варикапын волт-фарад характеристикасы

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:

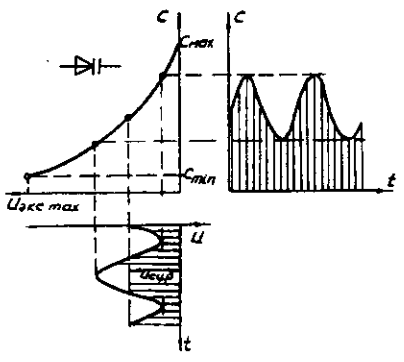
$$C_\partial = \frac{\Delta Q_{инж}}{\Delta U}$$

Бу тутум дүз чәрәјандан асылыдыр:

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

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 5.6). Белә идарә олунан тутум рәгс контурларынын резонанс тезликләринин дәјишмәси, јүксәк тезликли сигналларын күчләндирилмәси вә кенерасија едилмәси, амплитуд вә тезлик модулјасијасы үчүн истифадә едилир.



Шәкил 5.6. Кәркинлијин дәјишмәси илә варикапда сәдд тутумунун идарә олунмасы диаграмы

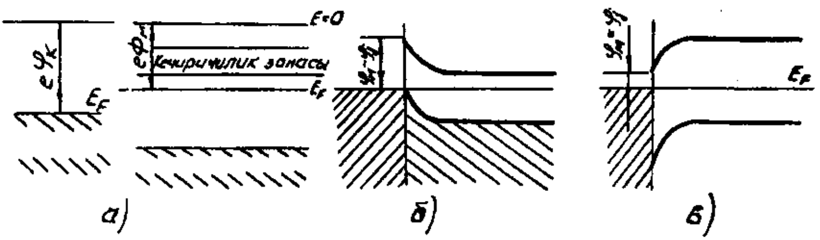
Варикапын параметрләри: $C_{ном}$- верилмиш сүрүшмә кәркинлијиндә кечидин тутуму, C_{min}, C_{max}, (минимал вә максимал сүрүшмәјә ујғун), тутума көрә өртүлмә әмсалы $K_c=C_{max}/C_{min}$, тутумун температур әмсалы $T.T.Ә=\frac{\Delta C}{C_{ном}}\cdot\frac{1}{\Delta T}$ (1^0C температурдан тутумун нисби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

5.6. Шоттки диодлары

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 биријүздә бири һәддиндә олур. Ујғун олараг диодларын ишчи тезлији 3-15 Гһс сәрһәдиндә олур. Ачыг Шоттки кечидиндә кәркин-

лик дүшкүсү p-n кечидинә нисбәтән кичик олур. Бунун сәбәби одур ки, бөјүк мүгавимәтли тәмасдан һәтта кичик илкин чәрәјан аханда да ајрылан истилик енержисинин тә'сириндән әлавә термоелектрон емиссијасы баш верир вә дүз чәрәјанда иштирак едән јүкдашыјычыларынын сајы артыр.

Шәкил 5.7*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 јаранагдыр.



Шәкил 5.7. Метал n-типли јарымкечиричи кечидин зона диаграмлары

Електронларын истигамәтләнмиш һәрәкәти (ахыны) Ферми сәвијјәләри бәрабәрләшәнә кими давам едәчәкдир (шәкил 5.7*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 5.7*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.

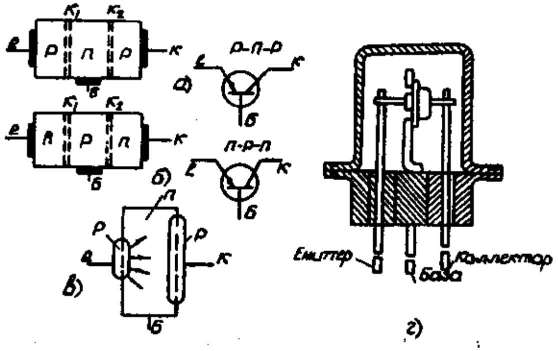
Шоттки сәдләри силисиум илә молибден, нихром, гызыл, алүминиум вә башга металларда тәмас јарадыланда алыныр. Ачыг кечиддә кәркинлик дүшкүсүнүн кичик олмасы вә ити сүр'әтли гошулманын мүмкүнлүјү белә кечиддә гурулмуш чиһазлары рәгәм схем техникасында, мәнтиг елементләриндә истифадә етмәјә имкан верир.

6. 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 6.1*а*) вә *n-p-n* (шәкил 6.1*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 јүк дашыјычыларыны јығыр (екстраксија едир). Еммитерин инжексија етдији базадан кечән дашыјычыларын һамысыны јығымаг үчүн коллектор кечидинин саһәси емиттер

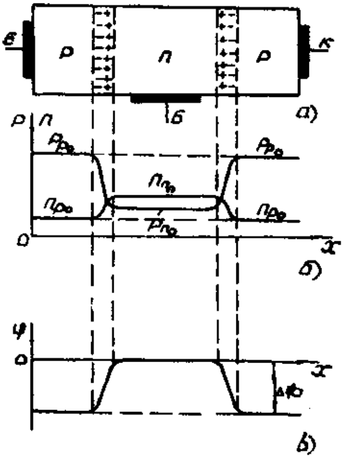


Шәкил 6.1. Мүхтәлиф структурлу транзисторларда гатларын јерләшмә ардычыллығы, онларын шәрти ишарәләри (*а*, *б*), емиттер вә коллектор кечидләринин гаршылыглы јерләшмәси (*в*) вә транзисторун үмуми көрүнүшү

кечидинин саһәсиндән чох олур (шәкил 6.1*в*).

6.1 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 6.2-дә көстәрилмишдир.



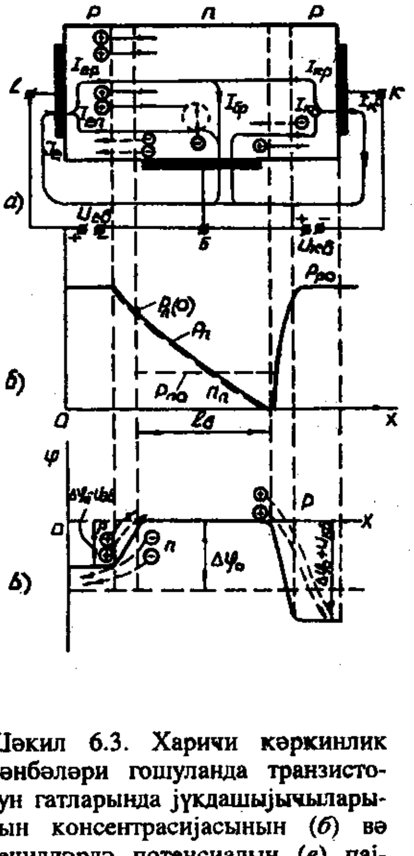
Шәкил 6.2. Харичи кәркинлик мәнбәји олмајан һалда транзисторун гатларында јүкдашыјычылаырнын консентрасијасынын (*б*) вә кечидләрдә потенсиал фәргинин (*в*) пајланмасы

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

Бу сәдд һәр ики кечиддә еләә 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 көстәриләән кими олачагдыр, чүнки кәнар гатларда јүкдашыјычыларынын консентрасијасы бәрабәрдир ($p_{po}= p_{po}$).

Харичи кәркинлик мәнбәләри ($U_{еб}$ вә $U_{кб}$) мүвафиг олараг емиттер кечидинә дүз, коллектор кечидинә исә әкс истигамәтдә гошулур (шәкил 6.3*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 диф-

фузија сели чохалыр. Дүз гошулмуш кечидин дрејф чәрәјанынын чох кичик олдуғуну нәзәрә алсаг, емиттер чәрәјаны белә тә'јин едилә биләр: $J_e = J_{ep} + J_{en}$. J_{ep}-дешикләрин, J_{en} исә електронларын һәрәкәти илә јаранан чәрәјандыр. J_{en} 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: $\gamma = J_{ep}/J_e$. Кечидин кејфијјәтинин јахшы олмасы үчүн $J_{ep} >> J_{en}$ олмалыдыр ки, буну да $p_{po} >> n_{no}$ шәртини өдәмәклә тә'мин едирләр. Адәтән γ=0,97-0,995 һәддиндә олур.



Шәкил 6.3. 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_{no}-а нисбәтән артырырлар. Базада емиттер кечиди сәрһәддиндә дешикләрин консентрасијасынын гијмәти ($p_n(0)$) тәтбиг едилән $U_{eб}$ кәркинлијиндән асылыдыр:

$$p_n(0) = p_{no} e^{U_{eб}/\varphi_T}$$

$p_n(0)$ 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 6.3*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 6.3*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 дөврәси 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: $J_{бр}=J_{ер}-J_{кр}$.

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

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

мәлидир. Бунун үчүн рекомбинасијада итирилән дешикләрин сајыны азалтмаг лазымдыр. Буну дешикләрин базада јашама мүддәтини узатмаг вә онларын базада олма мүддәтини азалтмаг ($\ell_б$-ни азалтмагла вә базадан кечмә сүр'әтини артырмагла) јолу илә тә'мин едирләр. δ=0,96-0,996 һәддиндә олур.

Дешикләрин һәрәкәти илә әлагәдар олан коллектор чәрәјаны $J_{кр}$ вә емиттер чәрәјаны J_e чәрәјана көрә өтүрмә әмсалы илә бағлыдыр: $\alpha = J_{kp}/J_e$

Бу ифадәнин сурәт вә мәхрәчини $J_{ер}$-јә вураг:

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

α-ны ваһидә јахынлашдырмаг үчүн γ вә δ-ны бөјүтмәк лазымдыр. Бунун үчүн емиттердә вә базада әсас јүкдашыјычыларын консентрасија фәргини бөјүтмәк, дешикләрин базада өмүр мүддәтини узатмаг, базанын енини азалтмаг вә базада сүр'әтләндиричи саһә јаратмаг лазымдыр.

Әкс истигамәтдә гошулмуш коллектор кечидиндә коллектор чәрәјанынын идарәолунмајан топлананы да јараныр. Бу чәрәјан коллектор кечидинин әкс чәрәјаныдыр ($I_{ко}$) вә гејри-әсас јүкдашыјычыларын дрејфи илә әлагәдардыр. Бизим мисалда бу чәрәјан $p_{по}$ вә $n_{по}$ консентрасијалы дашыјычыларын кечидә јахын гатлардан гоншу гата дрејфиндән јараныр. Гејри-әсас јүк дашыјычыларынын дрејфи температурдан асылы олдуғундан $I_{ко}$ да температурдан асылыдыр, о, емиттер чәрәјанындан асылы олмур вә она һәм дә истилик чәрәјаны дејилир. Буна әсасән $I_к = I_{кр} + I_{ко}$ алырыг.

База чәрәјаны емиттер чәрәјанынын електрон топлананы, рекомбинасијаја сәрф олунан дешик топлананы вә истилик чәрәјанларынын чәбри чәминә бәрабәрдир : $I_б = I_{еп} + I_{бр} - I_{ко}$.

Транзисторун идарәетмә хүсусијјәти ондан ибарәт олур ки, чыхышда коллектор чәрәјаны $I_к$ кириш $I_{еп}$ чәрәјанынын (вә ја кәркинлијинин) тәсирилә дәјишилир. Бу исә $I_{ер}$ чәрәјаны һесабына $I_{кр}$-нин дәјишмәси илә әлагәдардыр. Беләликлә бипол-

јар 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.

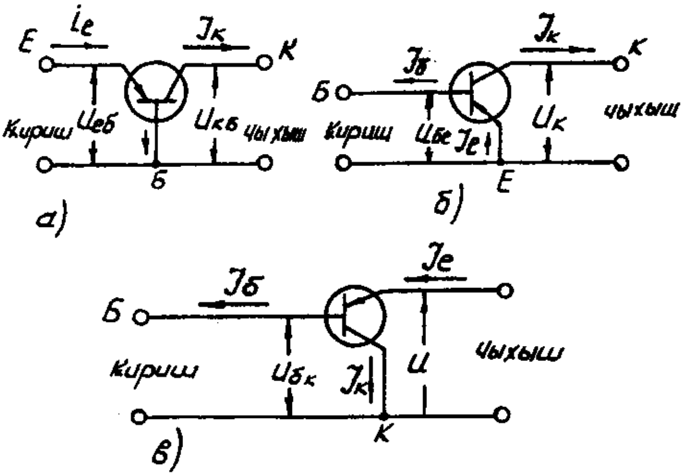
Бурадан көрүнүр ки, әкәр емиттер дөврәсинин кәркинлијини замана көрә һәр һансы мәнбәнин сигналына ујғун дәјишсәк, онда коллектор чәрәјаны да һәмин ганунла дәјишәчәкдир.

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.

6.2. Биполјар транзисторларын 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 мүгавимәти 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 6.4). 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.



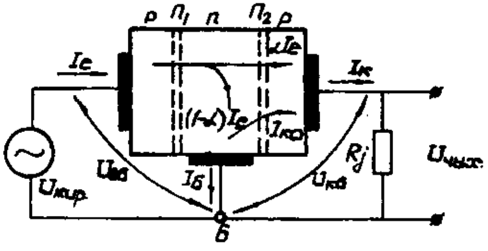
Шәкил 6.4. Биполјар транзисторун үмуми базалы (*а*), үмуми емиттер (*б*) вә үмуми коллекторлу (*в*) гошулма схемләри

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 6.5). 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.



Шәкил 6.5. Биполјар транзисторун үмуми базалы илә гошулма схеми

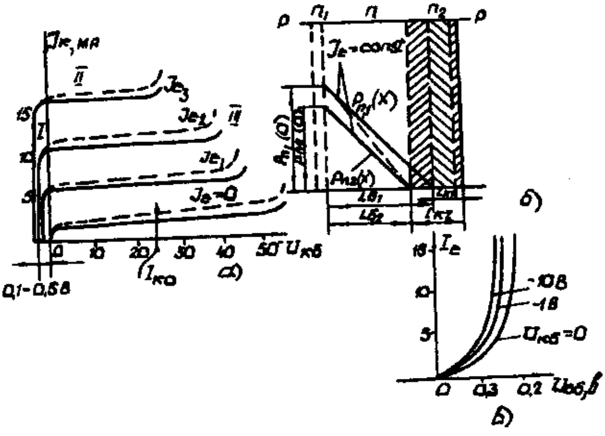
Әкәр R_j бир нечә кОм һәддиндә оларса бу һалда ондакы дәјишән кәркинлијин амплитуду $U_{кир}$-дән чох олачагдыр. Даһа доғрусу, схем кәркинлијә көрә күчләндирмә верәчәкдир. Бу схемдә емиттер дөврәсинин ишләтдији күч $P_{кир} = 1/2\ U_{кирm} \cdot J_{em}$. олур. Чыхыш күчү исә $P_{чых} = 1/2\ U_{чых} \cdot J_{кm}$ кими тәјин олунур. Бурада $U_{кирm}$, $U_{чыхm}$, J_{em}, $J_{кm}$ кирищдә вә чыхыщда кәркинлик вә чәрәјанларын дәјишән топлананларынын амплитуд гијмәтләридир. $J_{кm} = J_{em}$ 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 6.6*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 $J_к \neq 0$. $J_к$-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 6.6*б*).

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



Шәкил 6.6. Үмуми базалы гошулма схеминин чыхыш (*а*), кириш (*в*) характеристикалары вә базанын модулјасија еффектинин схеми (*б*).

Кечидә $U_{кб1}$ вә $U_{кб2}$ кәркинликләри тәтбиг едилән һаллар ($U_{кб2}$>$U_{кб1}$) үчүн базанын модулјасија еффекти белә изаһ олунур. Чыхыш характеристикаларыны чыхараркән $J_е$=const олмасы емиттер-база кечидиндә дешикләрин консентрасијасынын гради-

јентинин 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_e=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.

Әкәр транзисторда J_e-нин јох, $U_{еб}$ кәркинлијинин верилдијини нәзәрдә тутсаг ($U_{еб}$=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.

$$r_{к(б)} = \frac{dU_{кб}}{dJ_{кб}}\bigg|\; J_e = const$$

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 6.6*а*) *р-n* кечидин волт-ампер характеристикасынын әкс ганунуну тәсвир едир. Коллектор кечидинин әкс чәрәјаны транзисторун коллектор чәрәјанынын $J_{ко}$ топлананыны тәшкил едир.

Характеристикаларын II һиссәсиндә онлары хәтти, $r_{к(б)}$ 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_{k0} дәјишир вә характеристикалар јухары (температур артыгча) (шәкил 6.6*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 көркинлијин һәддән чох артырылмасы електрик дешилмәсинә вә бунун ардынча исә истилик дешилмәсинә кәтириб чыхарар (III һиссә).

Үмуми база илә гошулма схеминин кириш статик характеристикалары $U_{кб}$ көркинлијинин сабит гијмәтиндә емиттер чәрәјанынын емиттер-база көркинлијиндән 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 6.6*в*). Буна сәбәб базанын модулјасијасынын дешикләрин базада консентрасијасынын градијентини вә J_e чәрәјаныны артырмасыдыр.

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

Чәрәјана көрә статик күчләндирмә әмсалы R_j=0 һалында белә тә'јин едилир:

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

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

Дәјишән сигнал режиминдә исә (киришдә $U_{кир}$, чыхышда исә R_j оланда) чәрәјана көрә күчләндирмә әмсалы $K_I=J_{km}/J_{em}$ олур, чүнки $I_{кт}< I_{ет}.к_i < \alpha$, чүнки R_j гошуланда I_k азалыр.

Кәркинлијә көрә күчләндирмә әмсалы ($K_u = U_{кбт}/ U_{ебт}$) онларла вә јүзләрлә өлчүлүр. Күчә көрә күчләнмә әмсалы $K_p= K_i \cdot K_u$

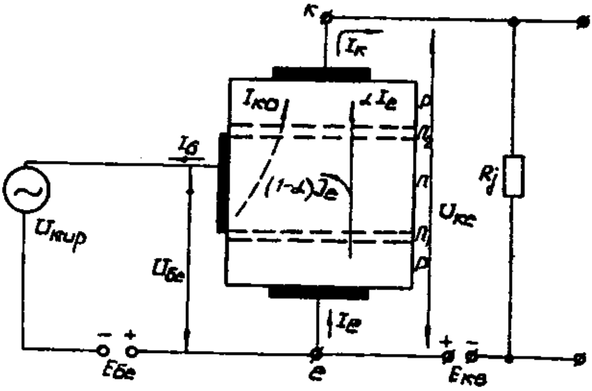
Схемин чыхыш мүгавимәти 100 кОм-а гәдәр ола биләр. $U_{чых}$ вә $U_{кир}$ арасында фаза фәрги олмур. Схем ән кениш јајылмыш үмуми емиттерли гошулма схеминә нисбәтән сигналы даһа аз тәһриф едир.

Үмуми емиттерли гошулма схеми (шәкил 6.7). 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 мәнбәји $U_{кир}$ исә база дөврәсинә гошулур. R_j бундан әввәлки кими коллектор дөврәсинә гошулур. База гатындакы кәркинлик дүшкүсү нәзәрә алынмаса, емиттер кечидиндәки кәркинлик емиттер мәнбәјинин кәркинлијинә бәрабәр көтүрүлә биләр. Коллектор кечидиндәки кәркинлик исә ($U_{ке}$-$U_{бе}$) фәргинә бәрабәрдир.

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

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



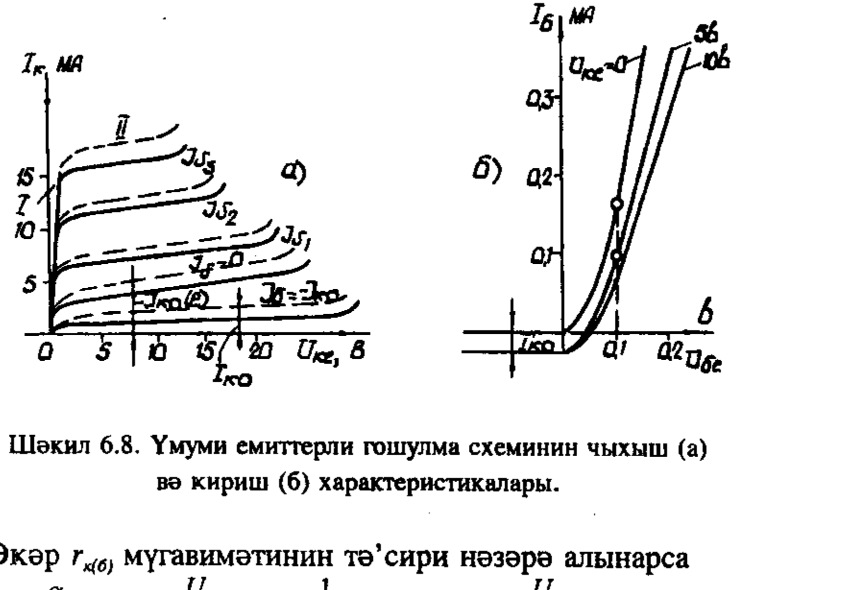
Шәкил 6.7. Биполјар транзисторун үмуми емиттерлә гошулма схеми

Бурада $\frac{\alpha}{1-\alpha}=\beta$ үмуми емиттерлә гошулмуш схемин күчләндирмә (чәрәјана көрә өтүрмә) әмсалыдыр. $\alpha \approx 0{,}92$-$0{,}99$ олдуғу нәзәрә алынса $\beta \approx 10$-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. у схем үчүн чыхыш (коллектор) статик характеристикалары $J_б$=const оланда $J_к$-нын коллектор–емиттер кәркинлијиндән асылылығыны ($J_к=f(U_{ке})_{Jб=const}$) көстә-

рир (шәкил 6.8а). Бу характеристикаларда да илкин (I) $J_к$-нын $U_{ке}$-дән зәиф асылылығы (II) вә коллектор кечидинин дешилмәси (III) һиссәләрини ҝејд 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. II һиссә илә сәрһәддә коллектор кечидиндән дүз кәркинлик тамамилә көтүрүлүр, II һиссәдә исә кечиддә јалныз әкс кәркинлик тә'сир көстәрир. I һиссәдә II һиссәјә кечид нөгтәси $U_{ке}$=0,5-1,5В һәддиндә олур.



Шәкил 6.8. Үмуми емиттерли гошулма схеминин чыхыш (а) вә кириш (б) характеристикалары.

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

$$J_к = \frac{\alpha}{1-\alpha} J_б + \frac{U_{ке}}{r_{к(б)}(1-\alpha)} + \frac{1}{1-\alpha} J_{ко} = \beta J_б + \frac{U_{ке}}{r_{к(б)}(1+\beta)} + (1+\beta) J_{ко}$$

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

Коллектор чәрәјанынын јухарыдакы ифадәсини башга чүр дә јазмаг олар:

$$J_к=\beta J_б+U_{кe}/r_{к(e)}+J_{ко(e)}.$$

Бурада

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

Бу схемин чыхыш характеристикалары да кәркинлик оху-на 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 β=α/(1-α)-ја әсасән β-нын бөјүк дәјишмәләринә кәтириб чыхарыр. Бу һадисә $U_{кe}/r_{к(e)}$ топлананы илә нәзәрә алыныр. Бу схемдә коллектор кечидинин диференсиал мүгавимәти $r_{к(e)}$ үмуми базалы схемин $r_{к(б)}$ мүгавимәтиндән (1+β) дәфә аз олур.

Транзисторун иш принсипиндән мә'лумдур ки, база хәтти илә ики гаршы-гаршыја јөнәлмиш топланан ахыр (шәкил 6.7): коллектор кечидинин әкс чәрәјаны $J_{ко}$ вә емиттер чәрәјанынын бир һиссәси ($(1-\alpha)/J_e$). Буна көрә дә $J_б$=0 һалы бу чәрәјанла-рын бири-биринә бәрабәрлијини мүәјјән едир: $(1-\alpha)\ J_e=\ J_{ко}$. Кириш (база) дөврәсинин чәрәјанынын сыфыр олмасы һалында емиттер вә коллектор чәрәјанлары белә ифадә олунур:

$$J_e=J_{ко}/(1-\alpha)=(1+\beta)J_{ко};$$

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

Демәли $J_б=0$ оланда үмуми емиттерли схемдә транзистор-дан илкин вә ја башдан-баша $J_{ко(e)}=(1+\beta)J_{ко}$ 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+β) дәфә чохдур.

Әкәр емиттер кечидинә мүсбәт кәркинлик $E_{бe}$>0 вериб ону бағлы вәзијјәтә кечирсәк онда коллектор чәрәјаны $J_{ко}$ гиј-мәтинә гәдәр азалачаг (шәкил 6.8*а*) вә коллектор кечидинин

база-коллектор истигамәтинә ахан әкс чәрәјаны илә мүәјјән едиләчәкдир. $J_б=0$ һалына ујғун характеристикадан ашағы јерләшән характеристикалар саһәсинә ајырма (кәсилмә) саһәси дејилир.

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 $(1+\beta)$-ја вурулмасы илә, дикәр тәрәфдән исә α әмсалынын температурдан кичик дәјишмәләриндә $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ әмсалынын температурдан кәскин дәјишмәләри 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 чәрәјанын база-емиттер кәркинлијиндән асылылығыны көстәрир (шәкил 6.8*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) волтампер характеристикасына ујғун кәлир. Бу һалда база чәрәјаны емиттер режиминдә ишләјән коллекторун вә емиттерин чәрәјанларынын чәминә бәрабәрдир.

$U_{ке}<0$ оланда база чәрәјаны емиттер чәрәјанынын аз бир һиссәсини тәшкил едир. Бу һалда $U_{бе}$-нин мүәјјән гијмәтиндә $U_{ке}<0$ кәркинлији $J_б$-ны азалдыр вә характеристикалар $U_{ке}=0$ һалында олдуғундан ашағы тәрәфә сүрүшүрләр. $U_{ке}$-нин гијмәтинин артырылмасы да базанын модулјасијасы тә'сириндән $J_б$-нин азалмасы нәтичәсиндә характеристикалары ашағы тәрәфә сүрүшдүрүр.

База чәрәјанынын тәркибиндә $J_{ко}$ дә вардыр. Она көрә $U_{ке}<0$ һалына ујғун кириш характеристикалары база чәрәјанынын гијмәтчә $J_{ко}$-а бәрабәр, ишарәчә мәнфи олан нөгтәсиндән башлајырлар (шәкил 6.8б).

Чәрәјана көрә күчләнмә әмсалы $к_i=J_{чыхм}/J_{кир\ м}=J_{км}/J_{бм}$ онларла өлчүлүр.

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

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

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

$к_u$ әмсалы R_j-үн E_{ke} мәнбәјинин кифајәт гијмәтләриндә онларла вә јүзләрлә өлчүлүр. Бу о демәкдир ки, $к_p=к_I \cdot к_u=100\text{-}1000$ 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, нәтичәдә$U_{бе}$, $J_б$ вә онун нәтичәсиндә $J_к$ 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 чәһәти коллектор вә база дөврәләринин бир мәнбәдән гида алмасыдыр, чүнки һәр ики дөврәјә ејни ишарәли кәркинлик верилир.

Мәнфи чәһәтләр ондадыр ки, тезлијин јүксәк гијмәтләриндә үмуми базалы схемә нисбәтән күчләндирмә 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 чәрәјаны $J_б$, чыхыш чәрәјаны исә $J_е$-дир (о исә демәк олар ки $J_к$-ја бәрабәрдир). Бурада да кириш сигнал мәнбә-ји 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 әвәз 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.

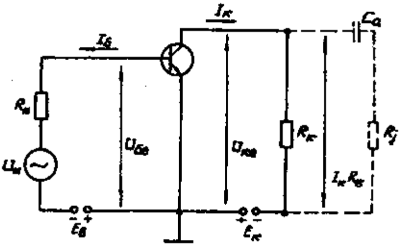
6.3. Биполјар транзисторун динамик режими вә динамик характеристикалары

Бундан әввәл гејд едилмишди ки, гошулма схемләринин ичәрисиндәән кениш јајыланы үмуми емиттерли схемдир. Биполјар транзисторун динамик режимини белә схем әсасында арашдыраг. Динамик режимдә кириш сигнал мәнбәји $U_м$ база дөврәсинә, R_k исә коллектор дөврәсинә гошулур (шәкил 6.9).

Нәзәрдә тутмаг лазымдыр ки, јалныз чыхыш дөврәсиндә јүк мүгавимәтинин олмасы кәркинлијә 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-бирилә 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 мүвафиг олараг $J_к=0$ вә $U_к=E_к$ јазараг $U_{кe}=E_к$ вә $J_к=E_к/R_к$ тапылыр.



Шәкил 6.9. Биполјар транзистора сигнал мәнбәјинин вә јүк мүгавимәтинин гошулмасы.

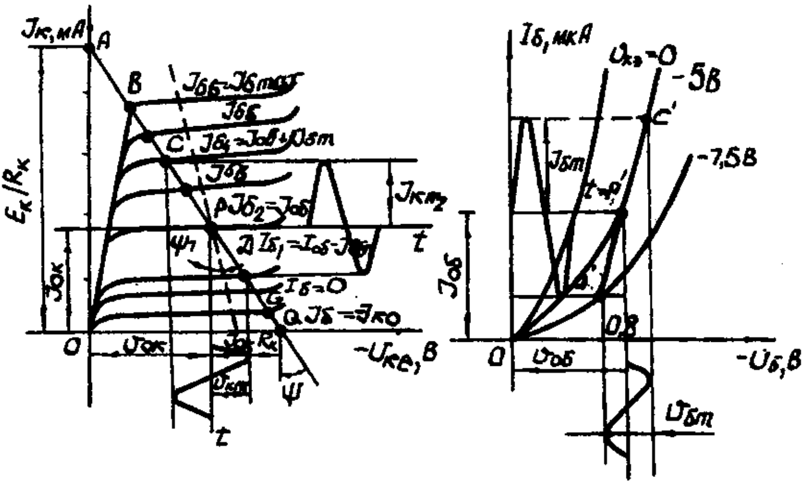
Мүвафиг охларда $E_к$ вә $E_к/R_к$ парчаларыны ајырараг алынан нөгтәләрдән AG хәтти чәкилир. Бу дүз хәттә јүк хәтти, онун статик характеристикаларла кәсишмә нөгтәләринин һәндәси јеринә исә динамик чыхыш характеристикасы дејилир (шәкил 6.10*а*). Бу характеристиканын көмәји илә коллектор чәрәјанынын истәнилән гијмәтинә ујғун коллектор кәркинлијинин вә онунла әлагәдар олан база чәрәјанынын гијмәтини тапмаг олар. Јүк хәттини һәм дә $\varphi=arctgR_к$ 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 6.10*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 6.10*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 ғијмәти вә формасы илә мүәјјән едилир.



Шәкил 6.10. Транзисторун динамик характеристикаларынын ғурулмасы

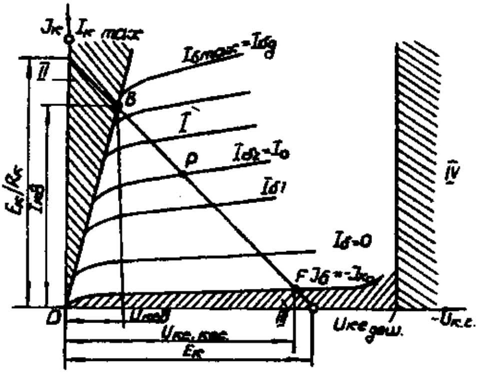
Әкәр кириш сигналы симметрикдирсә, (мәсәлән шәкил 6.10*б*-дә синусоидал $U_{бт}$) онда сакитлик нөгтәсини јүк хәттинин тәхминән ортасында сечирләр. Бу заман коллектор дөврәсиндән $J_{кт}$ чәрәјаны ахыр вә коллектордакы кәркинлијин амплитуду $U_{кт}$ олур.

Әкәр транзисторун чыхыш дөврәсинә харичи јүк R_j гошулса (шәкил 6.9-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 $\varphi' = arctgR_j$ бучағы алтында кечирмәк лазымдыр (шәкил 6.10*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 6.11, I һиссә).

Әкәр кириш чәрәјаны $J_{бmax}$ (B нөгтәси) гијмәтини аларса, онун сонракы артымы коллектор чәрәјаныны артырмыр, коллектор чәрәјаны дојма J_{kg} гијмәтини алыр. Бу һалда коллектордакы кәркинлик $U_{кед}$=0,1-0,3B һәддиндә олур вә она көрә $U_{кед} << E_k$ 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 6.11. 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 $J_{кд}$ 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, $Е_к$-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.

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

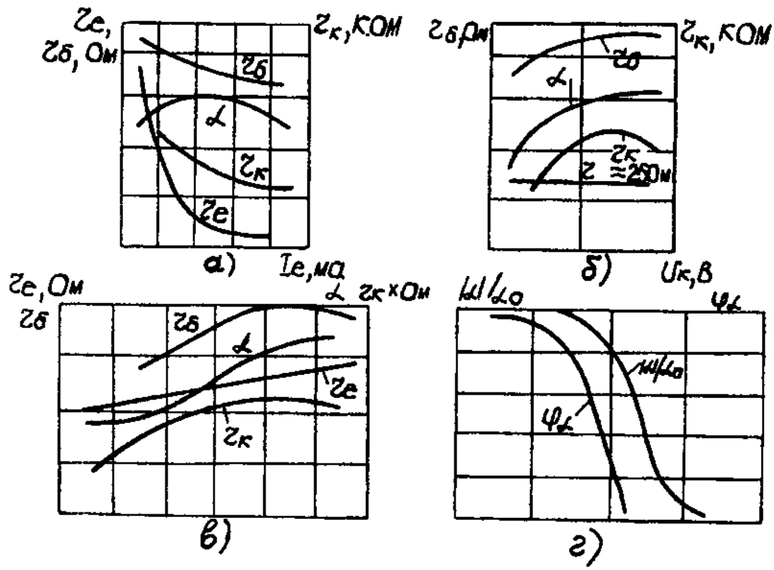
Транзисторун әсас параметрләринә онун иш режимини характеризә едән кәмијјәтләр (коллектор чәрәјаны вә кәркинлији, сигналын тезлији) вә әтраф мүһитин температуру мүәјјән тә'сир көстәрир.

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 6.12*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 кечидинə јүкдашыјычыларынын селвари чохалма əмсалы вə бунун нəтичəсиндə α əмсалы да артыр (шəкил 6.12*б*).

Мүсбəт температурда α артыр, мəнфи температурда исə азалыр (шəкил 6.12*в*). Бу онунла изаһ олунур ки, температур артдыгча дашыјычыларын енержиси артыр, рекомбинасија еһтималы азалыр вə онларын өмрү узаныр. Сигналын тезлијинин α əмсалына тəсири τ_α мүддəти əрзиндə J_e-нин дəјишмəсиндəн J_k-нын дəјишмəсинин кечикмəси илə изаһ олунур.



Шəкил 6.12. Транзисторун параметрлəринин иш режиминдəн вə температурдан асылылығы

τ_α мүддəти əрзиндə инжексија едилмиш дашыјычылар база гатында һəрəкəт едəрəк коллектор кечидинə 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 6.12 г) тә'јин едилир: $\alpha = \alpha_0 / \sqrt{1 + (\omega/\omega_a)^2}$; $\varphi_a = -arctg(\omega/\omega_a)$

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 /β/-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 6.12*а*) вә демәк олар ки, коллектор кәркинлијиндән асылы дејил (шәкил 6.12*б*). Температурун тә'сириндән r_e хәтти олараг тәхминән 0,33%/1°С дәјишир (шәкил 6.12*в*).

Коллектор кечидинин мүгавимәти r_e-јә аналожи олараг J_e-јә мүтәнасиб дәјишир (шәкил 6.12а), $|U_k|$ артанда исә $\sqrt{|U_k|}$ -ја мүтәнасиб олараг артыр (шәкил 6.12б).

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 6.12 *в*).

$J_е$-нин артмасы илә база мүгавимәти $r_б$ азалыр (шәкил 6.12*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 6.12*б*).

$r_б$-нин температурдан асылылығы (шәкил 6.12*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 ($U_{беmax}$, $U_{кбmax}$, $U_{ебmax}$), 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 һәрәкә-

тинин хаотиклији нəтичəсиндə чəрəјанларын дрејф вə диффузија топлананларынын флуктуасијасы баш верир. Бу һадисə електронларын емиссија чəрəјанынын флуксијасына бəнзəрдир вə она көрə дə бу гырма еффекти адланыр. Кечидин гырма күјүнүн орта квадратик көркинлији белə тə'јин олунур:

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

Алчаг тезликли күјлəр $1/f^n$-ə, мүтəнасиб олан характерик спектрал пајланмалары илə фəрглəнирлəр (n ваһидə јахын көстəричидир). Јарымкечиричи чиһазларда алчаг тезликли күјлəрин мəншəји оксид-јарымкечиричи сəрһəдиндə баш верəн просеслəрдир. Белə күјлəрин орта квадратик көркинлији белə тə'јин олунур:

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

6.5. Биполјар транзисторун еквивалент схемлəри вə параметрлəр системи

Транзисторун характеристикаларындан əсасəн иш режимини тə'јин етмəк вə схемлəрин ишини бөјүк сигналлар һалында графики анализ етмəк үчүн истифадə едилир. Схемлəрин ишини кəмијјəтчə гијмəтлəндирмəк үчүн транзистор схемлəринин аналитик һесабат үсулларында еквивалент схемлəрдəн истифадə олунур. Бу схемлəр дəјишəн чəрəјан режиминдə транзисторун кичик сигналлы параметрлəринин структур əлагəлəрини тəсвир едирлəр.

Транзисторун кичик сигналлы еквивалент схемлəри хəтти дөврəлəрдəн ибарəт олуб ики бөјүк група бөлүнүрлəр:

1) транзисторун физики хүсусијјəтлəрини, структуруну вə һəндəси моделини нəзəрə алмагла гурулан еквивалент схемлəр;

2) транзисторун хүсусијјəтлəрини актив дөрдгүтблү кими тəсвир едəн еквивалент схемлəр (формал еквивалент схемлəр).

Биринчи груп схемлəр транзисторун дахили (физики) параметрлəри, икинчи груп схемлəр исə дөрдгүтблүнүн характеристик параметрлəри илə характеризə олунур. Һəр 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.

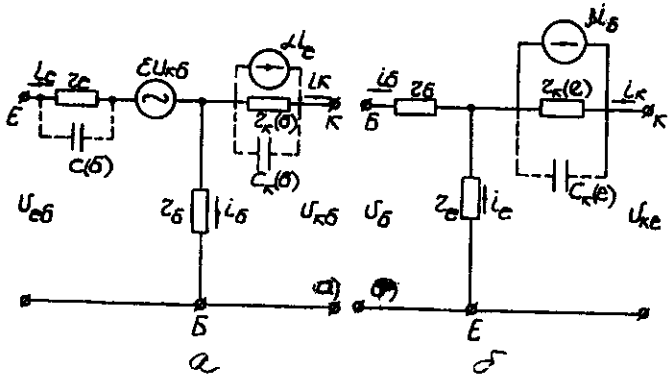
Күчләндирмә режиминдә ишләјән транзисторун үмуми базалы вә үмуми емиттерли гошулма схемләриндә чәрәјан вә кәркинликләрин дәјишән топлананлары үчүн еквивалент схеми араштыраг. Белә схемләр транзисторун кириш вә чыхыш характеристикаларынын хәтти һиссәләри үчүн тәртиб олунур. Бу һалда транзисторун параметрләри 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 6.13*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 6.13. 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 $r_б > r_е$, 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:

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

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 вə коллектор кечидлəринин $C_{e(б)}$ вə $C_{к(б)}$ тутумлары ујғун кечидлəрин сəдд вə диффузија тутумларынын чəминə бəрабəрдир.

Сəдд тутуму кечидə верилəн кəркинлијин ишарəсиндəн асылы олдуғундан (мəсəлəн дүз гошулмада емиттер кечидиндə сəдд тутуму əкс гошулма һалындан чохдур) емиттер кечидинин сəдд тутуму коллектор кечидинин сəдд тутумундан чохдур.

Диффузија тутуму исə кечиддə кəркинлијин дəјишмəсиндəн базада јүклəрин дəјишмəси илə характеризə олунур. Базада јүклəрин емиттер кечидиндəки кəркинлијин тə'сириндəн дəјишмəси јүкдашыјычыларын базаја инжексијасы илə, коллектор кечидиндəки кəркинлијин тə'сириндəн дəјишмəси исə Ерли еффекти илə əлагəдардыр. Базада јүкүн ејни бир гијмəтдə дəјишмəси үчүн коллектор кечидиндəки кəркинлијин дəјишмəси емиттер кечидиндəки кəркинлијин дəјишмəсиндəн чох асылыдыр. Бу о демəкдир ки, емиттер кечидинин диффузија тутуму коллектор кечидинин диффузија тутумундан чохдур.

$C_{e(б)}$ вə $C_{к(б)}$ тутумларынын гијмəтлəри транзисторун нөвүндəн асылыдыр: јүксəк тезликли транзисторынкынларын һəр ики тутуму алчаг тезликли транзисторларынкындан кичикдир. Диффузија (əсасəн) тутумуну ифадə едəн $C_{e(б)}$ тутуму бир нечə јүз пикофарад, сəдд тутуму илə мүəјјəн едилəн $C_{к(б)}$ тутуму исə бир нечə он пикофарад һəддиндə олур.

Белə фəрглəнмəлəринə бахмајараг $C_{к(б)}$ тутуму јүксəк тезликлəрдə транзисторун ишинə даһа гүввəтли тə'сир көстəрир. Бу онунла əлагəдардыр ки, $C_{e(б)}$ кичик r_e мүгавимəти илə, $C_{к(б)}$ исə бөјүк $r_{к(б)}$ мүгавимəти илə шунтланмышлар. Она көрə дə $C_{к(б)}$ тутумуну еквивалент схемлəрдə 10kһс-лəрдə тезликлəрдə, $C_{e(б)}$-ни исə 10Mһс-лəрлə тезликлəрдə нəзəрə алмаг лазым кəлир. Орта тезликлəрдə (бир нечə он һс-лəрдəн бир нечə kһс-ə гəдəр) кечидлəрин тутуму нəзəрə алынмыр вə еквивалент схемə дахил едилмир.

Емиттер чəрəјанынын диференсиал өтүрмə əмсалы бу чəрəјанын кичик артымларында α-ны даһа дəгиг характеризə 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 ҹәрәјаны фазаја көрә емиттер ҹәрәјанындан 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 мөвҹуд олур.

Үмуми емиттерли гошулма схеминин Т-шәкилли еквивалент схеминдә (шәкил 6.13*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 ҹәрәјаны база ҹәрәјаны олдуғундан еквивалент схемин чыхыш дөврәсинә $\beta i_б$ ҹәрәјан мәнбәји гошулур. Ҹәрәјанларын 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 ефффекти нәтиҹәсиндә $U_{ке}$-нин дәјишмәсиндән $J_к$-нын дәјишмәсини нәзәрә алыр. Үмуми емиттерли схемдә кириш ҹәрәјан база ҹәрәјаны олдуғундан вә бу ҹәрәјан емиттер ҹәрәјанындан (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 емиттерли 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:

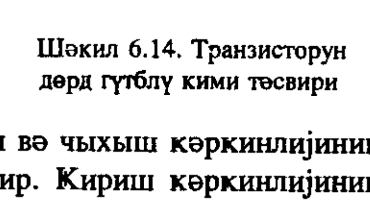
$$\beta = \left.\frac{dJ_k}{dJ_б}\right|_{U_{кe}=const}$$

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 6.14) 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 6.14. 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 кəркинлијинин сабит гијмəтиндə ($\Delta U_2=0$) транзисторун кириш мүгавимəти;

$h_{12}=\Delta J_2/\Delta J_1$- чыхыш кəркинлијинин сабит гијмəтиндə ($\Delta U_2=0$) чəрəјаны өтүрмə əмсалы;

$h_{21}=\Delta U_1/\Delta U_2$- кириш чəрəјанынын сабит гијмəтиндə ($\Delta J_1=0$) кəркинлијə көрə əкс əлагə əмсалы;

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

h-параметрлəрин конкрет гијмəтлəри транзисторун гошулма схеминдəн (кəркинлик вə чəрəјанларын кириш вə чыхыш дөврəсинə аидлијиндəн) асылыдыр. Сорғу китабларында адəтəн орта тезликлəрдə үмуми базалы схем үчүн чəрəјан вə кəркинлијин сабит топлананларынын типик гијмəтлəриндə өлчүлмүш *h*-параметрлəр верилир.

Транзисторун *h*-параметрлəри илə физики параметрлəри арасында асылылығы тапмаг үчүн еквивалент схемдəн (шəкил 6.13) истифадə едəк. $\varepsilon U_{кб}=0$ көтүрүб дəјишəн топлананлары артымларла əвəз едəк: $u_{еб}=\Delta U_1$; $i_е=\Delta J_1$; $u_{кб}=\Delta U_2$; $i_к=\Delta J_2$. $i_б$ чəрəјаныны кириш чəрəјаны илə ифадə едəк: $i_б=(1-\alpha)\Delta J_1$.

Транзисторун кириш дөврəси 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 дөврəсинин чəрəјаныны тапараг: $\Delta J_2=\alpha\Delta J_1$ бурадан исə $h_{21}=\alpha$ аларыг.

$\Delta J_1=0$ һалында чыхыш дөврəсинин чəрəјаны 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:

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

7. УНИПОЛЈАР ТРАНЗИСТОРЛАР

Иш принсипи јалныз бир ишарәли јүкдашыјычыларын (електронларын вә ја дешикләрин) истифадә олунмасына әсасланан транзисторлара униполјар транзисторлар дејилир. Бу транзисторларда ҹәрәјан һәмин ҹәрәјанын 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 ҹиһазларын һазырланма технолокијасы даһа мүкәммәлдир, ајры-ајры нүсхәләринин параметрләри бир-биринә даһа јахын олур вә дәјәри дә кичикдир. Бу транзисторлар јүксәк кириш мүгавимәтинә малик олурлар.

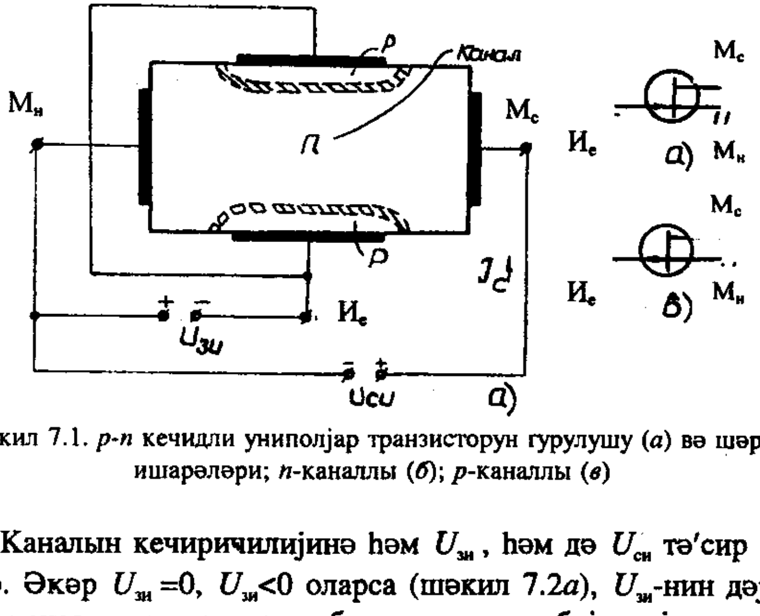
Ҹәрәјан кечирән каналын јарадылмасы үсулуна көрә бу транзисторлар 3 група бөлүнүрләр: 1) *p-n* кечидли; 2) гурама каналлы; 3) индуксија едилмиш каналлы.

2-ҹи вә 3-ҹү груп транзисторлара МДЈ-транзисторлар (метал, диелектрик вә јарымкечириҹи сөзләринин илк һәрфләриндән) дејилир.

7.1. *p-n* кечидли униполјар транзистор

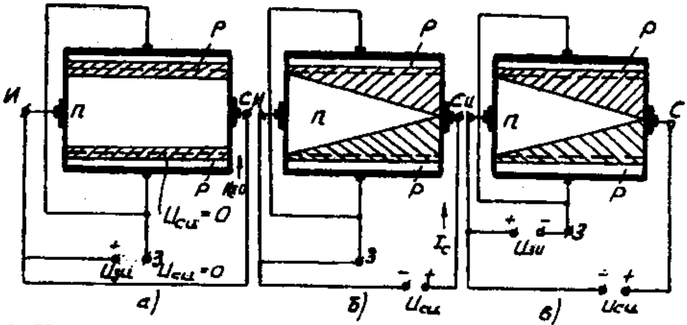
Бу транзисторун моделиндән көрүнүр ки, (шәкил 7.1*a*) ҹәрәјан ахан канал ики *p-n* кечид арасында јерләшмиш *n* типли јарымкечириҹи гатдан ибарәтдир. Канал ҹиһазын хариҹи електродлары илә нагиллә бирләшдирилир. Јүкдашыјычыларын (бу һалда електронларын) һәрәкәтә башладығы електрода мәнбә ($M_н$), јүкдашыјычыларын кәлиб чыхдығы електрода исә мәнсәб ($M_с$) дејилир. *p* типли јарымкечириҹи гатлар *n* гатына нисбәтән даһа јүксәк ашгар консентрасијасына маликдирләр. Һәр ики *p* гаты бир-бири илә бирләшиб бир хариҹи електрода малик олур вә буна идарәедиҹи 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 енинин 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 7.1. *p-n* кечидли униполјар транзисторун гурулушу (*а*) 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 7.2*а*), $U_{зи}$-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 7.2. 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 7.2б). 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 7.2*в*-дә көстәрилмишдир.

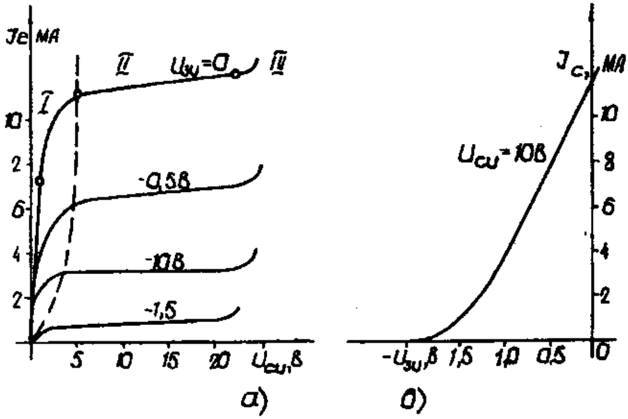
Бу транзисторларын әсас ики нөв волт-ампер характеристикасы мараг доғурур.

Мәнсәб (чыхыш) характеристикалары $U_{зи}$=0 оланда мәнсәб чәрәјанынын мәнсәб кәркинлијиндән асылылығыны көстәрир ($J_c=f(U_{си})_{U_{зи}=const}$ (шәкил 7.3*a*). I һиссә чәрәјанын 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 7.3. *p-n* кечидли вә *n*-каналлы униполјар транзисторун чыхыш (мәнсәб) (*a*) 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.

Идарәедичи електрода мәнфи әкс кәркинлик вердикдә ($U_{зи}$<0) канал енсизләшир вә онун кечиричилији азалыр. Она

көрә дә $U_{си}$<0 һалларында алынмыш әјриләрдә чәрәјанын артма диклији аз олур. $U_{зи}$ дә тә'сир көстәрдијиндән *p-n* кечидләринин һәчми јүкләри илә каналын енсизләшмәси даһа кичик кәркинликдә баш верир вә I вә II һиссәләрин сәрһәдинә даһа кичик мәнбә-мәнсәб кәркинлији ујғун кәлир. Каналын тәмиз бағланма кәркинликләринә мәнсәб характеристикаларынын гырыг хәтлә кәсишмә нөгтәләринин абсисләри ујғун кәлир. Транзисторун мәнсәб-идарәедичи електрод дөврәсилә дешилмәси дә даһа кичик кәркинликләрдә баш верир.

Транзисторун әсас параметрләриндән бири $J_c \to 0$ һалында ујғун идарәедичи електрод кәркинлијинин гијмәтидир. Бу чиһазын идарәедичи електрод дөврәси илә тәмиз бағланма кәркинлијинә ујғундур, она бағлама вә ја кәсилмә кәркинлији ($U_{зио}$) дејилир. Мәнсәб-идарәедичи електрод (кириш) характеристикалары $U_{си}$=const һалында Je-нин $U_{зи}$-дән асылылығыны ифадә едир: $J_c = f(U_{зи})_{U_{си}=const}$ (шәкил 7.3*б*). Бу характеристиканы мәнсәб характеристикасы әсасында да гурмаг олар.

Транзисторун әсас параметрләри ашағыдакылардыр:

$J_{c\ max}$ - мәнсәб характеристикасында ($U_{зи}=0$ оланда) "в" нөгтәсинә ујғун чәрәјан;

$U_{cu\,max}$ - $U_{зи}=0$ - һалында мәнсәб-идарәедичи електрод саһәсинин дешилмә кәркинлијиндән 1,2-1,5 дәфә кичик көтүрүлүр;

$U_{зио}$ - мәнсәб чәрәјанынын сыфра јахын олдуғу һалда идарәедичи кәркинлији;

$r_i = \left.\dfrac{dU_{си}}{dJ_c}\right|_{U_{зи}=const}$ - дахили мүгавимәт (чыхыш характеристикасында II һиссәнин маиллијини көстәрир);

$S = \left.\dfrac{dJ_c}{dU_{си}}\right|_{U_{зи}=const}$ - мәнсәб-едичи електрод характеристикасынын диклијидир вә $U_{зи}$-нин J_c-јә тә'сирини көстәрир;

$r_{кир}=dU_{зи}/dJ_c$ - 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 мөвҹудлуғу илә әлагәдардыр.

Саһә транзисторун еквивалент схеми (шәкил 7.4а) ҹәрәјан вә кәркинликләрин дәјишән топламалары үчүн чыхыш характеристикасынын II һиссәсиндә транзисторун ишини характеризә едир.

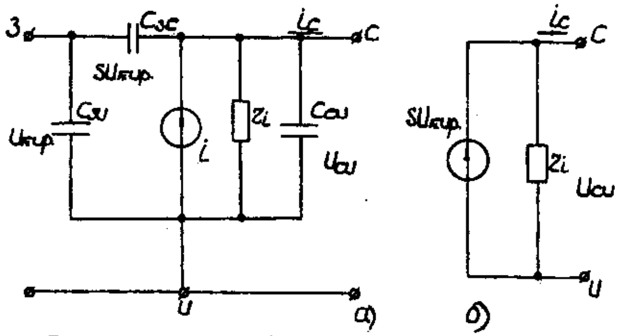
Бу транзисторда тәмас потенсиал фәрги ($\Delta\varphi_0$) вә јүкдашыјыҹыларынын јүрүклүјү температурдан асылы олдуғундан ҹиһазын параметрләринә вә характеристикаларына температур тә'сир көстәрир. $\Delta\varphi_0$ потенсиалы әкс гошулмуш *p-n* кечидләрин кәркинликләринин бир һиссәсини тәшкил едир.

Температурун тәсириндән кечидләрдәки кәркинликләр вә кечидләрин ени дәјишир, бу исә каналын енини вә кечириҹилијини дәјишдирир. Температур артдыгҹа $\Delta\varphi_0$ азалыр, каналын ени вә кечириҹилији артыр. Јүкдашыјыҹыларын јүрүклүјүнүн азалмасындан каналын кечирикилији азалыр.

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

Саһә транзисторунун еквивалент схеми (шәкил 7.4) ҹәрәјан вә кәркинликләрин дәјишән топлананлары үчүн чыхыш характеристикасынын II һиссәсиндә транзисторун ишини характеризә едир.

Бу һиссәдә ҹиһаздакы ҹәрәјан идарәедиҹи кәркинлик вә характеристиканын диклији илә мүәјјән едилир. Она көрә дә чыхыш дөврәсинә $S\cdot u_{кир}$ ҹәрәјан мәнбәји дахил едилир. Бу мәнбәјә паралел мәнсәб кәркинлијинин ҹәрәјана 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 7.4. *p-n* кечидли саһә транзисторунун јүксәк (*a*) вә алчаг тезликләрә ујғун еквивалент схемләри

Кичик тезликләр үчүн саһә транзисторун еквивалент схеми шәкил 7.4 *б*-дә көстәрилмишдир.

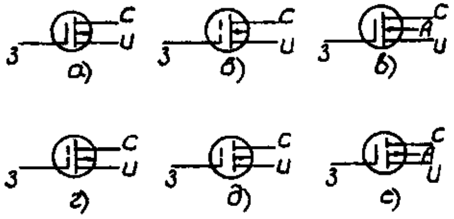
7.2. МДЈ - транзисторлар

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 7.5-да көстәрилмишдир.

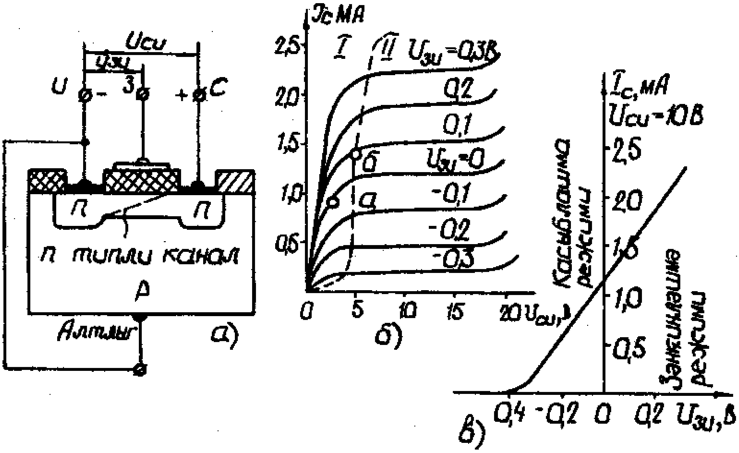


Шәкил 7.5. МДЈ-транзисторларын шәрти ишарәләри: мәхсуси каналлы (*n*-типли (*a*), *p*-типли (*б*), алтлыгдан чыхышы олан (*в*)); индуксија едилмиш каналлы (*n*-типли (*г*), *p*-типли (*ғ*) алтлыгдан чыхышы олан (*д*))

n типли гурама каналлы МДЈ-транзисторун гурулушу шәкил 7.6 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 7.6*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" нөгтәсиндән сонра каналын ени минимума чатыр, бу, чәрәјанын артмасыны мәһдудлашдырыр вә характеристикада аз маиллијә малик II һиссә әмәлә кәлир.



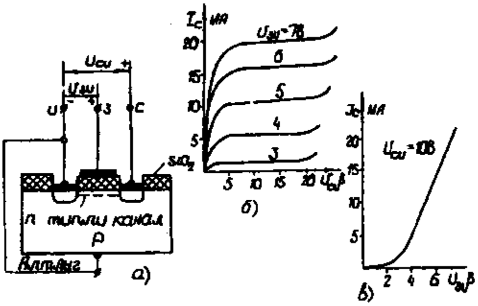
Шәкил 7.6. Мәхсуси каналлы МДЈ-транзисторун конструктив гурулушу (*а*), чыхыш (мәгнәб) (*б*) вә мәнсәб-идарәедичи електрод (*в*) характеристикалары

$U_{зи}$<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.

Кириш характеристикасы шәкил 7.6 *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 верилəндә електронларын јарымкечиричи лөвһәдән ахыб кәлмәси һесабына јарадылыр, даһа доғрусу сүн'и индуксија едилир (шәкил 7.7*а*). Електронларын белә ахыны

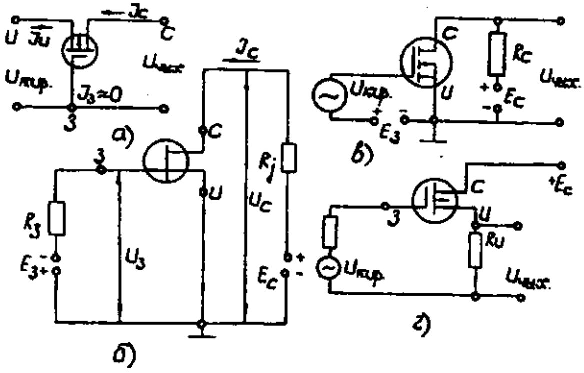


Шәкил 7.7. Индуксијаланма каналлы МДЈ-транзисторун конструктив гурулушу (*а*), чыхыш (*б*) вә кириш (*в*) характеристикалары

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 7.7*б*) форма вә характерләри илә әввәлкиләрә бәнзәјир. Фәрг ондадыр ки, транзистор полјарлығы $U_{сн}$ 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.

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 мүгавимәтинә малик олдуғундан практикада чох аз ишләдилир.

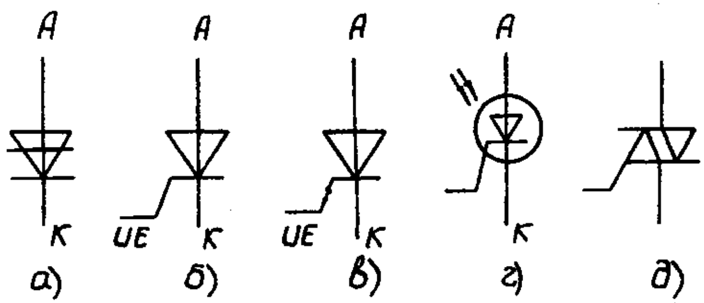
p-n кечидли вә МДЈ типли транзисторларын дөврәјә гошулма схемләри шәкил 7.8-дә көстәрилмишдир.



Шәкил 7.8. Униполјар транзисторларын дөврәјә гошулма схемләри: *а)* үмуми идарәедичи електродла; *б),в)* үмуми мәнбә илә; *г)* үмуми мәнсәб илә

8. 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 8.1*а*) вә триод тиристорларына (шәкил 8.1 *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 8.1*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 8.1*в*) идарәедичи електродун дөврәси илә тиристору һәм ачмаг, һәм дә бағламаг мүмкүндүр. Ишыг шүасы илә идарә олунан тиристорлара фототиристор дејилир (шәкил 8.1*г*).



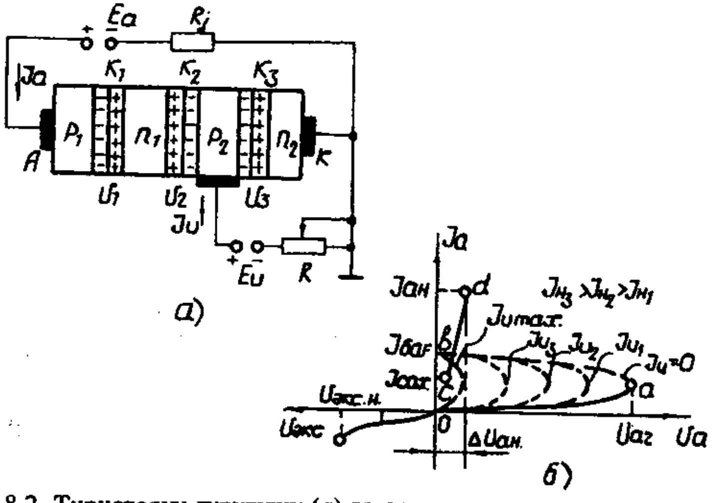
Шәкил 8.1. Тиристорларын шәрти ишарәләри: а) динистор; б) бир әмәлијјатлы тиристор; в) икиәмәлијјатлы тиристор; г) фототиристор; ғ) симистор

Бүтүн адлары чәкилән чиһазлар тәмассыз ачар ролуну ојнајыр вә чәрәјаны бир истигамәтдә кечирирләр. Һәр ики истигамәтдә чәрәјан кечирән тиристорлара симметрик тиристор-симистор дејилир (шәкил 8.1*б*). Тә'јинатына көрә симистор ики гаршылыглы паралел гошулмуш ади тиристорун вәзифәсини јеринә јетирир.

Дүз чәрәјанын номинал гијмәтинә көрә тиристорлар алчаг күчлү ($J_{а.н.}$≤0,3А), орта күчлү (0,3<$J_{а.н.}$≤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 8.2*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 8.2*б*) көрә араштырыг.



Шәкил 8.2. Тиристорун гурулушу (*а*) вә волт-ампер характеристикасы (*б*)

Әкәр идарәедичи електродун чәрәјаны 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, нәтичәдә 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 сәддләр азалыр вә чиһаздан ахан $J_а$ чәрәјаны 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 нәтичәдә 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 уғрамајан һиссәси әкс гошулмуш K_2 кечидинә чатыр вә онун саһәси илә n_1 базасына өтүрүлүр. n_1 базасында електронларын консентрасијасы артыр вә бунун нәтичәсиндә K_1 кечидиндә потенсиал сәдд даһа да азалыр вә дешикләрин p_1 емиттериндән n_1 базасына инжексијасы чохалыр. Бу дешикләр диффузија нәтичәсиндә 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 чәрәјана көрә мүсбәт әкс әлагәнин олмасына бәнзәр чәрәјанын селвари чохалмасы (характеристикада *о-а* һиссәси) баш верир.

$U_а = U_{ач}$ кәркинлијиндә дахили әкс әлагә әсас јүк дашыјычыларын 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 нәтичәсиндә тиристордакы үмуми кәркинлијин азалмасына кәтириб чыхарыр, чүнки $U_а = U_1 + U_2 + U_3$. Даһа доғрусу чәрәјанын 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_a 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_a) *с* нөгтәсинә ујғун 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 јүкдашыјыҹылары (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. $U_{экс.н}$-номинал бурахыла билән әкс кәркинлик, $U_{ач}$-идарәедиҹи дөврә ачыг олан һалда тиристору бағлы вәзијјәтдән ачыг вәзијјәтә кечирән ән кичик дүз кәркинлик, $J_{баг}$-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.

9. 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.

9.1. Фотоелектрон шүаландырычы чиһазлар

Шүаландырычы чиһазлар електрик енержисини мүәјјән узунлуглу далғаларын оптик шүаланма енержисинә чевирирләр. Енержинин белә 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) флүоресссенсија (ишыг сели, електрон сели, ренткен шүасы, електрик саһәси вә чәрәјанынын тә'сириндән маддәнин ишыг шүаланмасы); 2) фосфоресссенсија (миллисанијәдән бир нечә саата кими давам едән узун мүддәтли ишыгсачма).

Шүаланма просесләри илә әлагәдар олан енержинин там һәјәчанланма енержисинә нисбәтинә лүминессенсијанын еффективлији 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 belә тәјин едилир: $e = \kappa U E^{-в/\sqrt{U}}$. 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.

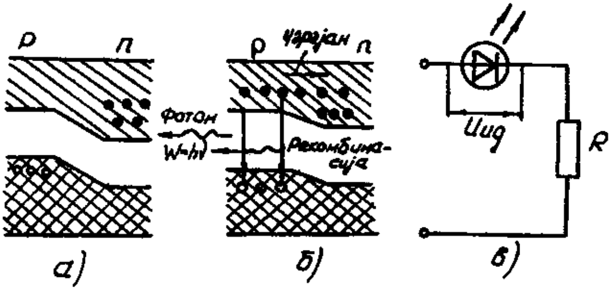
Електролүминессент чевиричиләрин иш мүддәти аз олур, онлар стабил ишләмирләр - бир мүддәтдән сонра ишыгланманын парлаглығы азалыр, онлар һәм дә әталәтли олурлар (јанма вә сөнмә вахты 10^{-3}-10^{-4} санијә һәддиндә олур). Белә чевиричиләр бөјүк күчләндирмә әмсалына малик шүаланма чевиричиләриндә вә күчләндиричиләриндә, 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 9.1*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 9.1. 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 технолоҝијасындан асылыдыр. Кerманиумун 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 һиссә-

си 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.

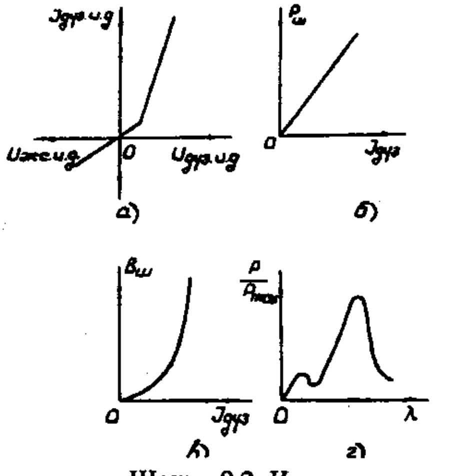
Ән кениш тәтбиг олунан гырмызы, јашыл вә сары ишыг сачан диодлардыр.

Ишыг диодунун дөврәјә гошулма схеми шәкил 9.1*в*-дә көстәрилмишдир. Мүгавимәт диодун дөврәсиндәки чәрәјаны мәһдудлашдырыр. Диодун чәрәјаны вә онда дүшән кәркинлик дүшкүсү белә тә'јин едилир

$$J_{ид} = \frac{U_{K, ир}}{R_и + R}; \qquad U_{и.д.} = J_{ид} R_{и.д.}$$

($R_{и.д}$-диодун мүгавимәтидир.)

Ишыг диодларынын әсас характеристикалары ашағыдакылардыр (шәкил 9.2 *а-г*): 1) волт-ампер характеристикасы $J_{и.д}=f(U_{и.д})$; 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 9.2. 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

билэр. Индуксија јолу илэ вэзијјэтин дэјишмэси исэ јалныз харичи тэ'сир нэтичэсиндэ мүмкүн олур.

Фэзада пајланмыш квант системлэринин өз-өзүнэ шүаланмасы гејри-кoһерент (тэшкил олунмамыш) олур. Белэ шүаланмада енержи кениш тезлик спектриндэ пајланыр. Индуксија едилмиш шүаланмада ишыг далғалары ејни тезлијэ вэ ејни јајылма истигамэтинэ малик олурлар. Белэ шүаланмаја монохроматик вэ ја коһерент (тэшкил олунмуш) шүаланма дејилир. Индуксија едилмиш шүаланманын эсасыны квант системинин һиссэчиклэринин јухары енержи сэвијјэлэриндэн ашағы енержи сэвијјэлэринэ кечмэси заманы артыг енержи ајрылмасы просеси тэшкил едир. Индуксија едилмиш шүаланма элдэ етмэк үчүн һэчмдэ мүэјјэн гајдада пајланмыш бөјүк мигдарда һэјэчанланмыш атомлара малик олан мүһит лазымдыр. Һэјэчанланмыш атомлары мүэјјэн тезликли ишыг квантлары илэ ишыгландырыб елэ вэзијјэт јаратмаг олар ки, ишығын шүаланмасы онун удулмасындан гат-гат интенсив олсун. Квант оптик чиһазларын иши бу һадисэјэ эсасланыр. Кенерасија едилэн рэгслэрин тезлијиндэн асылы олараг квант оптик чиһазлары ики група бөлүнүрлэр: сантиметрли вэ миллиметрли далғалар шүаландыран чиһазлар-мазерлэр вэ оптик диапазонда ишлэјэн чиһазлар-лазерлэр.

Лазер кенерасијасыны үч үсулла һэјата кечирмэк олар: 1) атомларын електрон өртүклэри арасындакы кечидлэр арасында; 2) молекулларын фырланма - рэгсетмэ спектриндэн истифадэ эсасында; 3) јарымкечиричинин кечиричилик зонасы илэ валент зонасы арасындакы кечидлэр өсасында. Бу үч принсип бүтүн маддэлэри эһатэ едир вэ она көрэ лазерлэр үчүн истэнилэн материалдан истифадэ олуна билэр.

Һал-һазырда бэрк көвдэли газ вэ јарымкечиричи лазерлэр кениш јајылмышдыр.

Јарымкечиричилэрин лазерлэрдэ актив маддэ кими истифадэ олунмасы ф.и.э. артырмаға, шүаланманын модулјасија золағыны кенишлэндирмэјэ вэ лазерлэрин өлчүлэрини азалтмаға имкан верир. Ишыг өтүрэн системли рабитэ вэ мэ'лумат өтүрэн гурғуларда, автоматиканын вэ идарэетмэнин бир чох системлэриндэ мэһз бу лазерлэрдэн истифадэ олунур. Јарымкечиричи лазерлэр јанлары сэ'јлэ чилаланмыш куб вэ ја паралелепипед шэклиндэ һазырланырлар. Јан сэтһлэринин үчү шүаны экс 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.

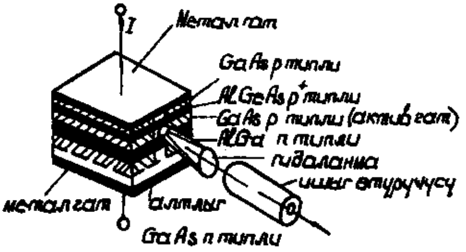
Јарымкечиричи лазерләри фәргләндирән хүсусијјәтләр ашағыдакылардыр:

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 9.3-дә көстәрилмишдир.



Шәкил 9.3. 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 вә чиһаз ишыг шүаландыран диод кими ишләјир. Чәрәјан сәрһәд гијмәтинә чатанда диод лазер шүаланмасы кенерасија едир: чыхан ишыг фазаја көрә синхронлашдырылмыш вә коһерент олур. Бундан сонра чәрәјан артдыгча чыхыш күчү мүтәнасиб артыр. Һәссаслыг тәхминән 200мкВт/mA һәддиндә олур. Диодун актив саһәсиндә 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 һиссәчә полјаризә едилмиш ишыг шүаландырыр.

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

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

9.2. Фотоелектрон шүагәбуледичи чиһазлар

Шүа енержиси илә идарә едилән чиһазлара оптик шүагәбуледичи чиһазлар 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 һәссас елементин маддәсинин кристал гәфәсәсинин рәгс енержисини чохалдыр вә бу исә һәссас елементин температуруну артырыр. Нәтичәдә һәссас елементин термо е.һ.г, тер-

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

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

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

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

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

Јарымкечиричи фотон гәбуледичиләринин иши дахили фотоеффект һадисәсинә әсасланыр. Дахили фотоеффект нәтичәсиндә ковалент әлагәләрдән азад олан електронлар маддәнин ичәрисиндә галыб онун електрик кечиричилијини артырырлар вә нәтичәдә јарымкечиричидә дахили е.һ.г. јараныр.

Иши дахили фотоеффект һадисәсинә әсасланан јарымкечиричи 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;

$$K_\lambda = dJ_\phi / d\Phi_\lambda;$$

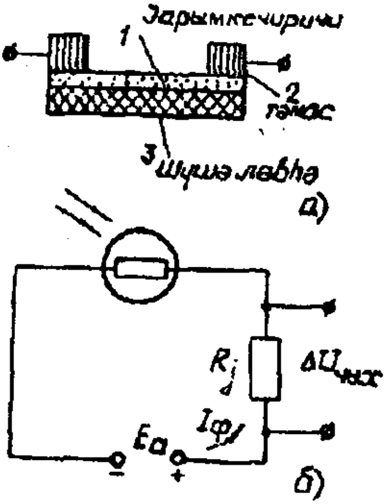
3) дәјишән чәрәјана көрә дахили мүгавимәт: $R_i = dU/dJ_\phi$;

4) сабит чәрәјана көрә мүгавимәт: $R_0 = U/J_\phi$;

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

6) бурахыла билән сәпәләнмә күчү P_{max};

7) гаранлыгда олан фотогәбуледичидә максимал бурахыла билән кәркинлик U_{max}.



Шәкил 9.4 Фоторезисторун гурулушу *(а)* вә дөврәјә гошулма схеми *(б)*

Фоторезистор шүа енержисинин тә'сириндән өз мүгавимәтини дәјишән чиһаза дејилир. О, шүшә лөвһәнин үзәринә чәкилмиш ики чәрәјан кечирән тәмаса малик олан јарымкечиричи гатдан ибарәтдир (шәкил 9.4*а*). Рүтубәтдән горумаг үчүн јарымкечиричинин сәтһинә шәффаф лак чәкилир. Лөвһәни ишығын дүшмәси үчүн пәнҹәрәси олан пластик маддәдән вә ја металдан дүзәлдилмиш көвдәјә салырлар. Фоторезисторларда висмутун, кадмиумун, гурғушунун күкүрдлү вә селенли бирләшмәләри истифадә олунур.

Фоторезисторун дөврәјә гошулма схеми шәкил 9.4*б*-дә көстәрилмишдир. Ишыгланма олмајанда фоторезисторун мүгавимәти максимал олур ($R_г$) вә она гаранлыг мүгавимәти дејилир (10^6-10^7ом). Бу һалда чиһаздан чох кичик гаранлыг чәрәјаны ахыр:

$$J_г=E_d/(R_г+R_j).$$

Фоторезистору ишыгландыраркән онун електрик мүгавимәти ишыгланма мүгавимәтинә $R_{иш}$ гәдәр азалыр вә дөврәдән ахан чәрәјан артыр: $J_{иш}=E_d/(R_{иш}+R_j)$.

Ишыгланма чәрәјаны илә гаранлыг чәрәјанынын фәргинә биринҹи кечиричилик фоточәрәјаны дејилир: $J_ф=J_{иш}-J_г$

Ишыг селини артыраркән кечиричилик електронларынын бир һиссәси атомларла тоггушуб онлары ионлашдырыр вә әлавә електрон сели јарадыр. Бунун нәтиҹәсиндә әмәлә кәлән чәрәјана икинҹи кечиричилик чәрәјаны дејилир.

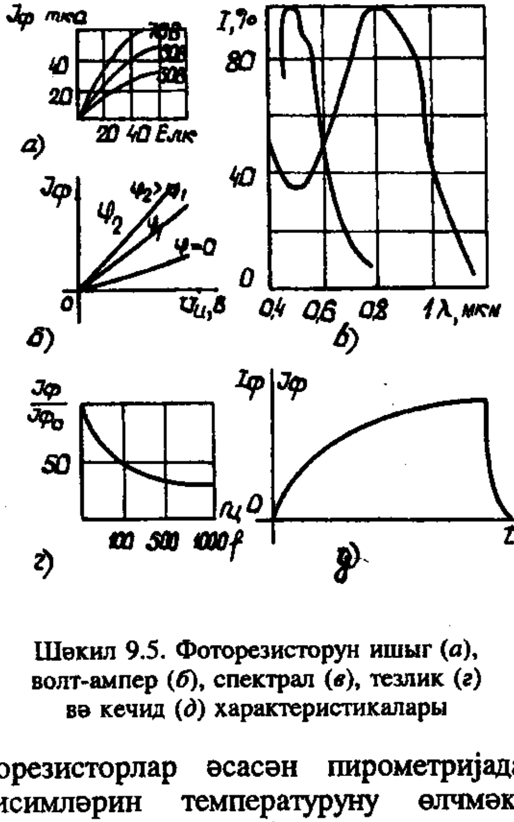
Хариҹи дөврәдән ахан чәрәјанын тә'сириндән јүк мүгавимәтиндә кәркинлик дүшкүсү дәјишир $\Delta U_{чых}=J_ф R_j$.

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

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

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: $K_u=J_ф/ФU_a$.

Фоторезисторун характеристикалары шәкил 9.5-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 9.5. 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 һәссаслыға 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.

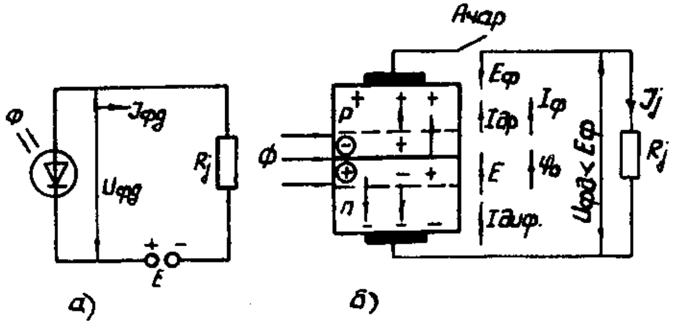
Фотодиод әкс чәрәјанын гијмәти ишыгланмадан асылы олан јарымкечиричи диода дејилир. Фотодиодда кедән физики просесләр ишыг диодларында баш верән просесләрә көрә әкс характер дашыјыр. Бурада кифајәт гәдәр јүксәк енержили фотонларын тә'сириндән маддәнин електронлары валент зонасындан чыхарылыб кечиричилик 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 $J_ф=q\eta Ф_0$ ифадәси илә тә'јин олунур. Бурада $Ф_0$ - 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

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

Фотодиод режиминдә чиһаза әкс истигамәтдә кәнар кәркинлик мәнбәјиi гошулур (шәкил 9.6). Бу һалда диодун үзәринә ишыг сели көндәрилдикдә онун дөврәсиндән кичик (кермани-ум үчүн 10-20 мкА, силисиум үчүн 1-2 мкА) гаранлыг чәрәјаны ахыр.



Шәкил 9.6. Фотодиодун фоточевиричи (*а*) вә фотокенератор (*б*) режиминдә гошулмасы

Ишыгланма оланда диодда әлавә електрон дешик чүтләри јараныр вә гејри-әсас јүкдашыјычыларын кечиддән ахыны чохалыр: електронлар *p* гатындан *n* гатына, дешикләр исә әкс тәрәфә кечирләр. Нәтичәдә дөврәдән ахан чәрәјан чохалыр. Јүк мүгавимәтинин вә мәнбә кәркинлијинин дүзкүн сечилмиш гијмәтләриндә чәрәјан ишыгланмадан асылы олачагдыр. Јүк мүгавимәтиндәки кәркинлик дүшкүсү чиһазын 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 чәһәти температурун тә'сириндән експоненсиал дәјишән гаранлыг чәрәјанынын бөјүк олмасыдыр. Она көрә автоматиканын өлчмә дөврәләриндә фотокенератор режиминдән истифадә олунур (шәкил 9.5*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 ($\Phi>0$) 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.

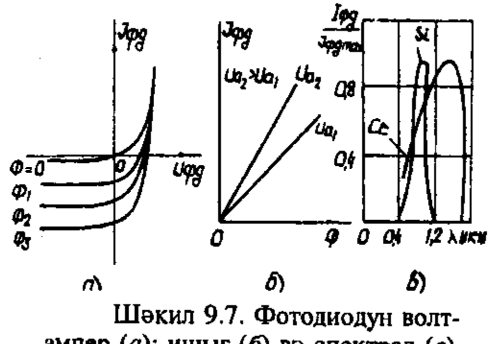
p гатында артыг дешикләр, n гатында исә артыг електронлар јығылыр вә харичи електродлар арасында тәмас потенсиал фәрги (фото е.һ.г.) -$E_ф$ әмәлә кәлир. Бу е.һ.г. потенсиал сәддин һүндүрлүјүнү азалдыр вә диффузија чәрәјанына бир гәдәр артым верир. Ачар ачыг олдуғундан структурда чәрәјанларын термодинамики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

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

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 көркинлик 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 9.7-дә көстәрилмишдир. Волт-ампер характеристикасына көрә диференсиал дахили мүгавимәт тә'јин едилир:



Шәкил 9.7. Фотодиодун волт-ампер (*а*); ишыг (*б*) вә спектрал (*в*) характеристикалары

$$R_д = (dU_д / dJ_д)_{\Phi=const}$$

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.

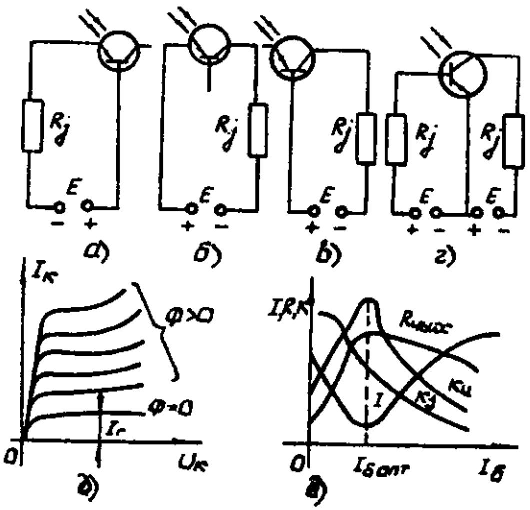
Фотодиодлар күнәш батарејаларында, фотометрија вә фотоколориметрија өлчү гурғуларында, температуру автоматик нәзарәт вә тәнзим едән гурғуларда, тозөлчәнләрдә, рәгәмли һесаблајычы машынларда, нүвә һиссәчикләрини гејд едән вә сајан гурғуларда истифадә олунурлар.

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 9.8-дә көстәрилмишдир.

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

$J_г = J_{кб}/(1-\alpha)$ ахыр. Фототранзистор сәрбәст базалы схем үзрә гошуларса (шәкил 9.8*б*) ишыг селинин тә'сириндән база гатында сәрбәст јүкдашыјычылар јараныр.



Шәкил 9.8. 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 $\beta J_б$ 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

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

Фототранзисторун волт-ампер характеристикасы ади фотодиода нисбәтән даһа бөјүк маиллијә малик олур (шәкил 9.8*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 9.8*г*). Шәкил 9.8*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 ҹәһәтдән фототранзисторлары шүшә пәнҹәрәси олан көвдәләрдә јерләшдирирләр.

Фототиристор ишыг сели васитәси илә ачылан чохгатлы јарымкечириҹи структура малик олан ҹиһаза дејилир. Ади тиристордан бу ҹиһазын фәрги ондадыр ки, онун көвдәсиндә ишыг вермәк үчүн пәнҹәрә олур. Белә ҹиһазы ачмаг үчүн һәм ишыг селиндән, һәм дә идарәедиҹи 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 ҹәрәјаны өтүрмә әмсалларынын артырылмасы онларын ишыгландырылмасы һесабына баш верир.

Триод типли тиристорун гурулушу вә шәрти ишарәси шәкил 9.8*а*-да көстәрилмишдир. Ишыгланма олмајанда ($Ф$=0) ҹиһаз ади тиристор кими ишләјир вә онун гаранлыг ҹәрәјаны белә тә'јин олунур:

$$J = \frac{J_{к_0}}{(1-\alpha_1-\alpha_2)}.$$

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

Ҹиһаза ишыг сели тә'сир етдикдә онун ишыгланан гатларында фотонларын удулмасы нәтиҹәсиндә електрон-дешик ҹүтләри јараныр. Бу заман гејри-әсас јүкдашыјыҹылары 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 јүкдашыјыҹыларынын әлавә инжексијасы баш верир вә ишыг селинә мүтәнасиб дәјишән фотоҹәрәјан јараныр. Фототиристорун ҹәрәјаны бу һалда белә тә'јин олунур:

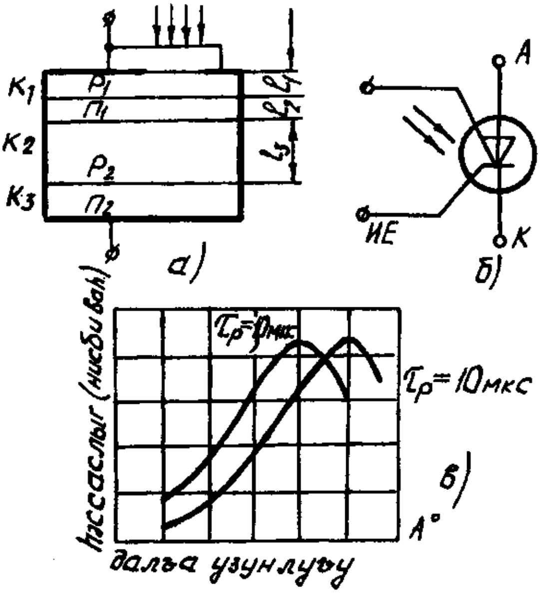
$$J_\alpha = \frac{J_{к_0} + J_Ф}{(1-\alpha_р-\alpha_n)}.$$

α_p вә α_n-еквивалент транзисторларын ҹәрәјаны 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 фототиристорун спектр һәссаслығына чох тә'сир көстәрир.

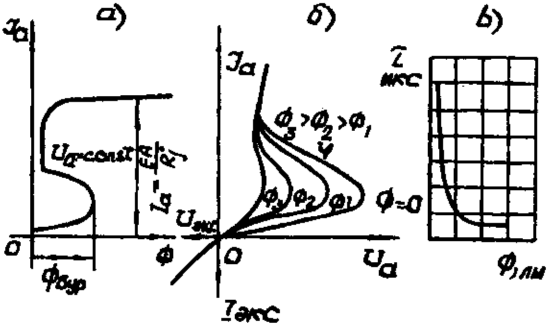
Констуктив вә техноложи үсулларла базада гејри-әсас јүкдашыјычыларын јашама мүддәтини дәјишмәклә спектрал характеристикада максимал вәзијјәт тә'мин етмәк олар (шәкил 9.9*в*).



Шәкил 9.9. 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 9.10-да көстәрилмишдир. Ишыг характеристикасындан көрүнүр ки, ($J_\alpha=f(\Phi)$, $U_\alpha=const$) фототиристор ачыландан сонра онун чәрәјаны $J_\alpha=E_\alpha/R_j$ гәдәр артыр вә ишыг селинин сонракы артымы чәрәјаны дәјишмир. Демәли, башга фотоелектрон чиһазлардан фәргли олараг фототиристор ики стабил вәзијјәтә малик олур вә ондан јаддаш гурғусу кими истифадә етмәк олар. Волт-ампер характеристикасындан ($J_a=f(U_a)$, Ф=const вә $J_н=0$) көрүнүр ки, ишыг сели артдыгча ачылма кәркинлији азалыр. Бу характеристикалардан фототиристорун әсас параметрләрини тә'јин етмәк олар.



Шәкил 9.10. 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:

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

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

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

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

Бурада $U_{иш0}$ - $\Phi=0$ оланда ачма кәркинлији; Φ_h-чиһазы ача билән һүдуд ишыг сели; Φ_∂-U_a-нын минимал гијмәтиндә чиһазы ачан дүзләндиричи ишыг сели (фототиристорун волт-

ампер характеристикасынын дүз голуна ујғун кәлән ишыг сели); *B* - сабит әмсалдыр.

Ишыг селинин интенсивлији артдыгча фототиристорун гапалы вәзијјәтдән ачыг вәзијјәтә кечмә мүддәти (τ) азалыр (шәкил 9.10*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:

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

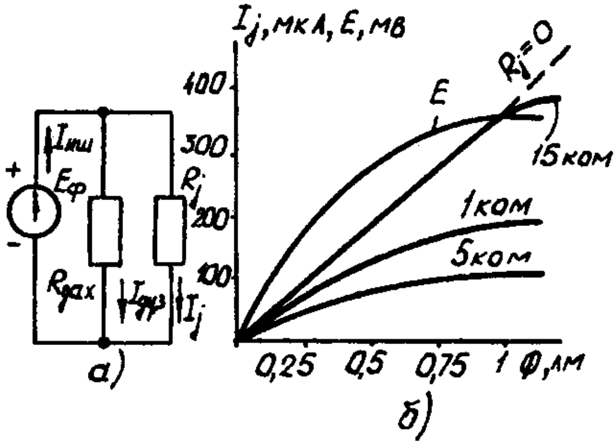
Бурада R_{υ} - ишығын әкс олма әмсалы; η - квант чыхышы; β_{ϕ} – орта кечиддә јүк дашыјычыларынын сәтһи рекомбинасијаја аид иткиләрлә әлагәдар олан јығылма әмсалыдыр.

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 фототиристорлар күчлү инверторларын, тезлик чевиричиләринин, кәр-

кинлик чевиричилəринин вə с. идарə схемлəриндə истифадə олунур.

Вентил фотоелементлəринин иши јарымкечиричинин *р-n* кечиди ишыгланаркəн бағлы гатда баш верəн фотоеффект һадисəсинə əсасланыр. Бу заман əмəлə кəлəн електрон-дешик чүтлəри *р-n* кечиди зонасында əкс истигамəтдə диффузија едирлəр. Електронлар *n* гатына, дешиклəр исə *р*-гатына кечирлəр, нəтичəдə *n* гаты əлавə мəнфи, *р*-гаты исə əлавə мүсбəт јүк əлдə едир. Белəликлə, кечидин һəр ики тəрəфиндə мүхтəлиф ишарəли фəза јүклəри јараныр вə бунун нəтичəсиндə харичи дөврəдəн чəрəјан ахыр. Бу һалда вентил фотоелементи дөврəдə е.һ.г. јарадыр вə ишыг енержисини електрик енержисинə чевирəн фотокенератора дөнүр. Фото е.һ.г.-нин гијмəти ишыгланмаја мүтəнасиб олур. Лакин алынан е.һ.г. кечиди дүз истигамəтдə сүрүшдүрүр ки, бу да вентил фотоелементинин дахили мүгавимəтини азалдыр. Бу һалда елементə јүк гошуларкəн фоточəрəјан ики дөврə илə (јүк мүгавимəтиндəн вə фотоелементин дахили мүгавимəтиндəн) ахыр (шəкил 9.11*а*). Јүк чəрəјаны $J_j = J_{иш} - J_{дүз}$. Бурада $J_{иш}$- ишыг селинин тə'сириндəн əмəлə кəлəн јүклəр һесабына ахан чəрəјан, $J_{дүз}$-ишыгланма нəтичəсиндə потенсиал сəдди азалан *р-n* кечиддəн əсас јүкдашыјычыларын кечмəси илə əлагəдар ахан чəрəјандыр. Јүк мүгавимəти артдыгча јүк чəрəјаны азалыр (шəкил 9.11*б*).



Шəкил 9.11. Вентил фотоелементинин əвəз схеми (*а*) вə јүк характеристикасы (*б*)

Вентил фотоелементләрини селендән, керманиумдан 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.

9.3. 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 9.12*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 арашдыраг (шәкил 9.12*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 9.12*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 бир-бириндән 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:

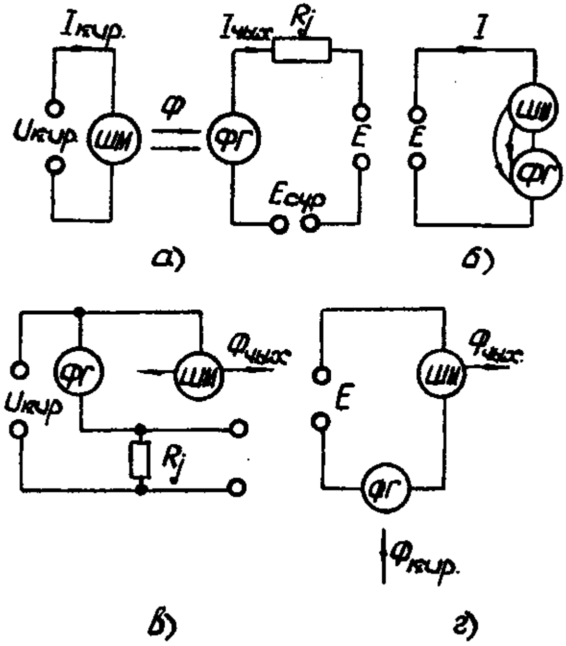
1) дүзүнә дахили оптик әлагәли чиһазлар;

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.

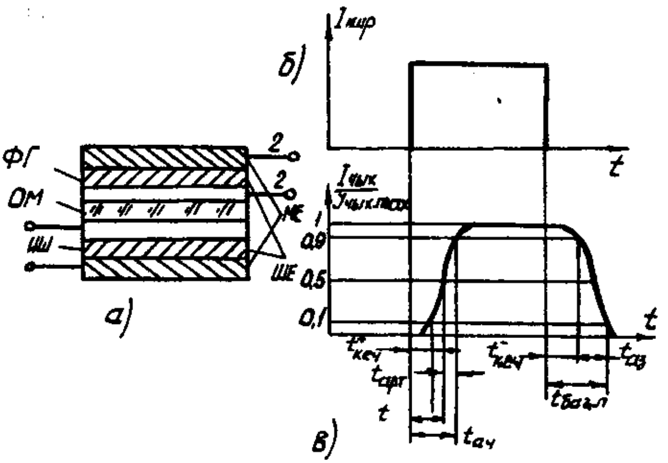
Фотогәбуледичинин һәр һансы бир чыхыш параметринин ишыг шүаландырычысынын чәрәјан вә ја кәркинлијиндән асылылығына оптронун өтүрмә характеристикасы дејилир.



Шәкил 9.12. Оптоелектрон чүтүнүн гурулушу (а), кириш (б) вә чыхыш (в) чәрәјан импулсларынын диаграмлары

Шәкил 9.13-дә бүтүн дөрд нөв оптронларын схемләри көстәрилмишдир.

Дүзүнә дахили оптик әлагәли чиһазлар (шәкил 9.13*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 9.13. Оптроларынын мүхтәлиф әлагәли схемләри

$U_{кир}$ сигналы *ИШ*-дән ахан $J_{кир}$ чәрәјаныны јарадыр вә бу онун шүаландырычы ишыг селини мүәјјән едир. Фотогәбуледичи ишыг селини $J_{чых}$ чәрәјанына чевирир. Тәнзим едилмәјән *Е* мәнбәји фотогәбуледичинин електрик режимини мүәјјән едир. Идарә едилән сүрүшмә кәркинлијинин ($E_{сүр}$) гијмәтини дәјишмәклә оптронун волт-ампер характеристикасында ишчи нөгтәсинин јерини дәјишмәк вә чиһазы идарә етмәк мүмкүндүр. Бу нөв оптронлар електрик сигналларынын чеврилмәси вә күчләндирилмәсиндә, алчаг кәркинликли вә јүксәк кәркинликли електрик дөврәсинин узлашдырылмасында вә тәмассыз електрик мүгавимәтләри кими истифадә олунур.

Дүзүнә дахили оптик әлагә аналог вә ачар оптронларынын әксәријјәтиндә резисторлу, диодлу, транзисторлу вә тиристорлу оптронларда истифадә едилир.

Дүзүнә електрики вә әксинә мүсбәт оптик әлагәли схемдә шүаландырычы вә фотогәбуледичидә ардычыл бирләшдирилир вә бир кәркинлик мәнбәјинә гошулур (шәкил 9.13*б*). Илкин һалда фотогәбуледичинин мүгавимәти бөјүк олур вә шүаландырычыдан јалныз гаранлыг чәрәјаны ахыр. Идарәедичи тә'сир олан һалда (фотогәбуледичи әлавә шүаландырыланда, *Е* кәркинлији артырыланда вә ја шүаландырычыдан кечән чәрәјан импулс шәклиндә артанда) дөврәдә чәрәјан 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 9.13*б*) шүаландырычы вә фотогәбуледичи електрики чәһәтдән парарлел 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 9.13*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;

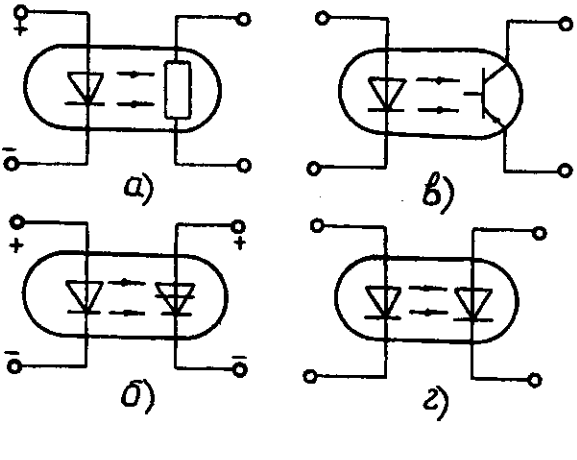
2) чыхыш параметрләри групу чыхыш дөврәсинин параметрләринин јығымыдыр вә фотогәбуледичинин нөвүндән асылыдыр;

3) үчүнчү група өтүрмә әмсалы, кириш сигналынын һүдуд тезлији, сигналын максимал өтүрүлмә сүр'әти, чыхыш сигналы импулсунун артма вә азалма мүддәтләри, гошулма мүддәти, ачылма мүддәти дахилдир;

4) дөрдүнчү група галваник ајырма параметрләри, кириш вә чыхыш арасында кәркинлијин максимал вә пик бурахыла билән гијмәтләри, кечид тутуму, галваник ајырма мүгавимәти вә башгалары дахилдир.

Оптоҹүтләрин шәрти ишарәләри шәкил 9.14-дә көстәрилмишдир. Ән универсал ҹиһазлар резисторлу оптронлардыр. Онлар һәм аналог, һәм дә ачар режиминдә ишләјә билирләр, мүгавимәтин кениш дәјишмә 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 бағлаја 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 9.14. Резисторлу (*а*), тиристорлу (*б*), транзисторлу (*в*) вә диодлу (*г*) оптоҹүтләр

Транзисторлу оптронлар диодлу ҹиһазлара нисбәтән даһа бөјүк һәссаслыға маликдир. Ики емиттерли транзисторлардан истифадә етдикдә (волт-ампер характеристикасы координат башланғыҹына көрә симметрик олур) онлардан дәјишән ҹәрәјан 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 ҹәрәјанлы вә 1000 волта гәдәр бөјүк кәркинликли дөврәләри ачыб бағламаг үчүн истифадә едилир. Онларын ишчи тезликләри бир нечә килоһерс һәддиндә олур.

10. МИКРОЕЛЕКТРОНИКА

Микроелектроника бәрк чисим физикасынын, технолокијанын, 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 һагтында биликләрин әлдә едилмәси вачибдир.

Бу бөлмәдә чох јығчам бир шәкилдә микроелектрониканын әсас инкишаф истигамәти - интеграл микросхемләрин ишләниб һазырланмасы һагтында мә'лумат верилир.

Микроелектрониканын әсаслары һагтында биликләрин әлдә олунмасы електрон апаратларын јарадылмасы заманы елемент базасынын сечилиб истифадә едилмәсинә көмәк көстәрә биләр.

10.1. 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.

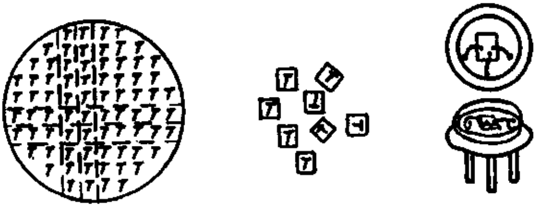
"Интеграл схем" термини ајры-ајры компонентләрин бирләшмәсини (интеграсијасыны) вә һәм дә ајры-ајры компонентләрә нисбәтән гурғунун јеринә јетирдији функсијаларын мүрәккәбләшмәсини әкс етдирир.

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 технолоkија 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 10.1*а*). Сонра лөвһә үфүги вә шагули сурәтдә јүзләрлә ајры-ајры, һәрәси бир транзистордан ибарәт кристаллара бөлүнүр (шәкил 10.1*б*). Даһа сонра кристаллар харичи чыхышлары олан көвдәјә јерләшдирилир вә истифадә үчүн сифаришчијә көндәрилир (шәкил 10.1*в*).



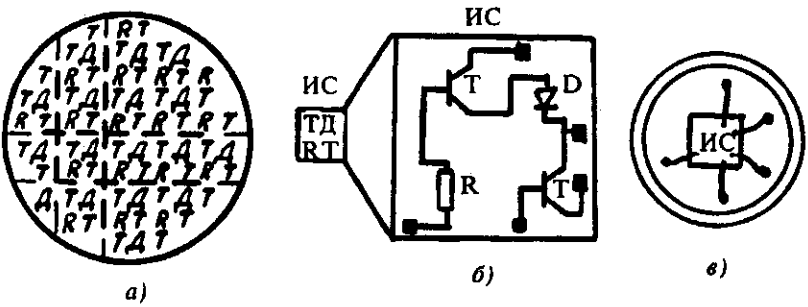
а) *б)* *в)*

Шәкил 10.1. 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 10.2*а*). Бу компонентләр бир-бирилә мәфтилләрлә вә галаjла joх, лөвһәнин сәтһинә "үфүрүлмүш " назик гыса метал золагларла бирләшдирилир. Беләликлә, һәр "комплект" һазыр интеграл схемдән ибарәт олур (шәкил.10.2*б*). Лөвһәнин сәтһиндә бәрабәр паjланмыш интеграл схемләр аjры-аjры кристаллара бөлүнүр вә көвдәләрә jерләшдирилир (шәкил 10.2*в*). Бу һалда конструктив чәһәтдән ваһид електрон чиһазы шәклиндә һазыр функсионал говшаг алынмыш олур.



Шәкил 10.2. Интеграл схемләрин групу үсулу илә һазырланмасы: *а)* ики транзистор, диод вә резистордан ибарәт силисиум лөвһәси; *б)* комплектин тәркибиндә елементләрин бирләшмәси; *в)* көвдәнин ичәрисиндә jерләшмиш һазыр интеграл схем

Елементләри бир–бири илә назик метал золагларла бирләшдирмәк үчүн електродларын һамысынын чыхышы бир мүстәвидә – лөвһәнин сәтһиндә jерләшмәлидир. Белә имканы хүсуси планар технолокиjа jарадыр. Тәбиидир ки, груп үсулу илә бирликдә микроелектроника планар технолокиjаны да интеграл схемләрин һазырланмасында истифадә етмишдир.

Көрүндүjү кими, интеграл схемләр әсасында електрон апаратлары ишләниб һазырланаркән чиһазын е'тибарлығыны азалдан хеjли галаjланан бирләшмә арадан чыхыр, һәр елементин көвдәси вә чыхышы олмадығындан чиһазын күтләси, өлчүләри вә чохлу jығма вә монтаж әмәлиjjатларына лүзум галмадығындан гурғунун дәjәри азалыр. Мүасир груп технолокиjасы әса-

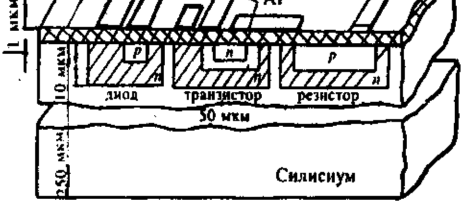
сында һәрәсинин 200 минә гәдәр елементи олан бир нечә мин интеграл схеми, јә'ни бир нечә милјон елементи ејни вахтда һазырламаг мүмкүндүр. Өзү дә бу елементләрин һамысы ади транзисторун һазырланмасында олдуғу кими садә *p-n* кечидләрин формалашдырылмасы јолу илә һазырланыр. Бунун нәтичәсиндә интеграл схемләрин параметрләринин охшарлыг дәрәчәси артыр, дискрет елементләрдә јығылмыш схемләрә нисбәтән е'тибарлыг хејли јүксәлир, елемент базасынын мүрәккәбләшмәси һесабына конструксијанын мүрәккәблији, харичи бирләшмәләрин сајы вә електрон апаратын һәчми 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.

10.2. Интеграл микросхемләрин тәснифаты

Һазырланма технолокијасына көрә интеграл микросхемләр 3 јерә – јарымкечиричи, 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.

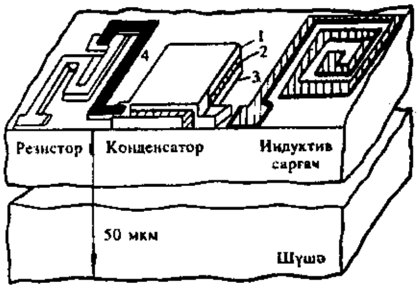
Јарымкечиричи интеграл микросхемләрдә бүтүн актив (транзистор, диод вә с.) вә пассив (резистор, конденсатор) елементләр вә онларын бирләшмәләри ваһид илкин јарымкечиричи кристалда бир-бириндән ајрылмасы мүмкүн олмадан әлагәләндирилмиш *p-n* кечидләрин мәчмусу кими һазырланыр. Бурада һәчминдә вә сәтһиндә планар технолокија илә микросхемләрин елементләри вә тәмас саһәләри јерләшдирилмиш јарымкечиричи кристал актив рол ојнајыр (шәкил 10.3).



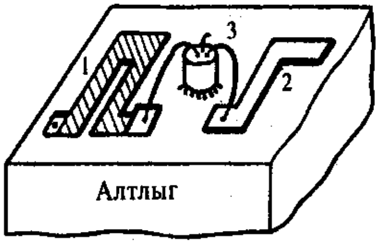
Шәкил 10.3. Јарымкечиричи интеграл схемдә елементләрин структуру

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 10.4), јарымкечиричи чиһазлар вә башга компонентләр (миниатүр чини конденсаторлар, индуктивликләр) исә алтлығын үзәриндә дискрет деталлар кими јерләшдирилир (шәкил 10.5). 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 микро-
схемләрдә компонент кими истифадә олунур (микројығымлар үчүн характерикдир).



Шәкил 10.4. Тәбәгәли интеграл схемин елементләринин структуру: 1-үст лөвһә; 2-алт лөвһә; 3-диелектрик; 4-бирләшдиричи метал золаг



Шәкил 10.5. 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 јарымкечирич и 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'సириндән елементләринин вәзијјәтләрини сахламаг хүсусијјәтини характеризә едир;
- гида мәнбәјинин кәркинлији;
- интеграл схемин елементләринин сәпәләнмә күчү;
- мәнтиги ваһидә вә мәнтиг сыфра ујғун чыхыш кәркинлији;

- схемин бир вәзијјәтдән дикәринә кешулма мүддәти;
- ишчи температурлар диапазону;
- чыхыш сигналынын өн чәбһәсинин артма вә азалма мүддәти.

Мәнтиг интеграл схемләринин параметрләри онларын статик вә кечид характеристикалары илә тә'јин едилир.

Хәтти интеграл схемләр бир чох параметрләрлә характеризә олунур, чүнки мүхтәлиф типли күчләндиричиләр, мултивибраторлар, сүзкәчләр мүхтәлиф параметрләрлә гијмәтләндирилирләр.

10.3. Јарымкечиричи интеграл схемләриндә елементләрин һазырланмасы

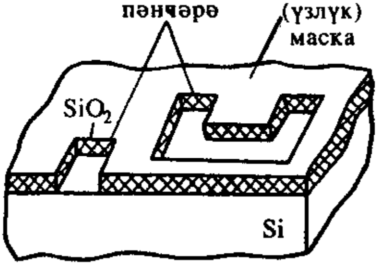
Јарымкечиричи интегралмикросхемләр ики синфә: биполјар вә МДЈ (метал-диелектрик-јарымкечиричи) интеграл микросхемләрә бөлүнүр. Һәр ики синфә мәхсус интеграл схемләрин технолокијасы силисиум лөвһәсинә нөвбә илә донор вә акцептор ашгарлары әлавә етмәклә кристалын сәтһи алтында алтында мүхтәлиф кечиричилијә малик назик гатлар вә гатларын сәрһәдләриндә *p-n* кечидләр јарадылмасына әсасланыр. Ајры-ајры гатлар резистор структурлары, *p-n* кечидләр исә диод вә транзистор структурлары кими истифадә олунур.

Лөвһәјә донор вә акцептор ашгарларынын әлавә едилмәси бир-бириндән кифајәт гәдәр аралы (10-100 мкм) јерләшән ајры-ајры локал саһәләрдә баш верир. Бунун үчүн дешикләри олан хүсуси маскалардан – үзлүкләрдән (фотошаблонлардан) истифадә едирләр. Үзлүјүн дешикләриндән лазыми саһәләрдә ашгар атомлары јарымкечиричи лөвһәнин дахилинә кечир. Адәтән, үзлүк ролуну силисиум лөвһәсинин үстүнү өртән оксид (SiO_2) тәбәгәси ојнајыр. Бу тәбәгәдә хүсуси үсулларла тәләб олунан дешикләр топлусу вә ја башга сөзлә тәләб олунан рәсм һәкк едилир (шәкил 10.6). Үзлүкдәки (оксид тәбәгәсиндәки) дешикләрә пәнчәрә дејилир.

Биполјар интеграл схемләрин әсас елементи *n-p-n* типли транзистордур. Бүтүн техноложи дөвр транзисторун һазырланмасына јөнәлмишдир. Бүтүн башга елементләр мүмкүн олдугча әлавә технолоjи әмәлијјатлар олмадан транзисторла ејни заман-

да һазырланмалыдыр. Мәсәлән, резисторлар *n-p-n* транзисторун база гаты илә еjни заманда һазырланыр вә база гаты гәдәр дәринликдә (кристалда) jерләшир. Конденсатор кими әкс гошулмуш *p-n* кечидләрдән истифадә олунур.

Бунларын *n* гатлары *n-p-n* транзисторун коллектор гатына, *p* гатлары исә база гатына уjғун кәлир.



Шәкил 10.6. Ашгар гатмаг үчүн пәнҹәрәси олан оксид үзлүjү (маскасы)

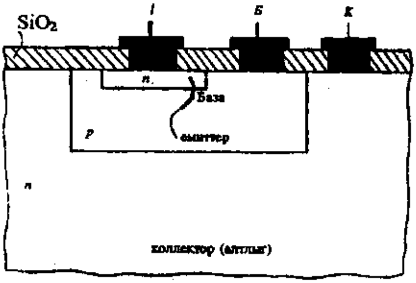
МДJ интеграл схемин әсасыны индуксиjа едилмиш каналлы МДJ транзистор тәшкил едир. Резистор ролуну икигүтблү схеми илә гошулмуш транзистор оjнаjыр. Конденсатор кими транзисторун идарәедичи електродунун алты илә еjни вахтда һазырланан диелектрик гаты, мәнбә вә мәнсәблә еjни вахтда һазырланан jарымкечиричи лөвһәләр истифадә олунур.

Биполjар интеграл схемдә елементләрин кристал васитәсилә әлагәдә олмамасы үчүн онлары бир-бириндән изолә етмәк лазымдыр. Гоншу МДJ транзисторларын гаршылыглы әлагәси олмур вә онлары бир-биринә чох jахын jерләшдирмәк мүмкүн олур. Бу, МДJ интеграл схемләринин мүсбәт ҹәһәтләриндән биридир.

Jарымкечиричи интеграл микросхемләрдә трансформаторлар вә индуктив сарғаҹлар олмур. Чүнки бәрк ҹисимдә електромагнит индуксиjасына еквивалент олан һәр һансы бир һадисәни әлдә етмәк мүмкүн олмур. Әкәр схемдә трансформатор вә индуктив сарғаҹ тәләб олунарса ондан "асылмыш" компонент кими истифадә етмәк лазымдыр.

Jарымкечиричи интеграл схемләр галынлығы 30-50 мкм вә диаметри 50-100 мм олан силисиум алтлыгларда планар технолокиjа әсасында һазырланыр. Планар технолокиjаjа көрә һазырланан елементләр jасты структура малик олур. *p-n* кечидләр вә уjғун тәмас саһәләри алтлығын бир (jухары) сәтһинә чыхыр (шәкил 10.7). Силисиум оксиддән олан тәбәгә *p-n* кечид ләри харичи тә'сирдән горуjур. Техноложи дөвр гуртарандан сонра алтлыглары алмаз кәсичиләрлә вә jа лазер шүасы илә аjры-аjры

кристаллара бөлүрләр вә бунларын һәр бири ајрыча интеграл микросхем тәшкил едир. Бундан әввәл јарымкечиричи интеграл микросхемләрин електрик параметрләрини өлчүр вә зај микросхемләри ајы-рырлар.



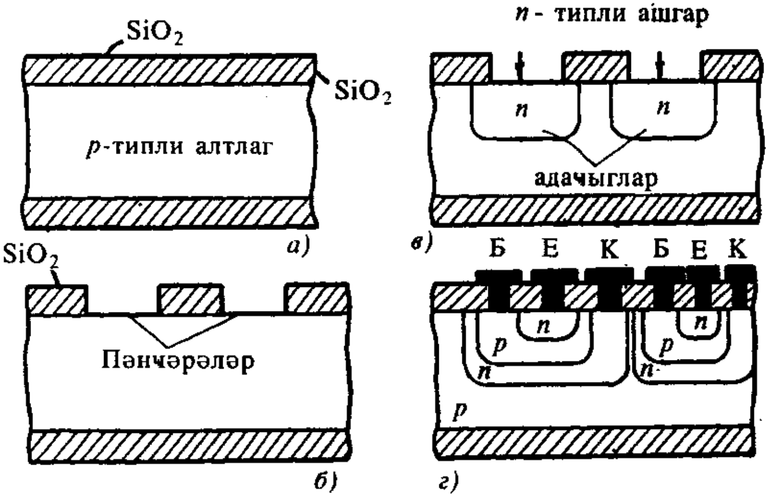
Шәкил 10.7. Планар технолокија илә һазырланмыш јарымкечиричи интеграл елементин структуру

Транзисторларын һазырланмасы. Транзисторлары һазырламаг үчүн әсасән планар-диффузијалы вә планар-епитаксиал технолокијадан истифадә едирләр.

Биполјар транзистору һазырламаг үчүн планар-диффузијалы технолокијада әввәлчә *p* типли алтлығын сәтһиндә термики оксидләшмә үсулу илә силисиум оксиддән назик мүһафизә гаты јарадылыр (шәкил 10.8.). Сонра фотолитографија үсулу илә 1-чи оксид үзлүјү әмәлә кәтирмәк үчүн оксид тәбәгәсинин үзүнә ишығa 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. Нәтичәдә, интеграл микросхемдә транзисторларын верилән сајына ујғун вә тәләб олунан шәкилдә дешикләр (пәнчәрәләр) топлусу јараныр (шәкил 10.8б).

Бу пәнчәрәләрдән алтлығын дәринликләринә *n* типли ашгарларын диффузијасы һәјата кечирилир вә гоншу саһәләрдән вә алтлыгдан бағлы *p-n* кечидләрлә изолә олунмуш *n* типли гатлар – адачыглар әмәлә кәлир (шәкил 10.8в). Бу адачыглар дикәр елементләрин јаранмасы үчүн әсас тәшкил едир вә онларын үзәриндә планар транзисторлар јарадылыр. Бунун үчүн икинчи оксид үзлүјү васитәсилә *n* типли коллектор ролуну ојнајан адачыгларын дәринлијинә *p* типли ашгар диффузија едиләрәк *p* типли база гаты әмәлә кәтирилир. Сонра үчүнчү үзлүкдән адачыглара *n* типли ашгар диффузија едиләрәк *n* типли емиттер јарадылыр. Нәһајәт, дөрдүнчү оксид үзлүјүндән гатлары вә лазыми елемент-

ләри бирләшдирән јолларын үзәринә металлашдырылмыш тәмаслары тоз шәклиндә сәпәләјирләр (шәкил 10.8г).

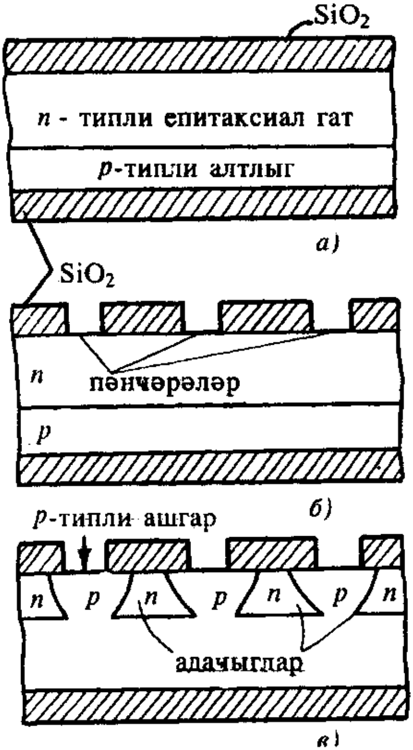


Шәкил 10.8. Планар-диффузија технолокијасы илә биполјар транзисторун һазырланмасы мәрһәләләри

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 10.9. Планлар-епитаксиал технолокија илә биполјар транзисторун һазырланмасы мәрһәләләри

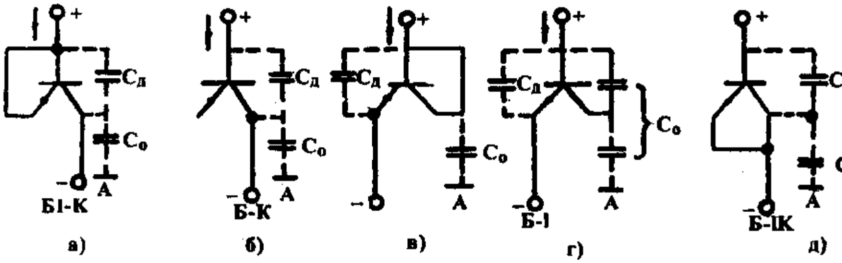
епитаксиал гатдан истифадә едилир (шәкил 10.9а). Сонра оксид гатындан үзлүк дүзәлдилир (шәкил 10.9б) вә онун пәнҹәрәләриндән *p* типли ашгарын диффузијасы тәшкил едилир. Нәтиҹәдә, епитаксиал гатда планар - диффузијалы технолокијада алынанлара бәнзәр бағлы *p-n* кечидләрлә изолә олунмуш адачыглар јараныр (шәкил 10.9в).

Бундан сонра планар–диффузијалы технолокијада олдуғу кими адачыглар 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 техноложи 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-технoложи 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 10.10). Коллектор кечиди әсасында алынан диодлар (шәкил 10.10 д, е) ән бөјүк бурахыла билән әкс кәркинлијә (50В) маликдирләр.



Шәкил 10.10. 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 10.10в) 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 10.10г) 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 бағлы 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 10.10в). Дикәр вариантларда јүкләр һәм базада, һәм дә коллекторда јығылыр вә онларын сорулуб апарылмасы үчүн даһа чох вахт тәләб олунур.

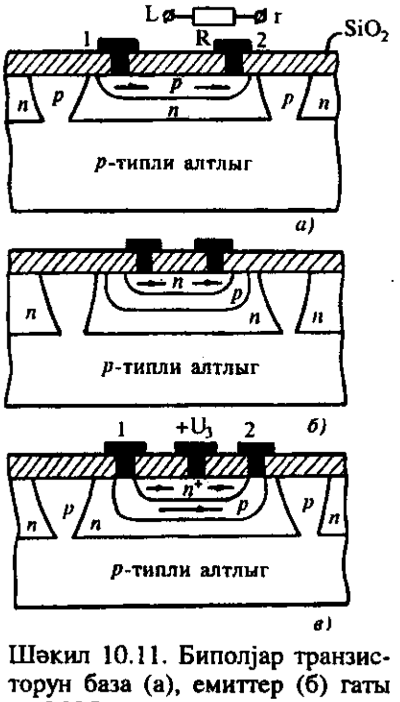
Көстәрилән вариантлардан емиттер дөврәсиндә алынан диодлар (шәкил 10.10 в, г) оптимал һесаб олунур. Ән чох истифадә олунан коллектор кечиди гыса гапанмагла емиттер кечидиндә алынан диоддур.

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 10.11а). 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 10.11. Биполјар транзисторун база (а), емиттер (б) гаты вә МОЈ-транзистору (в) әсасында һазырланмыш интеграл резисторлар

$$R = \rho\ell/(вh) = \rho_S(\ell/в) = \rho_S \cdot N_S,$$

Бурада ρ, ℓ, $в$, h – ујғун олараг материалын хүсуси мүгавимәти, диффузија гатынын узунлуғу, ени вә галынлығы; $\rho_s=\rho/h$-хүсуси сәтһи мүгавимәт, $N_S=\ell/в$ – 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 10.11б) јухарыдакы гајдада тә'јин едилир.

База гаты әсасында

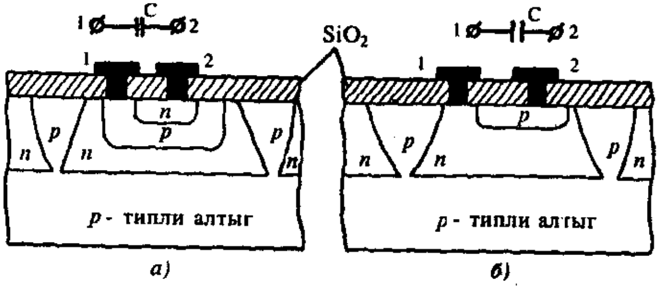
алынан диффузија резисторларынын хүсуси сәтһи мүгавимәти 100-300 Ом/квадрат, емиттер гаты әсасында алынан резисторунки исә 0,5 Ом/квадрат һәддиндә олур. Адәтән, белә резисторларын мүгавимәтләринин гијмәти 10 Ом-дан 50 кОм-а гәдәр 0,125 $мм^2$ олур ки, бу да интеграл транзисторун тутдуғу саһәдән 40-50 дәфә чохдур. *p-n* кечидләрлә изолә олунмуш диффузија резисторлары 20 Mhc-ә гәдәр тезликлә ишләјә билирләр.

Метал-оксид-јарымкечиричи структурларда резистор кими МОЈ транзисторлары истифадә олунур (шәкил 10.11в). 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 10.12).

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 10.12. 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 беләконденсаторлар 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.

10.4. 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.

Технложи 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.

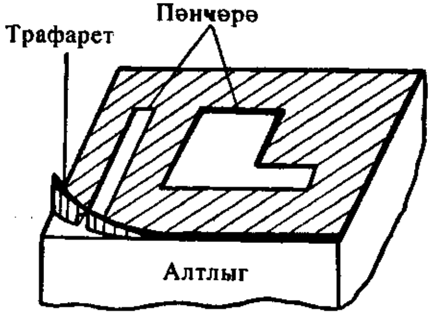
Алтлыг үчүн ән чох ишләнән материаллар шүшә-чини материаллар - ситаллардыр. Онлар јүксәк електрики изолә хүсусијјәтинә, температура, кимјәви вә абразив јејилмәјә, рүтубәт вә газ нүфузлулуғуна гаршы дајаныглыға, механики бәрклијә вә асан е'маледилмә хүсусијјәтинә маликдирләр. Бунлардан әлавә, шүшә вә чини материаллар да истифадә олунур. Алтлыглар 6x15-дән 48x60 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 10.13).

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 10.13. 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.

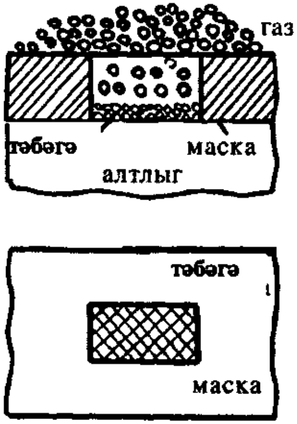
Тәбәгәләр алтлығын сәтһинә газ фазасындан чөкдүрүлүр. Бу заман тәбәгә өзүнүн верилән галынлығыны бир дәфәјә јох, тәдричән алыр: бир мономолекулјар гат о бирисинин үстүнә јығылыр вә с. (шәкил 10.14). Нөвбәти тәбәгә јетишдирилдикдән сонра газын кимјәви тәркиби вә бунунла да сонракы тәбәгәнин електрофизики 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 10.6).

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.

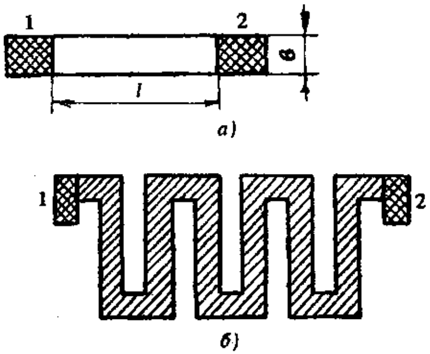
Резисторларын һазырланмасы. Бунун үчүн мүхтәлиф хүсуси сәтһи мүгавимәтә малик олан тәмиз металлардан, онларын әринтиләриндән вә микрокомпозисијалардан истифадә олунур. Металлардан хрому вә јүксәк хүсуси сәтһи мүгавимәтли танталы көстәрмәк олар. Ону тәмиз шәкилдә пассив елементләри дүзәлтмәк үчүн, оксид 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. Микрокомпозисијалар електрик хүсусијјәтләринә көрә метал әринтиләринә јахындыр. Ән чох истифадә олунан дәмир, никел вә алүминиум әлавә етмәклә хром вә силисиум әсасында алынан микрокомпозисијалардыр.



Шәкил 10.14. 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 10.15 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 10.15б). Мүгавимәти һесабламаг үчүн мүрәккәб форманы елементар дүзбучаглылара бөлүрләр.



Шәкил 10.15. Тәбәгәли резисторларын конструктив гурулушу

Конденсаторларын һазырланмасы. Ән садә шәкилдә тәбәгәли конденсатор араларында диелектрик олан ики метал гатдан ибарәт (шәкил 10.16), 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.

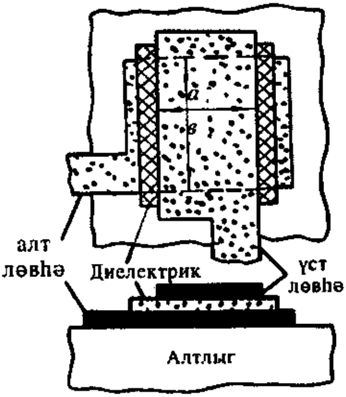
Бөјүк гијмәтли тутумлар алмаг үчүн диелектрик тәбәгә кими титан оксиди (ε-80) вә бариум-титанат (ε=1000) көтүрүлүр. Диелектрик материаллар електрик мөһкәмлији илә дә характеризә олунур ($E=U_{деш}/h$: $U_{деш}$ - дешилмә кәркинлијидир). Назикгатлы материаллар үчүн $E=0{,}1\cdot10^6$-$10\cdot10^6$В/см-дир. Диелектрик тәбәгәләринин чоху үчүн дешилмә кәркинлијинин гијмәти тә-

бәгәнин материалынын гүсурлары вә конденсаторун лөвһәләринин материалы илә мүәјјән едилир.

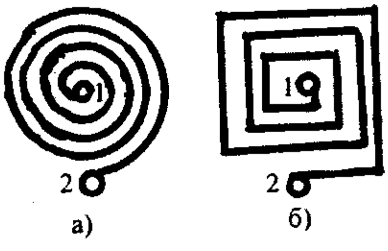
Лөвһәләр үчүн әсасән алүминиум истифадә едилир, чүнки онун атомларынын миграсија јүрүклүјү сәтһиндә оксидләшмә баш вердијиндән чох кичик олур (диелектрик назик оланда атомларын диелектрик гатына миграсија етмәси лөвһәләри гыса гапаја биләр).

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 10.17). 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 10.16. Тәбәгә шәкилли конденсатор



Шәкил 10.17. 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 үчүн ән 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.

11. ВАКУУМЛУ ВӘ ПЛАЗМАЛЫ ЕЛЕКТРОН ЧИҺАЗЛАРЫ

Газ бурахмајан өртүклә (балонла) изолә олунмуш ишчи фәзасы јүксәк сејрәклијә малик вә ја хүсуси мүһитлә (бухарла вә ја газларла) долдурулмуш, иш принсипи исә јүкләнмиш һиссәчикләрин вакуумда вә газда һәрәкәти илә әлагәдар һадисәләрә әсасланан чиһазлара електровакуум чиһазлары дејилир.

Ишчи мүһитин хүсусијјәтләринә көрә бу чиһазлар електровакуум вә ион (газбошалмалы) чиһазларына бөлүнүрләр. Електровакуум чиһазларында електрик чәрәјаны сәрбәст електронларын вакуумда һәрәкәти илә јараныр. Бунлара електрон лампалары, електрон–шүа борулары вә електровакуумлу фотоелектрон чиһазлар дахилдир. Ион (газбошалмалы) електровакуум чиһазларынын иш принсипи газларда вә металларын бухарларында електрик бошалмасынын хүсусијјәтләринә әсасланыр. Онларда електрик чәрәјаны һәм електронларын, һәм дә газ мүһитинин ионларынын һәрәкәти илә әлагәдардыр. Белә чиһазлара гөвси, көзәрән вә јүксәктезликли бошалмалы чиһазлар дахилдир.

Һәр бир електровакуум вә газбошалма чиһазы електродлар системиндән ибарәт олур. Бу електродлар әтраф мүһити чиһазын дахили фәзасындан ајыран балонун ичәрисиндә баш верән просесләри идарә етмәк үчүндүр. Һәр нөв електровакуум вә газбошалма чиһазлары үчүн хүсуси електродлар системи јарадылыр. Анҹаг електродлардан бир гисми електровакуум чиһазларынын һамысында вә газбошалма чиһазларынын чохунда мөвҹуд олур. Бу електродлара електронлары емиссија едән катодлар вә онлары јығышдыран анодлар аиддир. Јүкләнмиш һиссәчикләр селини идарә етмәк үчүн бир чох чиһазларда идарәедичи електродлар мөвҹуд олур. Онлар тор вә ја профилли лөвһәләр вә хүсуси електромагнит сарғылар шәклиндә һазырланыр. Мә'луматын мүшаһидә едилмәсини тә'мин едән чиһазларда (електрон-шүа борулары, индикасија гурғулары вә с.) екран адланан хүсуси конструктив елементләрдән истифадә едилир. Екранын көмәји илә електрон селинин вә ја електрик саһәсинин енержиси ҹисмин оптик шүаланмасына чеврилир. Електродларын конструксијалары мүхтәлиф олуб чиһазын тә'јинатындан вә иш шәраитиндән асылыдыр.

Електровакуум вә газбошалма чиһазларынын балонлары ән мүхтәлиф формада шүшәдән, металдан, чинидән вә бунларын комбинасијаларындан һазырланыр. Електродларын чыхышы балонларын ашағысындан вә јан сәтһләриндән чыхарылыр.

11.1. Електровакуум чиһазлары

Електровакуум чиһазларынын иши термоелектрон емиссија һадисәсинә әсасланыр. Бу чиһазлар термоелектрон катода, идарә едилән чәрәјана малик олур вә електрик сигналларынын мүхтәлиф чеврилмәләриндә истифадә едилир.

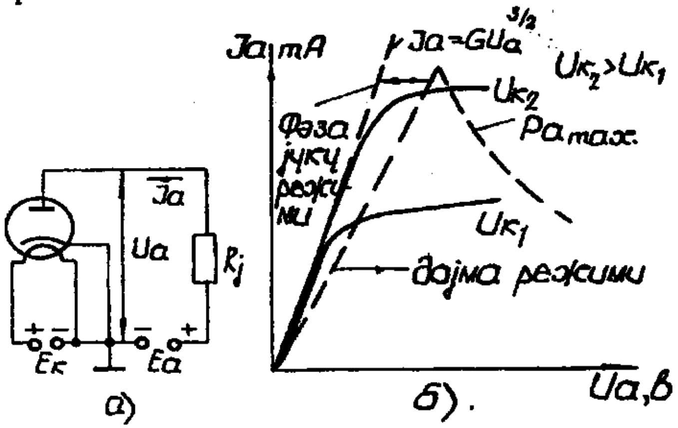
Тә'јинатына көрә електрон лампалары күчләндиричи кенератор, дүзләндиричи вә өлчү лампаларына бөлүнүрләр. Иш режиминин хүсусијјәтинә көрә онлар импулс режимли вә арамсыз ишләјән лампалара бөлүнүрләр. Сигналларын ишчи тезлик диапазонуна көрә лампалар алчаг, јүксәк вә ифрат јүксәк тезликли олурлар.

Конструктив тәртибатларына көрә лампалар шүшә, ири өлчүлү, миниатүр (бармаг типли) вә ифрат миниатүр лампалара бөлүнүрләр. Електровакуум лампалары шүшә вә ја метал балонун ичәрисиндә јерләшдирилмиш термоелектрон катоддан, аноддан вә мүхтәлиф тә'јинатлы торлардан ибарәтдир. Балонлар һерметик һазырланыр вә онларын ичәрисиндә јүксәк вакуум (10^{-4}-10^{-5} Па) јарадылыр.

Теромоелектрон катод гыздырылдыгда електронлары емиссија едир. Анода катода нисбәтән мүсбәт потенсиал верилдијиндән онун саһәси катоддан чыхан електронлары јығыр вә бунун нәтичәсиндә анодун дөврәсиндә (бу һәм дә лампанын чыхыш дөврәси олур) чәрәјан алыныр. Торларын көмәји илә катоддан анода кедән електрон сели вә бунун нәтичәсиндә чыхышдакы чәрәјан вә ја кәркинлик идарә олунур.

Електровакуумлу диод. Бу, һерметик балонун ичәрисиндә јерләшмиш аноддан вә катоддан ибарәт чиһаздыр (шәкил 11.1*а*). Катод көмәкчи кәркинлик (көзәрмә) мәнбәји $E_к$ васитәсилә гыздырылыр вә јүксәк температурун тә'сириндән електронлары емиссија едир. Анод кәркинлик мәнбәји E_a–нын һесабына анода катода нисбәтән мүсбәт потенсиал верилир вә онун електрик саһәсинин тә'сири алтында анод вакуумлу фәзадан она тәрәф һәрәкәт едән електронлары гәбул едир. Балонда

сејрәк газын сыхлығы о гәдәрдир ки, електронлар катоддан анода һәрәкәт јолунда демәк олар ки, газ молекуллары илә тоггушмурлар.



Шәкил 11.1.Електровакуумлу диодун гошулма схеми вә волт-ампер характеристикасы

Чыхыш ишини ичра етмәк үчүн тәләб олунан енержијә малик електронлар катоддан вакуума учаркән һәм гијмәтчә, һәм дә истигамәтчә мүхтәлиф сү'рәтләрә малик олурлар. Катодла анод арасындакы фәзада пајланмыш мәнфи һәчми електрик јүкү јараныр. Анодун потенсиалы (U_a=E_a-J_aR_j) бу јүкү нәзәрә алмагла анод-катод арасында електрик саһәсини мүәјјән едир.

Катод сојуг оланда (емиссија олмајанда) катодла анод арасындакы потенсиал хәтти дәјишир вә електрик саһә кәркинлији һәр јердә ејни олур. Гыздырылмыш катоддан чыхан електронларын јаратдығы мәнфи һәчми јүк катод–анод аралығынын һәр нөгтәсиндә потенсиалы ашағы салыр.

Електрон емиссијасынын кичик гијмәтләриндә һәчми електрик јүкү потенсиалын пајланмасына аз тә'сир көстәрир. Она көрә дә катоддан чыхан бүтүн електронлар електрик саһәсинин тә'сири алтында анода чатырлар. Бу һалда анод чәрәјаны катодун емиссија чәрәјанына бәрабәр (J_a=J_e) олур. Белә режимә дојма режими дејилир (шәкил 11.1*б*).

Көзәрмә артырыланда катоддан чыхан електронларын сајы артыр, мәнфи һәчми јүк чохалыр вә катод әтрафында јаранан саһә тормозлајычы тә'сирә малик олур. Белә тормозлајычы саһәнин тә'сирини јалныз кифајәт гәдәр илк енержиси олан елек-

тронлар дәф едә билирләр. Аз енержијә (сүрәтә) малик електронлар керијә катода гајыдырлар, нәтичәдә $J_a < J_e$ олур. Бу режимә фәза һәчми јүк режими дејилир. Әкәр анод катода нисбәтән мәнфи потенсиала малик оларса, анодун електрик саһәси електронларын һәрәкәтинә тормозлајычы тә'сир көстәрир вә буна көрә дә онлар катоддан чыхандан сонра јенә керијә гајыдырлар вә чиһаздан чәрәјан ахмыр (J_a=0). Демәли, диод чәрәјаны јалныз бир истигамәтдә (анодун потенсиалы катода нисбәтән мүсбәт оланда) кечирмәк хүсусијјәтинә маликдир. Әкәр диод дәјишән чәрәјан дөврәсинә гошуларса, онун дөврәсиндән јалныз мүсбәт јарымпериод әрзиндә чәрәјан ахачагдыр. Диодун бир истигамәтдә чәрәјан кечирмә хүсусијјәтинә көрә ондан дәјишән чәрәјаны дүзләндирмәк вә јүксәк тезликли рәгсләри чевирмәк үчүн истифадә едирләр.

Диоддан ахан чәрәјанын гијмәти бир санијә әрзиндә катодун емиссија етдији вә анодун мүсбәт електрик саһәсинин чәкиб апардығы електронларын сајы илә мүәјјән едилир. Катодун бир санијә әрзиндә емиссија етдији електронларын сајы емиссија чәрәјаныны J_e мүәјјән едир. Онун гијмәти катод материалынын физики хүсусијјәтләриндән (чыхыш ишиндән), онун гыздырылма температурундан вә катодун ишчи сәтһиндән асылыдыр.

Дүзләндиричи схемләрдә истифадә едилән електровакуум диодларына кенотрон дејилир, онлар бир вә ја ики анодлу олурлар.

Диодун әсас характеристикасы анод характеристикасыдыр, о көзәрмә кәркинлијинин сабит гијмәтләриндә анод чәрәјанынын анод кәркинлијиндән асылылығыны мүәјјән едир (J_a=f (U_a); $U_к$= const, шәкил 11.1*б*).

Нәзәри олараг бу асылылыг (дојма режиминә аид саһәдән башга) фәза јүкүнү нәзәрә алмагла вә диоддан чәрәјан кечмәсини идеаллашдырмагла "икидә үч» гануну илә ифадә едилир:

$$J_a = GU_a^{3/2},$$

бурада $G=2{,}33\cdot10^{-6}S_a/r_a^2$ - һәр бир лампа үчүн сабит олан кәмијјәт; S_a - анодун електронлар дүшән саһәси; r_a - анодла катод арасындакы мәсафәдир.

Диод һәм дә көзәрмә кәркинлијинә көрә емиссија ха-

рактеристикасы ($J_a=f(U_к)$; U_a=const) вә көзәрмә характеристикасы ($J_к=f(U_к)$; U_a= 0) илә дә характеризә олунур.

Икиелектродлу лампаларын әксәријјәти ашағыдакы әсас параметрләрлә характеризә олунурлар:

$S=dJ_a/dU_a$; $U_к$=const - анод характеристикасынын диклији - анод кәркинлијинин 1В артмасындан анод чәрәјанынын нә гәдәр артмасыны көстәрир (адәтән 1-10мА/В);

$R_i=1/S=dU_a/dJ_a$; $U_к$=const -диференсиал мүгавимәт диодун дәјишән чәрәјана көстәрдији мүгавимәти көстәрир ($10\text{-}10^5$Ом);

$R_o=U_a/J_a$ - статик мүгавимәт (лампанын сабит чәрәјана көстәрдији мүгавимәт) - анод характеристикасынын верилән нөгтәсинә ујғун кәркинлијин чәрәјана нисбәтидир; идеаллашдырылмыш диод үчүн $R_o=U_a/(GU_a^{3/2})=3R_i/2$, реал диод үчүн R_o R_i -дән һәм чох, һәм дә аз ола биләр;

$C_{ак}$ - електродлararасы тутум чиһазын електродларынын вакуумла ајрылмыш еквивалент конденсатор кими тәсвири илә мүәјјән едилир: онун гијмәти катод гыздырыланда (електродлар арасында јүк оланда) даһа чох олур;

$U_{әксmax}$ - ән бөјүк әкс кәркинлик - диода тәтбиг едилән дәјишән кәркинлијин амплитудунун һүдуд гијмәтини мүәјјән едир. $U_{әкс}> U_{әкс\ max}$ оланда електродлар арасында дешилмә баш верир;

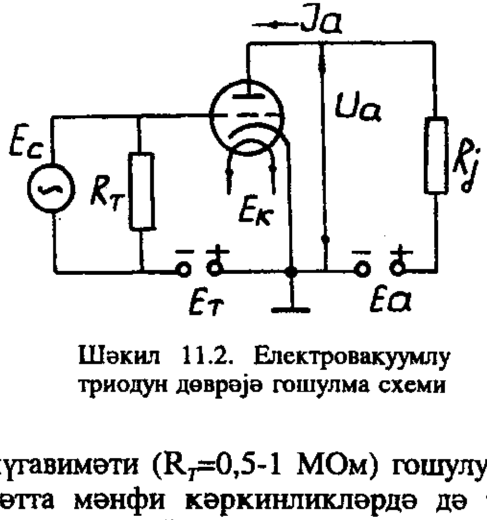
P_{amax} - анодун сәпәләдији максимал күчдүр. Анод електронларла бомбардман едиләркән о јүксәк температура гәдәр гыза биләр. Бу просесдә анодун алдығы үмуми күч $P_a=U_aJ_a$ олур. Әкәр $P_a= P_{a\ max}$ оларса, $J_a= P_{a\ max}/U_a$ алыныр. Чиһазын ичазә верилән иш режимләри $J_a=(P_{amax}=const)/U_a$ һиперболасындан ашағыда јерләшән саһә илә мәһдудлашыр.

Вакуумлу диодлар температурун кениш диапазонунда ишләјә билирләр. Онларын мәнфи хүсусијјәтләри R_i-нин бөјүклүјү, көзәрдилән катодун олмасы, е'тибарлылығын кичиклији вә јарымкечиричи диодлара нисбәтән иш мүддәтинин аз олмасыдыр.

Електровакуумлу триод. Бу лампалар аноддан вә катоддан әлавә үчүнчү идарәедичи електрода - тора малик олурлар (шәкил 11.2). Тор катоду әһатә едән метал спирал вә ја гәфәс шәклиндә олур вә онун мөвчудлуғу електрон селини идарә етмәјә имкан верир. Бурада E_a мәнбәји васитәсилә катода нисбәтән анода бөјүк мүсбәт потенсиал верилир. Анодун мүсбәт

електрик саһәси тордан кечмәклә тор-катод аралығына тә'сир көстәрир. Тора E_T мәнбәсиндән катода нисбәтән һәм кичик мүсбәт, һәм дә мәнфи потенсиал верилә биләр. $U_T < 0$ оланда торун саһәси електронлары тормозлајыр вә тордан кечиб анода чатан електронларын сајы (вә ја J_a чәрәјаны) азалыр. Тор кәркинлијинин катод-тор аралығындакы фәза јүкүнә тә'сири анод кәркинлијинин тә'сириндән бөјүк олур (тор катода даһа јахын јерләшдијиндән), она көрә тора кичик кәркинлик вермәклә анод чәрәјаныны еффектив идарә етмәк мүмкүн олур.

Тор-катод аралығында тә'сир көстәрән електрик саһәси мүсбәт анод вә мәнфи тор саһәләринин чәбри чәминә бәрабәрдир. Торун бүтүн күчләндирмә режимләриндә катода нисбәтән мәнфи потенсиала малик олмасыны тә'мин етмәк үчүн онун дөврәсинә мәнфи сүрүшмә кәркинлији мәнбәји E_T гошулур.



Шәкил 11.2. Електровакуумлу триодун дөврәјә гошулма схеми

Триодун катод чәрәјаны анод вә тор чәрәјанларынын чәминә бәрабәр олур ($J_к=J_a+J_T$) вә бу чәрәјанын гијмәти U_a вә U_T кәркинликләринин јаратдығы үмуми саһәнин електрон селинә тә'сири илә мүәјјән едилир. Реал схемләрдә мәнфи потенсиалын тора верилмәсини тә'мин етмәк үчүн торла катод арасында бөјүк тор мүгавимәти (R_T=0,5-1 МОм) гошулур вә онун васитәсилә торун һәтта мәнфи кәркинликләрдә дә тутдуғу електронлар катода гајтарылыр. Бунунла да торда күчләндириләчәк сигнал мәнбәјиндән (E_c) асылы олмајан потенсиалларын јаранмасынын гаршысы алыныр.

U_T>0 оларса, торун дөврәсиндән чәрәјан ахыр вә анод чәрәјаны азалыр. Бөјүк анод чәрәјаны әлдә етмәк үчүн анод кәркинлијини јүз волтлара гәдәр артырмаг лазымдыр.

Триодда чәрәјанын идарә олунмасы һәтта јүксәк тезликләрдә дә әталәтсиз баш верир. Бунун сәбәби одур ки, електронлар катод-анод аралығыны чох кичик вахтда кечирләр вә анод

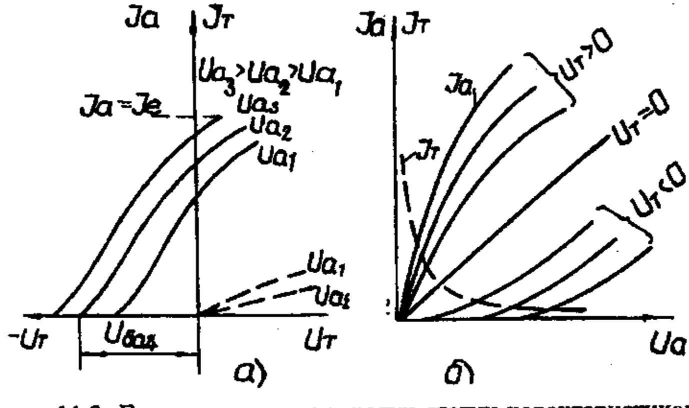
чәрәјаны демәк олар ки, тор кәркинлијинин дәјишдији тәрздә дәјишир. Тор дөврәсиндә анод чәрәјанын идарә олунмасына сәрф олунан күч анод дөврәсиндәки күчүн дәјишән топлананындан аз олдуғу үчүн (P_a >P_T) триод кириш (тор) дөврәсинә верилән електрик сигналыны күчләндирмәјә имкан верир.

Чиһазда тә'сир көстәрән үмуми електрик саһәсинин вә анод чәрәјанынын гијмәти тор вә анод кәркинлијинин гијмәтиндән асылыдыр. Бу асылылыг триод үчүн "икидә үч" гануну илә ифадә олунур:

$$J_a \approx G(U_T + DU_a)^{3/2} ,$$

бурада $G=2{,}33 \cdot 10^{-6} S_a / r_{km}^2$ - мүстәви конструксија үчүн әмсал; r_{aT} - катоддан тора гәдәр олан мәсафәдир.

Триодун әсас характеристикалары анод ($J_a=f(U_a)$; U_T= const), анод-тор ($J_a=f(U_T)$; U_a= const), тор ($J_T=f(U_T)$;



Шәкил 11.3. Електровакуумлу триодун статик характеристикалары

U_a= const) вә анод-тор ($J_T=f(U_a)$; U_T=const) характеристикаларыдыр (шәкил.11.3).

Анод-тор характеристикаларында J_a=0 һалына ујғун тор кәркинлијинә анод чәрәјанынын кәсилмә вә лампанын бағланма кәркинлији ($U_{баг}$) дејилир. Онун гијмәти U_a-нын гијмәтиндән вә лампанын конструксијасындан асылыдыр. Гырыг хәтләрлә тор характеристикалары аиләси көстәрилмишдир. Көрүндүјү кими тор чәрәјаны јалныз мүсбәт тор кәркинликләриндә јара-

ныр вә анод кәркинлијинин гијмәти артдыгча тор чәрәјаны азалыр.

Анод характеристикалары U_a=0 гијмәтиндә координат башланғычындан башлајыр, лакин U_T< 0 һалында U_a артдыгча саға сүрүшүрләр. Бунун сәбәби одур ки, мәнфи потенсиаллы анод-тор кәркинлији мүәјјән гәдәр артмајана гәдәр електронлары анода бурахмыр. Јалныз анод кәркинлији тор кәркинлијинин тормозлајычы тә'сирини компенсасија етдикдән сонра анод чәрәјаны артмаға башлајыр. Тор кәркинлијинин мәнфи гијмәти нә гәдәр чох оларса, анод характеристикасы бир о гәдәр саға сүрүшмүш олур.

Триодун әсас параметрләри ашағыдакылардыр:

$S=dJ_a/dU_m$; U_a=const - анод-тор характеристикасынын диклији - торун идарәетмә хүсусијјәтини ифадә едир, анодун сәтһи илә дүз, електродларарасы мәсафәјә әкс мүтәнасиб олур (S=1-50 mA/B);

$R_i=dU_a/dJ_a$; U_m=const - диференсиал мүгавимәт (1-100 кОм) - електродларын өлчүләриндән, лампанын иш режиминдән асылы олур вә анод кәркинлијинин анод чәрәјанына тә'сирини характеризә едир;

$\mu=-dU_a/dU_T$; J_a=const - триодун статик күчләндирмә әмсалы - тор кәркинлијинин анод кәркинлијинә нисбәтән анод чәрәјанынын гијмәтинә нә гәдәр чох тә'сир етдијини характеризә едир. Мәнфи ишарәси ону көстәрир ки, анод чәрәјаныны сабит сахламаг үчүн U_a вә U_T мүтләг әкс ишарәли артымлар алмалыдырлар (μ=4-100);

$D=-dU_T/dU_a$; J_k=const - лампанын нүфузлуғу - анод кәркинлијинин катод әтрафындакы һәчми јүкә електростатик тә'сиринин зәифләмә дәрәчәсини көстәрир. Мәнфи ишарәси онунла әлагәдардыр ки, J_k-ны сабит сахламаг үчүн U_a вә U_T-нин дәјишмәләри бир-биринә әкс ишарәли олмалыдыр.

Ахырынчы ики ифадәни мүгајисә етсәк көрәрик ки, J_T=0, U_T<0 һалында J_T=0 вә $J_k=J_a$ олса $\mu=1/D$ олар. Триодун диференсиал параметрләри бир-бирилә лампанын дахили тәнлији адланан ашағыдакы ифадә илә бағлыдырлар:

$$\mu=SR_i \text{ вә ја } SR_iD=1.$$

Триод катод, тор вә анод дөврәләринин кәркинлик, чәрәјан, мүгавимәт вә күчләриндән башга електродлар арасындакы

тутумларла да характеризә едилир. Бунлар триодун тезлик вә күј хүсусијјәтләрини мүәјјән едән үч тутумдур:

C_{Tk} - тор-катод арасындакы тутум (кириш тутуму);

C_{ak} - анод-катод арасындакы тутум (чыхыш тутуму);

C_{aT} - анод-тор арасындакы тутум (кечид тутуму).

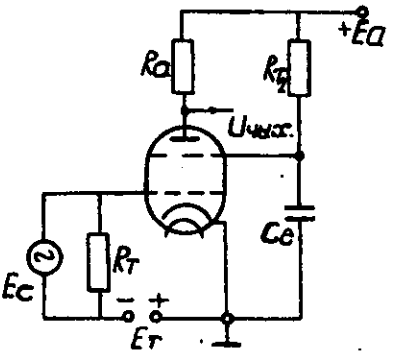
Бу тутумлар електродларарасы фәзада електронларын олмасы, конструксијанын елементләринин температурун тә'сириндән кенишләнмәси вә изоләедичиләрин диелектрик нүфузлуғунун дәјишмәси нәтичәсиндә дәјишә биләрләр. Өзү дә ән чох дәјишән (30-50%-кими) C_{Tk} тутумудур.

Триоддан дәјишән чәрәјан дөврәләриндә истифадә едәркән тутумлар ујғун електродлар аралыгларыны шунтлајырлар. Кичик тезликләрдә тутум мүгавимәти бөјүк олдуғундан белә шунтлајычы тә'сир аз олур. Тезлијин бөјүк гијмәтләриндә тутумларын шунтлајычы тә'сири артыр вә чиһазын ишинә мәнфи тә'сир көстәрир. Чыхыш тутуму јүк мүгавимәтини шунтлајараг күчләндирмә әмсалыны азалдыр. C_{Tk} вә C_{aT} тутумлары "динамик чыхыш тутуму" јарадыр ки, бу да әввәлки каскадын јүкүнү шунтлајыр. Бундан әлавә C_{aT} тутуму васитәсилә күчләндиричи схеминдә өзү-өзүнә һәјәчанландыран паразит әлагә (чыхышла кириш арасында) јараныр. Електродларарасы тутумлар триодун ишчи тезлик диапазонуну даралдыр. Триодун дәјишән чәрәјана көстәрдији мүгавимәт кичик олур вә бу да күчләндирмә әмсалыны (μ вә K_u) азалдыр.

Триод да транзистор кими дөврәјә үч схем: үмуми катодлу, үмуми торлу вә үмуми анодлу схемләрә гошула биләр.

Електровакуум триодлары күчләндиричи вә кенератор схемләриндә истифадә олунур.

Дөрделектродлу лампа - тетрод. Бу чиһазда анодла тор арасындакы тутумун тә'сири електростатик екранлама үсулу илә азалдылыр вә ләғв едилир. Бунун үчүн анодла идарәедичи тор арасында дөрдүнчү - екранлајычы тор јерләшдирилир (шәкил 11.4). Екранлајычы тор електростатик екран ролуну ојнајыр вә она көрә тутумун гијмәти кәскин азалыр. Ејни заманда анод саһәсинин катод јахынлығындакы потенсиал сәддинә тә'сири азалыр вә бунун нәтичәсиндә лампанын күчләндирмә әмсалы (μ) чохалыр. Тетродун киришинә дәјишән сигнал вериләндә екран торунун чәрәјанынын анод чәрәјаны кими дәјишмәси үчүн (чүнки U_{T2}- дәјишир) екранлајычы тору бөјүк тутумлу C_e

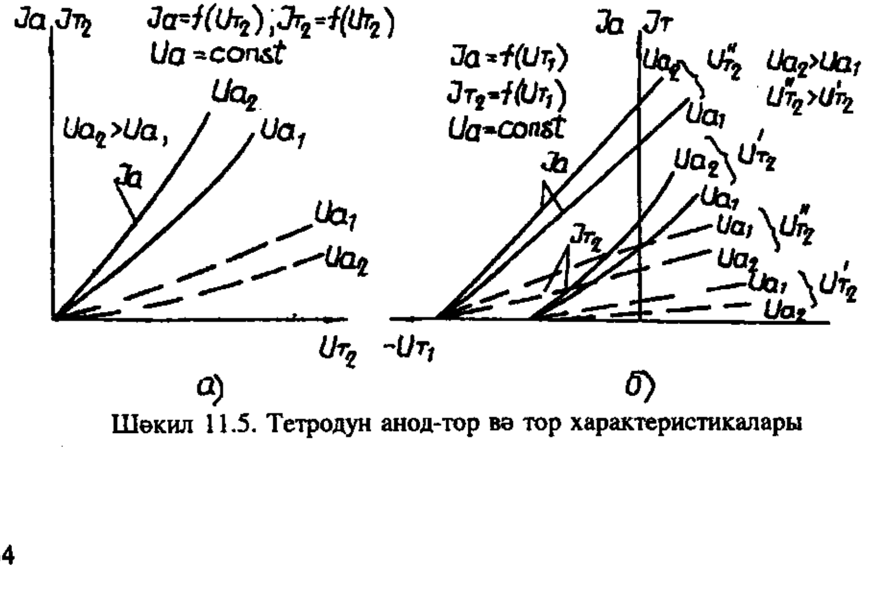


Шәкил 11.4. Тетродун дөврәјә гошулма схеми

конденсатору илә катода бирләшдирирләр. Кифајәт гәдәр сүр'әтләндиричи саһә јаратмаг үчүн екранлајычы тора R_{T2} мүгавимәти васитәсилә анод кәркинлијинә 30-90%-ә гәдәр кәркинлик верилир. Екранлајычы тор тетродун статик характеристикаларынын формасыны вә параметрләрини дәјишдирир.

Тетродун әсас характеристикаларынын шәкил 11.5-дә көстәрилмишдир. Көрүндү јү кими анодун вә екранлајычы торун чәрәјанлары һәр ики торун вә анодун кәркинлијиндән асылыдыр. Јалныз $U_{T2}>0$ вә $U_a>0$ оланда анод вә екранлајычы тор дөврәсиндә чәрәјан јараныр. Анод кәркинлијинин J_a вә J_{T2} -јә тә'сири нисбәтән зәифдир.

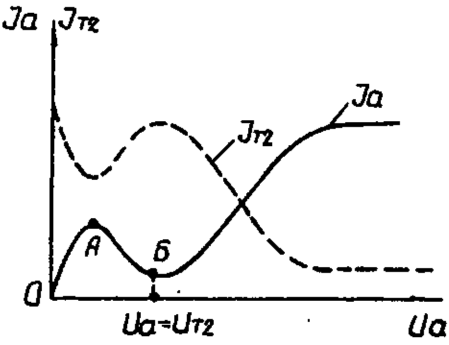
Катод чәрәјаны анод вә екранлајычы тор чәрәјанынын чәминә бәрабәрдир: $J_к=J_a+J_{T2}$. Чәрәјанын бу ики електрод арасында пајланмасы U_a-дан, U_{T2}-дән вә икинчи електрон емиссијасындан асылыдыр ($K=J_a/J_{T2}=f(U_a/U_{T2})$. U_a=const вә U_{T2}=const һалында U_{T1}-ин артмасы (шәкил 11.5б) тә'сир едән кәркинли



Шәкил 11.5. Тетродун анод-тор вә тор характеристикалары

јин вә $J_к=J_а+J_{Т2}$ ($U_{Т1}$=0 оланда $J_{т1}$ = 0) катод чәрәјанынын артмасына кәтириб чыхарыр. Бу һалда $J_а$ јалныз $J_к$-нын һесабына артыр.

Анод характеристикасындан көрүнүр ки, (шәкил 11.6), $U_а$=0 оланда $J_{т2}$>0 олур, чүнки $U_{т2}$>0. $U_а$-нын сыфырдан башлајараг артмасы әввәлчә анод чәрәјаныны артырыр, екранлајычы торун чәрәјаны исә она мүтәнасиб азалыр (0-А һиссәси). А нөгтәсиндән башлајараг $U_а$-нын $U_а=U_{т2}$ гијмәтинә гәдәр артмасы заманы $J_а$ азалмаға, $J_{т2}$ исә она мүтәнасиб артмаға башлајыр. $U_а$ > $U_{т2}$ гијмәтиндән башлајараг (Б нөгтәси) $J_а$ јенидән артараг дојма һалына кәлиб чатыр, $J_{т2}$ исә она мүтәнасиб кәскин азалыр.



Шәкил 11.6. Тетродун анод характеристикасы

Көрүндүјү кими анод характеристикасы мәнфи мүгавимәт (АБ) саһәсинә маликдир. Бу тетрода хас олан әсас мәнфи чәһәтдир вә бунун сәбәби лампада баш верән динатрон еффектидир.

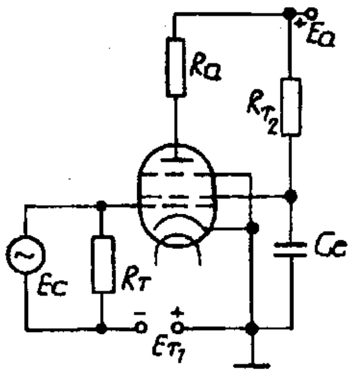
Динатрон еффектинин маһијјәти ондадыр ки, $U_а$-нын мүәјјән гијмәтләриндә електронларын енержиси о гәдәр артыр ки, онлар анодун сәтһинә дәјәркән орадан икинчи електрон емиссијасы јарадырлар. $U_а$ < $U_{Т2}$ оланда (Б нөгтәсиндән солда) икинчи електронлар екранлајычы тора кедирләр, $J_а$ азалыр, $J_{Т2}$ исә артыр. $U_а$ < $U_{Т2}$ оланда (Б нөгтәсиндән сағда) икинчи електронлар анода гајыдырлар вә $J_а$ јенидән артмаға башлајыр. Характеристиканын мәнфи дахили мүгавимәтли һиссәси јалныз кенератор режиминдә ишләнир.

Тетродун диференсиал параметрләринин физики мә'насы триодда олдуғу кимидир.

Тетродун дәјишән чәрәјана кәстәрдији мүгавимәти (R_i) триодункундан чох олур.

Тетрод һәм дә кејфијјәтлилик кәстәричиси илә характеризә едилир: G=μS.

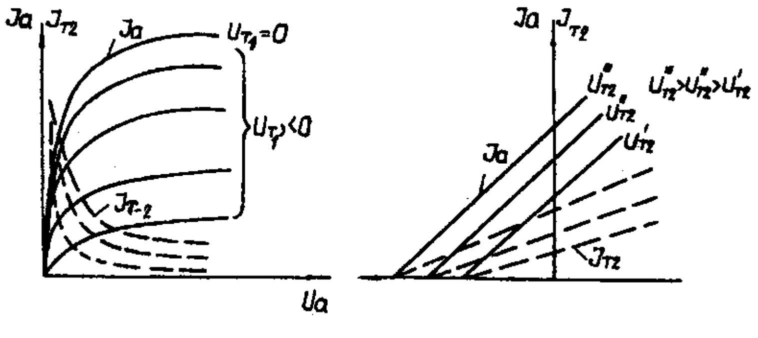
Бешелектродлу лампа - пентод. Динатрон еффектини



Шәкил 11.7. Пентодун дөврәјә гошулма схеми

ләғв етмәк үчүн анодла екранлајычы тор арасында антидинатрон (мүһафизә) тору јерләшдирилир вә она катода нисбәтән азачыг мәнфи потенсиал верилир (шәкил 11.7). Беләлампа пентод адланыр. Буна көрә аноддан чыхан икинчи електронлар бу торун саһәсини дәф едә билмирләр вә јенидән анода гајыдырлар. Мүһафизә тору C_{aT1} кечид тутумуну даһа да азалтмаға имкан верир. Јүксәк тезликли пентодларда R_i (200 кОм - 1МОм) вә μ (1000-3500) артыр. Анод чәрәјаны әсасән U_{T2}–нин һесабына артыр вә U_a-дан аз асылы олур (шәкил 11.8).

Мүхтәлиф характеристикалара малик олан мүхтәлиф чохелектродлу лампаларын мөвчуд олмасы һәр дәфә конкрет тәләбләри (тезлик диапазону, күчләндирмә әмсалы вә с.) там өдәјән чиһазлары сечиб истифадә етмәјә имкан верир.



Шәкил 11.8.Пентодун статик характеристикалары

Гејд етмәк лазымдыр ки, јарымкечиричи вә интеграл елементләрин јаранмасы електровакуум чиһазларынын тәтбиг саһәсини кәскин азалтмышдыр.

11.2. Електрон-шүа чиһазлары

Катоддан чыхан електрон селини електрик вә магнит саһәсинин васитәсилә назик електрон шүасына чевирән чиһазлара електрон-шүа чиһазлары дејилир. Шүанын формасы вә онун истифадә едилмәси чиһазын тә'јинатындан асылыдыр. Бу чиһазлар әсасән осиллографијада, телевизијада, електрон микроскопларында вә рентген техникасында ишләдилир. Онларын хүсуси нөвләри електрон һесаблајычы машынларын јаддаш гурғуларында чох каналлы гошучулар кими вә јүклү һиссәчикләри сүр'әтләндирән гурғуларда истифадә олунур. Белә чиһазлара електрон-шүа борулары дејилир.

Електрон-шүа борулары үч әсас һиссәдән ибарәт олур: 1) електрон топу (прожектору) назик електрон шүасы јарадыр вә шүа борунун оху истигамәтиндә јөнәлдир: 2) борунун ичәрисиндә шүанын истигамәтини дәјишдирән систем: 3) лүминесент екран (онун һәр һансы бир нөгтәсинә електрон дүшәндә о нөгтә ишыгланыр).

Шүанын фокуслашдырылмасы вә истигамәтинин дәјишдирилмәси үсулуна көрә електрон-шүа борулары ики әсас һиссәјә бөлүнүрләр:

1) Шүаны електростатик үсулла фокуслашдыран вә истигамәтини јөнәлдән борулар;

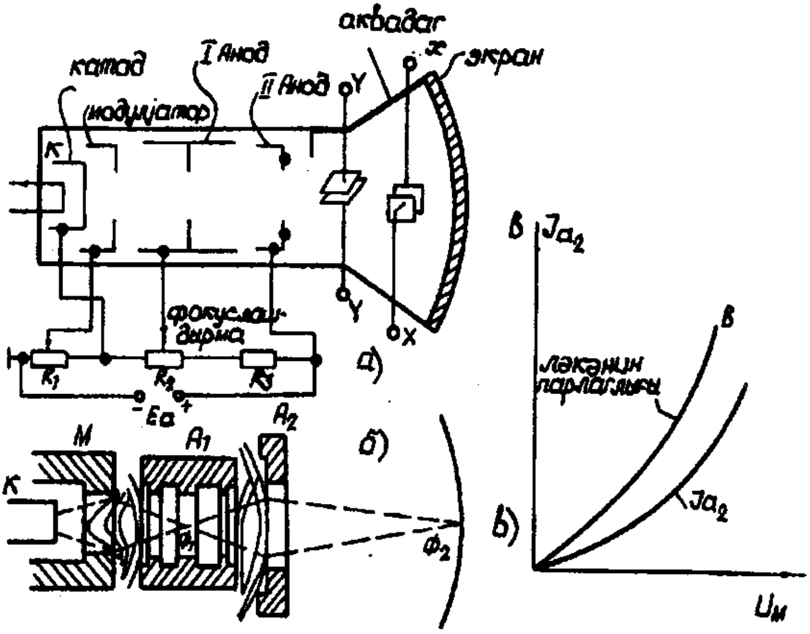
2) Шүаны електростатик саһә илә фокуслашдыран вә магнит саһәси илә јөнәлдән борулар.

Електростатик идарә системилә ишләјән боруларда катод үзәринә оксид гаты чәкилмиш силиндр формасында олур вә ону силиндр шәклиндә олан идарәедичи електрод - модулјатор әһатә едир (шәкил 11.9*а*). Модулјаторун јан сәтһиндә олан кичик дешикдән (диафрагмадан) електрон шүасы кечир.

E_a мәнбәјиндән R_1 васитәсилә модулјатора сыфырдан - 50÷100 В кәркинлик вермәклә шүанын чәрәјаны (електронларын сајы) вә екранда ләкәнин парлаглығы тәнзим едилир.

Модулјатордан сонра електрон шүасынын јолунда диафрагмалары олан силиндр шәкилли I вә II анодлар јерләшдирилир. Анодлара ујғун олараг 300-1000 В вә 1000-5000 В кәркинлик верилир. Шүанын фокуслашдырылмасы модулјаторла I анод арасындакы вә I анодла II анод арасындакы електрик саһәләринин көмәјилә һәјата кечирилир. Бу електростатик саһә-

ләр ики електрон линзасы әмәлә кәтирир (шәкил 11.9*б*). Биринчи линза шүаны биринчи фокуса ($Ф_1$) јығыр вә бурада катодун јанынын тәсвири алыныр. Икинчи линза биринчи фокусдан сонра електронларын аралашан трајекторијаларыны јенидән сындырыр вә онлары екрана даһа јахын олан икинчи фокусда ($Ф_2$) јығыр.



Шәкил 11.9. Шүаны електростатик үсулла идарә едән вә фокуслашдыран електрон-шүа борусунун гурулушу (*а*), онун фокуслашдырычы електрик саһәси (*б*) вә екранда ишыгланан ләкәнин парлаглығынын (В) вә II анодун чәрәјанынын модулјаторун кәркинлијиндән асылылығы (*в*)

R_2 васитәсилә I анода верилән кәркинлик дәјишиләркән електрон шүасына тә'сир едән електрик саһәсинин еквипотенсиал хәтләринин конфигурасијасы дәјишир вә бу исә оптик линзанын ишыг шүасына тә'сириндә олдуғу кими електрон селинә фокуслашдырычы тә'сир көстәрир. II анода верилән јүксәк кәркинлик һәм дә електрон селинин екрана тәрәф һәрәкәтини сүр'әтләндирир. Катод, модулјатор вә анодлар бирликдә емиси-

ја-фокуслама системинин електрон прожекторуну тәшкил едирләр.

Екранын ишыгланмасы онун үзәринә ичәридән чәкилән лүминофорун (синк-сулфид, синк кадмиум, синк-силикат бирләшмәләри) кимјәви хассәләриндән асылыдыр. Ишыг сачма сүр'әтләнмиш електронларын зәрбәсиндән һәјәчанланмыш лүминофор атомларынын нормал вәзијјәтә гајтарылмасы илә әлагәдардыр.

Јухарыда изаһ едилән гајда илә фокуслашдырылан електрон сели екранын ортасында кичик парлаг һәрәкәтсиз ләкә әмәлә кәтирир.

Бу ләкәнин екранда һәрәкәт етмәси үчүн електрон шүасынын боруда һәрәкәти електрик саһәси илә идарә олунур. Бунун үчүн шүа бир-биринә перпендикулјар јерләшән ики чүт XX вә УУ лөвһәләри арасындан кечир. Лөвһә чүтүнә кәркинлик верәндә шүа мүсбәт јүкләнмиш лөвһәјә тәрәф јөнәләчәк вә екранда ишыгланан ләкә өз јерини дәјишәчәкдир. Һәр ики чүт лөвһәләрә ејни заманда кәркинлик вериләндә ләкә екранда мүәјјән бир трајекторија илә һәрәкәт едир (нәтичәви әјри чәкир). Екранда ләкәнин һәрәкәтиндән алынан әјринин көркәми лөвһәләрә верилән кәркинлијини амплитуду, фазасы вә тезлији илә мүәјјән едилир.

Сүр'әтләнмиш електронлар екранын сәтһини бомбардман едәркән екрандан икинчи електронлар чыхыр вә онлар екраны јүксәк мәнфи кәркинликлә јүкләјә биләрләр. Онларын екранда вә борунун диварларында јығылыб галмамасы үчүн борунун силиндрик вә конусвары һиссәләринә ичәридән назик графит лајаквадаг чәкилир вә онунла икинчи електронлар II анода ахыдылыр.

Електрон шүасындакы чәрәјанын (II анодун чәрәјанынын) вә ишыгланан ләкәнин парлаглығынын модулјаторун кәркинлијиндән асылылығы шәкил 11.9*в*-дә көстәрилмишдир. Бу асылылыг електровакуумлу триодун анод-тор характеристикасына јахындыр.

Борунун вачиб параметрләриндән бири онун һәссаслығыдыр. Һәссаслыг ләкәнин екранда хәтти јердәјишмәсинин бу дәјишмәни әмәлә кәтирән кәркинлијә нисбәтинә дејилир (1В кәркинликдән ләкәнин јерини нечә см дәјишдијини көстәрир).

һәссаслыг борунун елементләринин һәндәси өлчүләриндән вә сүр'әтләндиричи кәркинликдән асылыдыр:

$$S=l_1l_2/2dUa_2 ,$$

бурада l_1 - ләвһәләрин узунлуғу; l_2 - ләвһәләрин ортасындан екрана гәдәр мәсафә; d - ләвһәләр арасындакы мәсафә; Ua_2 - II анодун кәркинлијидир (S=0,1-1мм/В һәддиндә олур).

Һәссаслығы бөјүтмәк үчүн јөнәлдичи ләвһәләрин өлчүләрини бөјүдүр вә онлара сыныг форма верилир.

Дикәр вачиб параметр ләкәнин ишыгланмасынын парлаглығыдыр:

$$B=An(U-U_o)^2 ,$$

бурада А - сабит кәмијјәт; n - 1 санијә әрзиндә екранын сәтһинә дүшән електронларын сајы; U - катодла екран арасындакы потенсиал фәрги; U_o - лүминофорун ишыгланмасы үчүн кифајәт едән минимал кәркинликдир.

Үчүнчү параметр ишыгланмадан сонракы вахтын давамијјәтидир. О, сабит интенсивликлә бомбардманлама нәтичәсиндә јаранан ишыгланманын илкин парлаглыгдан 1%-ә кими азалдығына гәдәр кечән мүддәтлә характеризә олунур. Бу көстәричијә көрә борулар ишыгланмадан сонракы мүддәти гыса (0,01 санијәјә гәдәр), орта (0,01-0,1 сан.) вә узун (0,1-20 сан.) олан боруллара бөлүнүрләр.

Лүминофорун ишыгланмасы әталәтли просесдир: ишыгланма лүминофор атомларынын електронлары һәјәчанланмасындан 10^{-8} санијә сонра башлајыр.

Дөрдүнчү параметр екранын ишыгланмасынын рәнкидир. Билаваситә мүшаһидә етмәк үчүн истифадә едилән боруларда јашыл рәнк верән лүминофорлар (синк-сулфид) истифадә олунур, чүнки инсанын көзү јашыл рәнкә максимал һәссаслыг көстәрир. Фотографик гејд үчүн истифадә олунан боруларда исә мави ишыг сачан лүминофорлар ишләдилир.

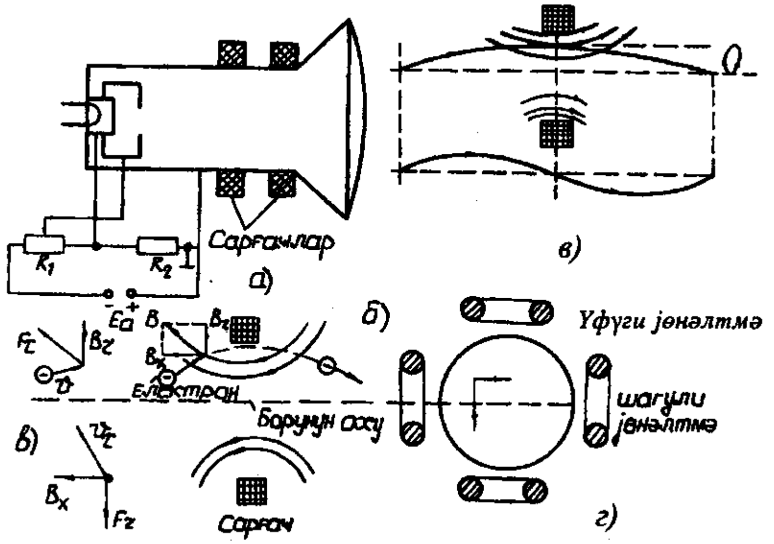
Екранын 1см^2 сәтһинә дүшән ајры-ајры ајырд едилән нөгтәләрин вә ја хәтләрин (сәтирләрин) сајына борунун ајырдетмә габилијјәти дејилир. Бу параметри бөјүтмәк үчүн шүанын диаметрини кичилтмәк лазымдыр. Шүа чәрәјаны нә гәдәр аз вә сүр'әтләндиричи кәркинлик нә гәдәр чох оларса, ајырдетмә габилијјәти бир о гәдәр чох олар. О, һәм дә лүминофорун кејфијјәтиндән асылыдыр.

Електростатик идарə системли електрон-шүа боруларынын мəнфи чəһəти онларын һəссаслығынын кичик олмасыдыр.

Бу боруларын јүксəк иш сүр'əти онлары сəнаје електроникасында, радиолокасијада, өлчү техникасында вə с. ити сүр'əтлə кедəн просеслəрин тəдгигиндə истифадə етмəјə имкан верир. Онларын көмəјилə 20hc-дəн 50 Mhc-ə кими тезликлəрдə баш верəн дөври просеслəри мүшаһидə етмəк олар.

Бөјүк өлчүлү екранлара малик олан електрон-шүа боруларынын һазырланмасы зəрурəти шүаны магнит системи илə идарə едəн боруларын јарадылмасына кəтириб чыхартды.

Магнитофокуслајычы боруларда 1-чи електрон линзасы електростатик саһəли боруларда олдуғу кимидир. Икинчи линзаны исə гыса (диаметри узунлуғуна јахын олан) фокуслашдырычы индуктив сарғач јарадыр (шəкил 11.10).



Шəкил 11.10. Шүаны магнит системи илə идарə едəн електрон-шүа борусунун гурулушу (*а*), електронун сүр'əт векторунун магнит индуксијасы илə гаршылыглы тə'сиринин електронун һəрəкəтинə тə'сири (*б*), електронун үч гаршылыглы перпендикулјар мүстəвидə һəрəкəт трајекторијасы (*в*)

Бу сарғач сабит чәрәјанла ишләјир вә онун сарғач бојунча гејри-һәмчинс аксиал-симметрик магнит саһәси топлајычы линза ролуну ојнајыр. Белә саһәни ферромагнит өртүклү даирәви сарғачлар јарадыр.

Әкәр електронун сүр'әти *v* бирчинс саһәнин магнит гүввә хәтләринә перпендикулјар оларса, мүәјјән сүр'әтлә бу саһәјә дүшән електрон гүввә хәтләринә перпендикулјар олан мүстәвидә даирәви һәрәкәт едәчәкдир. Үмуми һалда електрон индуктив сарғачын охуна нисбәтән мүәјјән бучаг алтында һәрәкәт едир. Бу заман електрон винтшәкилли спирал үзрә һәрәкәт едәчәкдир (шәкил *б,в*). Магнит саһә индуксијасынын радиал топлананы B_r вә електронун сүр'әт векторунун *v* гаршылыглы тә'сириндән бунлара перпендикулјар олан F_τ Лоренс гүввәси јараныр. Бу гүввәнин тә'сириндән електрон јан тә'чили алыр вә онун трајекторијасы борунун оху бојунча фырланыр. Електронун сүр'әт векторунун магнит индуксијасынын борунун оху бојунча јерләшән үфүги топлананы B_x илә тә'сириндән исә радиал истигамәтдә тә'сир едән вә електрону борунун охуна тәрәф истигамәтләндирән F_r Лоренс гүввәси јараныр. Електронун сүр'әтинин вә магнит индуксијасынын мүәјјән нисбәтләриндә електронларын трајекторијалары екран јахынлығында кәсишир вә шүа фокуса кәтирилир.

Електронун үч гаршылыглы перпендикулјар мүстәвидә һәрәкәт трајекторијасы шәкил 11.10*в*-дә көстәрилмишдир. Белә електрон-шүа боруларында јөнәлтмә системи охлары гаршылыглы перпендикулјар јерләшмиш ики чүт сарғачлардан ибарәт олур. Онлар борулардан кечән вә онун охуна перпендикулјар олан ики магнит саһәси јарадырлар. Шагули охлу сарғачларын магнит саһәси електрон шүасыны үфүги истигамәтдә, үфүги охлу сарғачларын магнит саһәси исә шүаны шагули истигамәтдә јөнәлдир (шәкил 11.10*г*). Бурада бору бојунча бәрабәр һәссаслыг әлдә етмәк үчүн сарғачлара хүсуси форма верилир, екран исә сферик һазырланыр. Тәбиидир ки, електрон шүасы сарғачлардан ахан чәрәјанын тә'сириндән һәрәкәт истигамәтини дәјишир. Борунун һәссаслығы екранда парлаг ләкәнин јердәјишмәсинин бу јердәјишмәни әмәлә кәтирән чәрәјана (ампер сарғыларла) нисбәти илә мүәјјән едилир.

Белә боруларын мәнфи чәһәти онларын бөјүк эталәтлијә малик олмасыдыр. Она көрә онлары 10-20 кһс-дән јүксәк тез-

ликлəрдə истифадə етмəк мүмкүн олмур. Бундан əлавə магнит јөнəлтмə системи чох ири олур вə бөјүк күч сəрф едир.

Магнит идарə системи шүасынын јөнəлмə бучағы бөјүк (100^0-јə гəдəр) олан, узунлуғу кичик боруларда (кинескоп) вə полјар координатларда тəсвир алмаг лазым кəлəндə (радионавигасија вə радиолокасија гурғулары) ишлəдилир.

Ади, биршүалы борулардан башга, чохшүалы борулар да мөвчуддур. Бунларын бир нечə јөнəлтмə системи вə бир екраны олур. Белə борулар ики вə даһа чох тəдгиг олунан просеслəрин тəсвирини екранда ејни заманда алмаға вə онларын арасындакы вахт сүрүшмəсини (фəргини) тəһлил етмəјə имкан верирлəр.

Електроника гурғуларында електрон-шүа борулары əсасəн автоматик системлəрин ишинə нəзарəт заманы мə'луматы тəсвир етмəк үчүн истифадə едилир. Бу мəгсəд үчүн хүсуси һəрф чап едəн борулар бурахылыр. Бунларда шүа үстүндə ишарəлəр (символлар, һəрф, рəгəм вə с.) шəклиндə дешиклəр ачылмыш лөвһəдəн - матрисадан кечирилир. Мүвафиг рəгəм вə ја һəрфи сечəн јөнəлтмə системи шүаны ујғун дешикдəн кечирир вə екранда һəмин һəрфин, рəгəмин вə ја башга символун тəсвири алыныр. Екранда символун ишыгландығы јер исə үнван системи адланан икинчи јөнəлтмə системинин көмəјилə мүəјјəн едилир.

11.3 Газбошалмалы (ион) чиһазлары

Бу чиһазларын иши газларда електрик бошалмасы һадисəсинə əсасланыр. Чəрəјанын јаранмасы һəм електронларын, һəм дə газ мүһитинин ионларынын һесабына баш верир.

Гурулуш чəһəтчə бу чиһазлар електровакуум чиһазларына јахындырлар, онлар тə'сирсиз газларла долдурулмуш һерметик балонун ичəрисиндə јерлəшдирилмиш електродлардан ибарəт олурлар. Бошалманын нөвүнə көрə бу чиһазлар ики јерə бөлүнүрлəр:

1) мүстəгил бошалмалы (сојуг катодлу) чиһазлар; 2) гејри-мүстəгил бошалмалы (көзəрдилəн катодлу) чиһазлар.

Мүстəгил бошалманы əлдə етмəк вə сахламаг үчүн кəнар емиссија мəнбəји тəлəб олунмур.

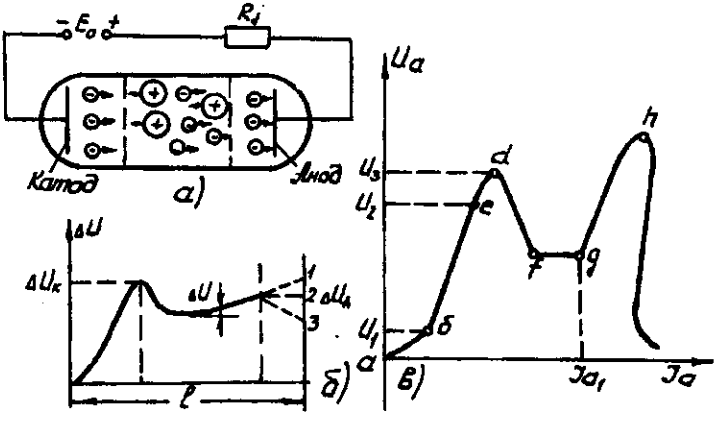
Гејри-мүстəгил бошалманын (бошалманын механизминə 2-чи фəсилдə бахылыр) əлдə едилмəси вə сахланылмасы үчүн лазыми кəркинликли електрик саһəсиндəн башга емиссија мəн-

бәји (термокатод, фотокатод, ионлашдырычы шүаланма вә с.) тәләб олунур.

Ион чиһазларында бошалманы әлдә етмәк үчүн чиһазын електродларына мүтләг мүәјјән кәркинлик дә вермәк лазымдыр. Бу кәркинлик көзәрмәни әмәлә кәтирән јандырма кәркинлији адланыр вә онун гијмәти газын нөвүндән, тәзјигиндән вә електродлар арасындакы мәсафәдән асылы олур. Бошалманы узун мүддәт сахламаг үчүн исә јанма кәркинлији тәләб олунур. Јанма кәркинлијинин гијмәти јандырма кәркинлијинин гијмәтиндән кичик олур.

Ион чиһазларында чәрәјанын ион топлананы чох кичикдир вә бу да ионларын електронлара нисбәтән кичик јүрүклүјә малик олмасыдыр. Буна бахмајараг, мүсбәт ионларын мөвчуд олмасы електродлар арасындакы потенсиалын пајланмасынын характерини вакуумлу чиһазлара нисбәтән кәскин дәјишир (шәкил 11.11*а,б*). Бурада електронларын јаратдығы мәнфи һәчми јүк мүсбәт ионларын јүкү илә компенсасија олунур вә бу да чиһаздан кечән чәрәјанын кәскин артмасына кәтириб чыхарыр.

Газбошалма аралығында бошалманын ашағыдакы бир нечә нөвү баш верә биләр:



Шәкил 11.11. Газбошалма аралығында (а) потенсиалын пајланмасы (б) вә бошалманын волт-ампер характеристикасы (в)

1) гаранлыг (сакит) бошалма - гејри мүстәгил бошалмадыр. Һәчми јүкүн сыхлығы аз, чәрәјан сыхлығы исә бир нечә

$mA/см^2$ һәддиндә олур. Тәтбиг едилән кәркинлијин саһәси һәчми јүкдән асылы олмур вә ишыгланма баш вермир. Бу бошалма електрон чиһазларында истифадә олунмур, о, бүтүн башга бошалма нөвләриндән әввәл мөвчуд олур;

2) көзәрән бошалма - мүстәгил бошалмадыр, бурада газ көзәрән көмүр кими ишыг сачыр. Чәрәјан сыхлығы $10А/см^2$-ә гәдәр олур. Һәчми јүк електродлар арасындакы кәркинлијин гијмәтинә тә'сир көстәрир, бошалма кәркинлији 10-100 В һәддиндә олур, бошалма ионларын зәрбәсиндән катоддан алынан емиссија һесабына сахланылыр. Белә бошалма стабилитронда, тиратронда, индикасија лампаларында вә декатронларда истифадә олунур;

3) гөвси бошалма гејри-мүстәгил вә мүстәгил ола биләр. Чәрәјан сыхлығы көзәрән бошалмадан чохдур (100 $А/см^2$-ә гәдәр). Бошалма көзәрән катодун термоелектрон емиссијасы вә ја чивәли катодун електростатик емиссијасы һесабына сахланылыр. Кәркинлик (10-20В) әсасән катод јахынлығында олур. Бошалма чәрәјанын бөјүк гијмәтиндә кичик кәркинлик дүшкүсү вә газын интенсив ишыгланмасы илә характеризә олунур, гејри-мүстәгил бошалмалы чиһазларда - чивә вентилләриндә вә кино прожекторларда истифадә олунур;

4) гығылчымлы бошалма - гөвсү бошалмаја бәнзәјир. Газын јүксәк тәзјигиндә (бир атмосферә гәдәр) гыса мүддәтли – импулс характерли бошалмадыр. Гығылчымда бир-биринин ардынча кәлән бир нечә импулс бошалмасы олур. Белә бошалма дөврәләри гыса мүддәтә бағламаг үчүн истифадә едилән бошалдычыларда истифадә олунур;

5) јүксәк тезликли бошалма газда һәтта чәрәјан кечирән електродлар олмајан һалда да дәјишән електромагнит саһәсинин тә'сириндән баш верир;

6) тачвары бошалма-мүстәгил бошалмадыр вә газда, јүксәк тәзјиг шәраитиндә електронларын һеч олмаса биринин учунун ити (кичик әјрилик радиусуна малик) олдуғу һалда мүшаһидә олунур. Бу һалда саһә гејри-һәмчинс олур вә итиләнмиш електродун - анодун јанында саһә кәркинлији кәскин артыр. Бошалма 100-1000 В кәркинликләрдә баш верир вә чәрәјанын кичик гијмәтләри илә характеризә едилир. Бу бошалма кәркинлији стабилләшдирән чиһазларда, мәсәлән тачвари бошалмалы стабилитронда истифадә олунур.

Газбошалмасы аралығынын волт-ампер характеристикасындан (шәкил 11.11*в*) көрүнүр ки, $U_в$-нын кичик (бир нечә волт) гиjмәтләриндә чиһаздан кичик чәрәjан (10^{-17} А/м^2) ахыр (*а-б* һиссәси). Бу чәрәjан газ атомларынын космик шүаларла, ишыг сели илә вә башга амилләрлә ионлашмасы нәтичәсиндә jараныр. U_1 кәркинлиjиндә бир нөв доjма баш верир вә онун U_2 гиjмәтинә гәдәр артырылмасы чәрәjаны чох аз артырыр (*в-с* һиссәси), чүнки бүтүн електрон вә ион еһтиjатлары түкәнмиш олур. Кәркинлиjин сонракы артмасы чәрәjаны әмәлә кәтирән електронларын сүр'әтини о гәдәр артырыр ки, онлар тогушмалар нәтичәсиндә газ атомларыны ионлашдыра билирләр. Бу һалда икинчи ионлашма һадисәси баш верир вә jаранмыш мүсбәт ионларла катодун бомбардман едилмәси һесабына катодда икинчи емиссиjа jараныр. Бу ики амил чиһазын чәрәjаныны бир гәдәр дә артырыр (*c-d* һиссәси). *a-d* һиссәсиндәки бошалма геjри-мүстәгил характер дашыjыр, чүнки харичи тә'сирдән баш верән ионлашма илә әлагәдардыр. Харичи тә'сир кәсиләрсә бу бошалма jох олар.

Кәркинлик даһа да артырыларса, икинчи ионлашма вә икинчи емиссиjа сүр'әтләнир вә кәркинлик jандырма ($U_з$) кәркинлиjинә чатанда елә вәзиjjәт jараныр ки, газбошалма аралығында електронларын вә мүсбәт ионларын селвари артымы баш верир. Газда бошалмаjа катоддан ионларын зәрбәләри нәтичәсиндә вуруб чыхарылан електронларын да көмәjи олур. Бу һалда мүстәгил бошалма баш верир вә чиһаз jанма режиминә кечир. Јанма вәзиjjәти чәрәjанын сонракы артмасында да сахланылыр. Мүстәгил бошалманын характери конкрет шәраитдән: електродларын формасындан, газын тәркибиндән вә тәзjигиндән, бошалманын харичи дөврәсинин параметрләриндән (E_a,R) асылыдыр. Мүстәгил бошалмада чәрәjан селвари артыр вә онун гиjмәти харичи дөврәнин параметрләри илә мәһдудлашыр (E_a/R)-дән бөjүк ола билмәз).

E_a вә R-нин гиjмәтләриндән асылы олараг, чәрәjанын селвари артмасы просеси характеристиканын мүхтәлиф нөгтәләриндә баша чатыр. Бунунла әлагәдар олараг бир нечә бошалма һадисәси баш верир: 1) мүстәгил гаранлыг бошалма (ишчи нөгтә *d-e* саһәсиндә олур); 2) кечид вәзиjjәти (*e-f*); 3) нормал көзәрән бошалма (*f-g*); 4) аномал көзәрән бошалма (*g-h*).

Көзәрән бошалма ади катод саһәсинин парлаг ишыгланмасы илә әлагәдардыр. Ишыгланма катод саһәсиндә интенсив кедән ионлашма вә рекомбинасија просесләринин нәтиҹәсиндә баш верир. Ишыгланманын рәнки газын нөвүндән асылыдыр. Көзәрән бошалма R-ин кичик гијмәтләриндә баш верир. Ҹәрәјан 10^{-3}-10^{-1} амперә гәдәр арта биләр, онун селвари артмасы мүгавимәтдә кәркинлик дүшкүсүнүн артмасына вә ҹиһаза тәтбиг едилән кәркинлијин азалмасына кәтириб чыхарыр. Көзәрән бошалмада кәркинлик дүшкүсү 10 волтларла мүәјјән едилир вә о, јандырма кәркинлијинин гијмәтиндән чох аз олур. Бунун сәбәби одур ки, електродлар арасындакы саһәнин чох һиссәси јүксәк дәрәҹәдә ионлашмыш газла долудур вә бу саһәдә мүсбәт ионларын вә електронларын консентрасијасы бәрабәр олан електрики ҹәһәтдән нејтрал газбошалма плазмасы (ҹиһазларын плазмалы адландырылмасы мәһз бунунла әлагәдардыр) јараныр ки, плазмада да кәркинлик дүшкүсү чох аз олур. Катод јахынлығында мүсбәт ионларын һәҹми јүкү електронларын јүкүндән чох олдуғундан бурада бөјүк кәркинлик дүшкүсү алыныр. Електрик саһә кәркинлији дә артыр вә бу да ионлашманын интенсивилијинә тә'сир көстәрир.

Нормал көзәрән бошалмада демәк олар ки, бүтүн ҹиһазда кәркинлик дүшкүсү сабит олур. Ҹиһаздан ахан ҹәрәјан (R-ин азалмасы вә E_a-нын артмасы һесабына) бошалманын әһатә етдији һәҹмин кенишләнмәси (чохалмасы) нәтиҹәсиндә баш верир. Буну катодун ишыгланмасыны мүшаһидә етмәклә көрмәк олар. Әввәлҹә ишыгланма јалныз катодун кичик бир һиссәсиндә баш верир. Ҹәрәјан артдыгҹа ишыгланма бүтүн катоду әһатә едир. Ҹәрәјанын J_{a1} гијмәтиндә бошалма баш верән саһәнин кенишләнмәси һесабына ҹәрәјаны артырмаг мүмкүн дејилдир вә бу һалда аномал көзәрән бошалма (*g*-*h*) башлајыр.

Аномал көзәрән бошалмада ҹәрәјанын артмасы анҹаг катод саһәсиндә ҹәрәјан сыхлығынын артырылмасы һесабына ола биләр ки, бу да ҹиһаздакы кәркинлик дүшкүсүнүн артмасы илә әлагәдардыр. Катод кәркинлик дүшкүсү саһәсиндә ајрылан күҹ вә катодун температуру артыр вә бунун нәтиҹәсиндә термоелектрон емиссијасы баш верир. Бу јенә дә интенсив ионлашмаја кәтириб чыхарыр вә ҹәрәјан јенә дә селвари артыр (h). Бу һалда електродлар арасында гөвс јараныр (гөвси бошалма баш верир).

Чиһазын балонунда електродларарасында фәзада баш верән просесләр нәдән ибарәтдир?

Катоддан чыхан вә електрик саһәси илә сүр'әтләндирилән електронлар газын нејтрал атомларыны ионлашдырырлар: нәтичәдә мүсбәт ионлар вә икинчи електронлар јараныр (шәкил 11.11*а*). Бу просес електродларарасы саһәнин ваһид һәчминдә електронларын вә ионларын сајы бири-биринә бәрабәр олана кими давам едир. Бу һалда електронларын вә ионларын јүкләри таразлашыр (плазма јараныр) вә бошалма гөвсүндә кечиричиләрдә олдуғу кими чәрәјанын ахмасы үчүн шәраит јараныр. Плазмада електронларын һәрәкәти хаотик олур, лакин онларын сүр'әти електрик саһәси бојунча јөнәлмиш топланана да малик олур. Бу саһәдә кәркинлик дүшкүсү дә кичик олур. Катод јахынлығында електрик саһәси нәинки електронлары, һәм дә әкс истигамәтдә һәрәкәт едән ионлары сүр'әтләндирир. Онлар катода дәјиб икинчи емиссија јарадырлар. Ионларын енержисинин бөјүк гијмәтләриндә катод әријә биләр.

Анод саһәсиндә кедән просесләр електрон чәрәјанынын анод сәтһиндәки сыхлығындан асылыдыр.

Әкәр анод чәрәјаны електронларын пәракәндә чәрәјанынын сыхлығынын анодун сәтһинә һасилинә бәрабәр оларса, онда анодда кәркинлик дүшкүсү јаранмыр (шәкил 11.11*б*, 2 әјриси).

Әкәр анодун саһәси кичик оларса, онда анод плазмаја нисбәтән мүсбәт јүкләнир, електронлар плазмадан анода ахыр вә електрон сели харичи јүкүн (R) гијмәти илә мәһдудлашана гәдәр артыр. Бу һалда мүсбәт кәркинлик дүшкүсү јараныр (шәкил 11.11*б*, 1 әјриси).

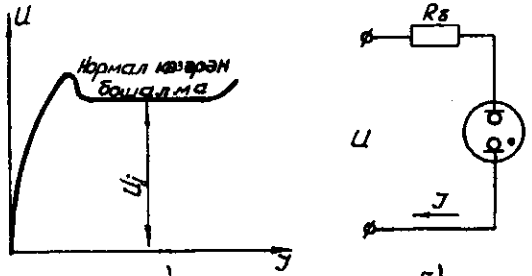
Әкәр анодун саһәси бөјүк оларса вә плазмадан кәлән електронларын сајы јүкүн тәләб етдијиндән чох оларса, анод плазмаја көрә мәнфи јүкләнир (шәкил 11.11б, 3 әјриси). Анодла плазма арасында мүсбәт јүкләнмиш ион өртүјү јараныр вә бу анодда кәркинлик дүшкүсүнүн ишарәсини дәјишир. Анодла өртүк арасындакы саһә електронларын плазмадан анода һәрәкәтинә әкс тә'сир көстәрир. Бу һалда јалныз кинетик енержиси чох бөјүк олан електронлар өртүјү кечиб анода чатырлар вә аз енержили електронлар керијә-плазмаја гајыдырлар.

Белә чиһаза дәјишән чәрәјан верәркән мүсбәт јарымдалғанын сонунда гөвс сөнүр, електронлар вә ионлар чиһазын ди-

варларына вә електродлара диффузија едирләр вә орада рекомбинасијалар баш верир. Бу просес ани - 0,001 санијә әрзиндә баш верир. Полјарлыг дәјишәндә електродлар аралығындан әкс чәрәјан ахыр. Бу чәрәјан гөвсүн сөнмәсинин сонунда електродлар арасында галан мүсбәт ионларын һәрәкәти илә әлагәдардыр. Әкс кәркинлијин бөјүк гијмәтләриндә онларын енержиси артыр вә бунун нәтичәсиндә анод електронлар емиссија едә биләр. Бу һалда чиһаз биртәрәфли чәрәјан кечирмә хүсусијјәтини итирир вә бу һадисәјә әксинә јандырма дејилир.

11.3.1. Мүстәгил бошалмалы ион чиһазлары

Белә чиһазлардан ән кениш јајыланларындан бири **неон лампаларыдыр.** Неон лампалары ики електрода малик олурлар, онларын балонлары неон артыглыг тәшкил етмәк шәртилә 100-2000 Па тәзјиглә газ гарышығы илә долдурулур. Лампанын електродларына јандырма кәркинлијиндән (U_j) артыг кәркинлик вериләндә газын ионлашмасы башлајыр, балонда нормал көзәрән бошалма баш верир, чиһаздакы кәркинлик јанма (U_a) кәркинлијинә гәдәр азалыр вә газын ишыгланмасы мүшаһидә олунур (шәкил 11.12*а*). Парлаг гырмызы-нарынчы ишыгланма хүсусијјәти бу лампалары мә'луматы тәсвир етмәк үчүн кениш истифадә етмәјә имкан верир.



Шәкил 11.12. Неон лампасынын волт-ампер характеристикасы (*а*) вә дөврәјә гошулма схеми (*б*)

Чиһазын узун мүддәтли ишләмәсини тә'мин етмәк үчүн онун дөврәсинә ардычыл олараг гијмәти ашағыдакы ифадә илә тә'јин олунан $R_б$ мүгавимәти гошулур:

$$R_б = (U_ш - U_j) / J_j,$$

бурада $U_ш$ – шәбәкә кәркинлији; U_j – јандырма кәркинлији; J_j – јанма чәрәјаныдыр.

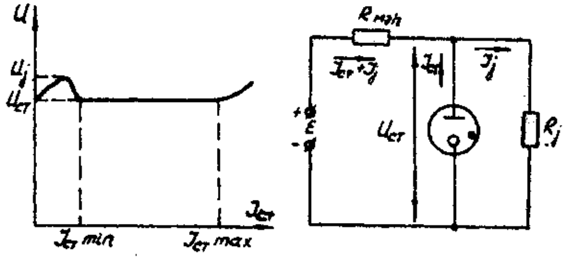
Чәрәјанын ән кичик гијмәти ишыгландырмада кифајәт гәдәр парлаглыг әлдә етмәк шәрти илә, ән бөјүк гијмәти исә узун мүддәтли иши тә'мин етмәк шәрти илә мүәјјән олунур. Бу лампалар һәм дәјишән, һәм дә сабит чәрәјанда ишләјә билирләр.

Дикәр икиелектродлу чиһаз сабит чәрәјан дөврәләриндә кәркинлијин сабит сахланмасы үчүн истифадә едилән **стабилитрондур**. Стабилитронлар көзәрән вә тачвари бошалмалы олурлар.

Стабилитрон коаксиал силиндрик конструксијадан ибарәтдир, дахили никел чубуг анод, ону әһатә едән силиндрик електрод исә катод ролуну ојнајыр. Чиһазын балону 2,5-10 кПа тәзјигә кими тә'сирсиз газларла долдурулур.

Чиһазын стабилләшдирмә хүсусијјәти көзәрмә режиминдә катод кәркинлик дүшкүсүнүн сабит галмасына әсасланыр.

Чиһаза верилән јандырма кәркинлији һәмишә стабилләшдирилән кәркинликдән чох олур ($U_j > U_{ст}$). Көзәрән бошалмалы стабилитронда дајаныглы көзәрмә бошалмасында катодун јалныз бир һиссәси ишыгланыр вә чиһаздан $J_{стmin}$ чәрәјаны ахыр (шәкил 11.13*а*). Електродларарасы кәркинлијин азачыг артырылмасы катодун ишыгланан сәтһинин вә бошалма чәрәјанынын артмасына сәбәб олур.



а) *б)*

Шәкил 11.13. Газбошалмалы стабилитронун волт-ампер характеристикасы (*а*) вә дөврәјә гошулма схеми (*б*)

Чәрәјанын $J_{стmax}$ гијмәтиндә катодун бүтүн сәтһи ишыг сачыр. Характеристиканын ишчи саһәси $J_{стmin}$ - $J_{стmax}$ арасында олур.

Чиһаз јүкә паралел гошулур, үмуми дөврәјә исә мәһдудлашдырычы мүгавимәт гошулур (шәкил 11.13*б*). Мәнбәјин кәркинлији белә тә'јин едилир:

$$E = U_{ст} + R_{мәh}(J_{ст} + J_j)\ .$$

$R_{мәh}$ елә сечилир ки, мәнбәнин кәркинлијинин вә јүк чәрәјанынын (мүгавимәтинин) верилмиш гијмәтләринин дәјишмәләриндә стабилитрондан ахан чәрәјан $J_{стmax}$-дан чох олмасын. Әкәр стабилитрондан ахан чәрәјан характеристиканын ишчи саһәси һәддиндә оларса, E дәјишәндә мәһдудлашдырычы мүгавимәтдәки кәркинлик дүшкүсү дә дәјишир, лакин стабилитрондакы вә јүкдәки кәркинлик дәјишмир. Ишчи нөгтә адәтән характеристиканын ортасында сечилир. Стабилитронун стабилләшдирмә кәркинлијиндән јүксәк кәркинликләри сабит сахламаг үчүн бир нечә стабилитрон ардычыл гошулур.

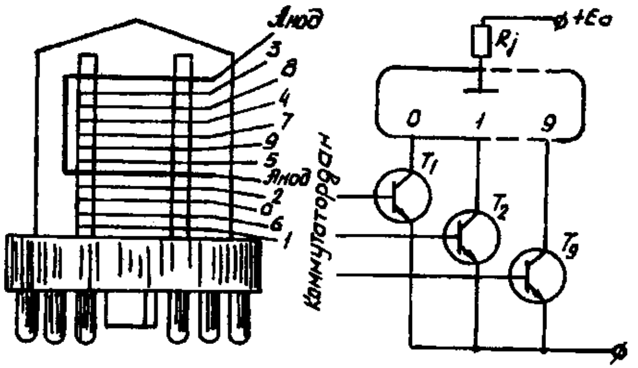
Чиһазын әсас параметрләри јанма кәркинлији, $U_{ст}$, $J_{стmax}$, $J_{стmin}$- дур.

Тачвари бошалмалы стабилитронлар чәрәјанын кичик гијмәтләриндә јүксәк кәркинликләри (0,4-30 кВ) стабилләшдирмәк үчүн истифадә едилир. Онлары һидрокенлә бир нечә кПа тәзјигдә долдурурлар. Тачвари бошалма газын јүксәк тәзјигиндә вә кәскин гејри-һәмчинс електрик саһәсиндә баш верир.

Хүсуси ишарә мә'луматыны тәсвир етмәк үчүн нормал көзәрән бошалма режиминдә ишләјән сигнал вә индикасија лампаларындан истифадә олунур. Онларын балонлары сејрәк тә'сирсиз газла долдурулур. Катод рәгәм вә ја ишарә шәклиндә нихром мәфтилдән дүзәлдирилир. Анод вә ја ики анод назик тор шәкилли олур (шәкил 11.14*а*). Електродлара кәркинлик верәндә анодла катодларын биринин арасында бошалма баш верир вә ишыгланан катодун формасы рәгәм, һәрф вә ја ишарәни ајдын охумаға имкан верир.

Белә лампалар чох давамлы олур, аз енержи сәрф едир вә е'тибарлы ишләјирләр. Рәгәм индикасија едән лампалар 10 катодлу (0-9-а гәдәр әрәб рәгәмләри) олурлар.

Рәгәм-һәрф лампаларында катодлар латын вә јунан әлифбаларынын һәрфләри вә бир чох ријази символлар (W, F, H_z, V, S, Ω, A, H, +, -, Г, M, m, μ, %) шәклиндә олур.



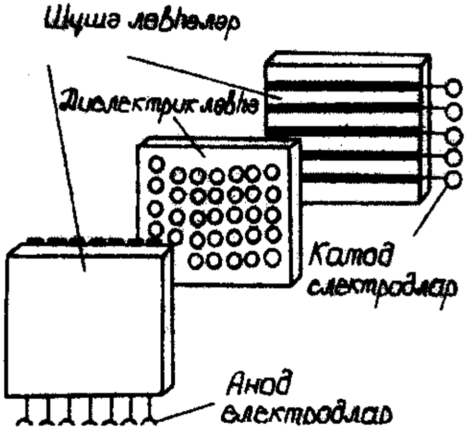
Шәкил 11.14. Сигнал лампасынын гурулушу (*а*) вә гошулма схеми (*б*)

Рәгәм индикаторунун дөврәјә гошулма схеми шәкил 11. 14.*б*-дә көстәрилмишдир. Коммутасија гурғусундан кәлән сигналларын һәр бири мүвафиг транзистору ачыр вә ујғун катода мәнфи потенсиал верилир. Нәтичәдә бошалма үмуми анодла һәмин катод арасына кечирилир.

Мә'луматы тәсвир етмәк үчүн истифадә едилән чиһазлардан бири дә **газбошалмалы (плазмалы) панелләрдир**. Онлар көзәрән бошалманын оптик шүаланмасыны истифадә едән чохелектродлу чиһазлардыр. Бу чиһазлара хас олан үмуми конструктив әламәт ондан ибарәтдир ки, мүхтәлиф чиһазларда ики електрод (анод вә катод) системи мөвчуд олур (шәкил 11.15). Бу електродлар јасты вә ја гофр шәкилли шүшә лөвһәләрин үзәриндә јерләшди-рилир. Шүшә лөвһәләр бир-бири илә үзәриндә матриса системли дешикләри олан диелектрик лөвһә илә араланыр. Дешикләрин оху електродларын охларынын кәсишмә нөгтәләриндән кечир. Бошалманын көрүнән шүаланмасынын кәнара чыхмасына мане олмамаг үчүн золаг шәкилли електродлар шәффаф олурлар. Електродлар арасында фәза бир нечә јүз Па тәзјиг алтында ја тәмиз тә'сирсиз газларла, ја да газ гарышығы илә долдурулур. Ишыгланма һәјәчанланмыш газ атомларынын кичик енержили вәзијјәтләрә кечмәси елә әлагәдардыр. Газ гарышығынын тәркиби елә сечилир ки, ионлашма, һәјәчанланма вә рекомбинасија һадисәләринин интенсивлији јүксәк олсун. Көзәрән бошалманын шүаланма спек-

три инфрагырмызы, гырмызы вә ултрабәнөвшәјн саһәдә јерләшир. Рәнкли панелләрдә лүминофору һәјәчанландырмаг үчүн көрүнмәјән шүаланмадан истифадә олунур.

Бошалманы јандырмаг панелә үчүн кифајәт едән кәркинлик (100-200 В) вериләндә һәр һансы бир катодла анод арасындакы јувада (електродларын кәсишдији јердә) көзәрән бошалма баш верир. Кәркинлик мүәјјән бир гајдада бир нечә катода вә анода вериләрсә, ајры-ајры нөгтәләрин көмәјилә истәнилән шәкли алмаг олар. Матриса типли панелләрдә кириш индикасија сигналлары васитәсилә чохлу газбошалма јуваларынын е'тибарлы вә сәһвсиз гошулмасыны тә'мин етмәк чох чәтиндир. Иш сүр'әтини вә иш стабиллијини тә'мин етмәк үчүн һәр јувада көмәкчи бошалмадан истифадә олунур.



Шәкил 11.15. Газбошалмалы (плазмалы) панелин гурулушу

Сабит чәрәјанла ишләјән панелләр һәм дә чох рәнкли тәсвир верә билирләр. Бу һалда јуваларын јан сәтһләринә мүәјјән рәнкли ишыгланма верән лүминофорлар чәкилир. Әсас (көј, јашыл вә гырмызы) рәнкләри верән лүминофорлары олан јувалары јанашы јерләшдирмәклә рәнкли тәсвирләр алыныр.

Дәјишән чәрәјанла ишләјән панелләрин ајырдетмә габилијјәти 25-30 елемент/см һәддиндә олур, бу нөгтәләр арасында 0,4-0,3 мм мәсафәјә ујғун кәлир. Сабит чәрәјанда ишләјән панелләрин ајырдетмә габилијјәти 12 елемент/см-дир.

Декатрон көзәрән бошалмалы чохкатодлу чиһаздыр. О, дискшәкилли аноддан вә онун әтрафында дүзүлмүш ијнәшәкилли катодлардан ибарәтдир. Катодларын сајы 10, 20, 30 вә с. олур. Көзәрән бошалма анодла катодлардан биринин арасында баш верәрәк о бири катода кечир (бунун үчүн һәр катодун јанында 1-2 алткатодлар јерләшдирилир). Он импулсдан сонра бошалма аноду әһатә едән катодлара кечир. Бошалманы бир катоддан дикәринә өтүрмә схеми елә гурулмушдур ки, 10 әсас

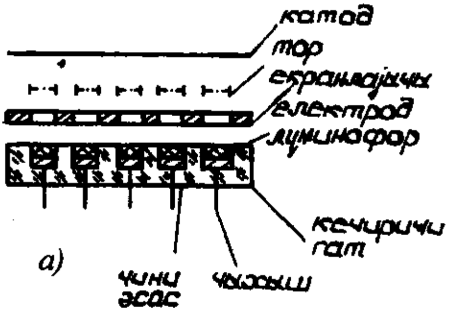
катодда бошалма алткатодлардан даһа чох дајаныр. Әсас катодун сон нөмрәсинә көрә декатрона дахил олан сај импулсларынын мигдары тә'јин едилир. 10 катоду кечәндән сонра декатронун чыхышында импулс әмәлә кәлир вә бу импулс даһа јүксәк мәртәбәјә аид олан декатрон үчүн кириш импулсу олур.

Декатронлар сајычы гурғуларда истифадә олунур.

11.4. Вакуумлу лүминессент индикасија елементләри

Бу чиһазлар үзәринә оксид гаты чәкилмиш билаваситә көзәрдилән катоддан, тордан вә бир мүстәвидә јерләшән бир нечә аноддан ибарәт олур.

Чиһазын әсасыны шүшә вә ја чини тәбәгә тәшкил едир (шәкил11.16*а*). Бу тәбәгәнин сегментли дәринликләриндә (јува-



Шәкил 11.16 Вакуумлу лүминессент индикасија елементинин гурулушу (а), харичи көрүнүшү (б) вә сегментләрин јерләшдирилмәси (в)

ларында) ајры-ајры чыхышлары олан чәрәјан кечирән гатлар (анодлар) јерләшир. Бу гатларын үзәринә лүминофор чәкилир. Тәбәгәнин үстүндә дешикләри олан метал екранлајычы електрод јерләшир. Онун дешикләри мүвафиг сегментләрин гаршысында олур. Екранлајычы електроддан бир гәдәр аралы тор вә даһа јухарыда оксидли катод јерләшдирилир. Шүшә балон ичәридән чәрәјан кечирән гатла өртүлүр. Тора катода нисбәтән мәнфи кәркинлик вермәклә електрон селини тәмиз кәсмәк вә лүминофорун ишыгланмасынын гаршысыны алмаг мүмкүн олур. Анодлар ишарә синтез едән метал сегментләр шәклиндә олур вә онларын үзәринә лүминофор чәкилир. Һәр бир сегментин ај

рыҹа чыхышы олур вә она катода нисбәтән мүсбәт кәркинлик верилир. Катодла анод арасында јерләшән тор ҹиһазын ҹәрәјаныны идарә етмәк үчүндүр. Она анод потенсиалына јахын кәркинлик верәндә онун саһәси електронлары сүр'әтләндирир вә онлар тордан кечәрәк кәркинлији олан анодлара дүшүрләр. Анодун сәтһинә дәјәркән електронлар лүминофорун јашыл рәнкдә ишыгланмасыны тә'мин едирләр. Ишыгланан сегментләрин мүәјјән топлусу лазыми ишарәни тәсвир едир. Бу тәсвир катод тәрәфдән балонун сәтһиндән мүшаһидә едилир. Торун потенсиалы сыфра јахын оланда ондан кечән електрон сели кичик олур вә анод ишыгланмыр.

Рәгәм синтез едән вакуум-лүминессент индикасија елементинин харичи көрүнүшү, сегментләрин јерләшмә гајдасы вә онларын формалары шәкилдә (*б*) көстәрилмишдир. Бу ҹиһазлар арамсыз вә импулс режимләриндә ишләјирләр.

Рәгәм вакуумлу лүминессент ҹиһазлар сәјјар нәзарәт-өлчү вә сај-һесаблама гурғуларында мә'луматы 10-луг системдә көстәрмәк үчүн истифадә едилир. Индикасија елементләринин сајы тәсвир едилән 10-луг әдәдин мәртәбәләринин сајы илә мүәјјән едилир.

Бу ҹиһазлар һәм мүстәви, һәм дә силиндрик балонлар шәклиндә бурахылыр. Силиндрик шәкиллиләр бир вә чохмәртәбәли, мүстәви шәкиллиләр чохмәртәбәли олурлар. Ҹиһазларын әксәријјәти өз идарә схеми вә гида мәнбәји илә бурахылыр.

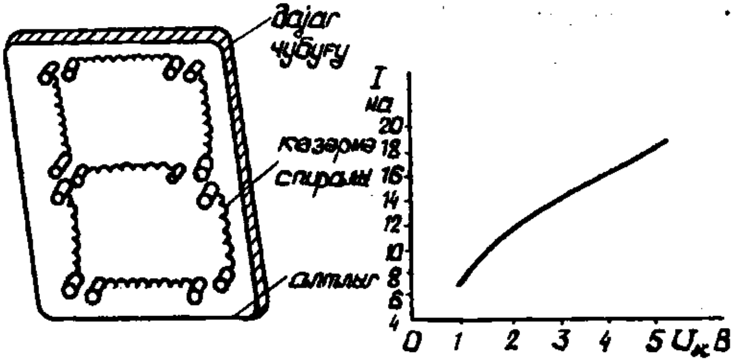
Матриса шәклиндә һазырланан ҹиһазлар телевизија тәсвири алмаға имкан верир.

11.5. Вакуумлу көзәрдилән индикасија елементләри

Бу ҹиһазлар ичәрисиндә волфрам спирал шәклиндә һазырланмыш тәсвир елементләри јерләшмиш вакуумлу балондан ибарәт олур (шәкил 11.17*а*). Көзәрдилән мәфтилин спирал шәкилли олмасы вә онларын бирләшдирилдији дајагларын арасындакы мәсафәнин кичик олмасы гыздырыларкән мәфтилләрин асылмасынын гаршысыны алыр. Мәфтилләр 1250°С-јә гәдәр гыздырылдығындан онлар узун мүддәт ишләјә билирләр. Тәсвирин јахшы алынмасы үчүн ҹиһазын алтлығы гара рәнкләнир.

Индикасија елементләринә һәр бир сегментин чыхышы илә үмуми чыхыш арасында дәјишән, сабит вә импулс характерли кәркинлик верилир. Елементин гызмасы ани баш вермир, 0,2-0,25 санијә һәддиндә кечикмә (кәркинлик тәтбиг едиләндән парлаглығын дајаныглы вәзијјәтиндәкиндән 80%-ә гәдәр олмасына сәрф едилән вахт) олур.

Волт-ампер характеристикасындан көрүнүр ки, чәрәјан (демәли, һәм дә парлаглыг) кәркинлијә мүтәнасиб кәскин артыр (шәкил 11.17*б*).



а) *б)*

Шәкил 11.17 Вакуумлу көзәрдилән индикасија елементинин гурулушу вә волт-ампер характеристикасы

Бу елементләр нисбәтән бөјүк чәрәјанларда (онларла миллиампер һәддиндә) ишләјирләр. Чиһазын ф.и.ә. кичик олур, чүнки тәтбиг едилән күчүн чох һиссәси истилик кечиричилији вә конвексија һесабына итирилир. Нәзәрә алмаг лазымдыр ки, сојуг мәфтилин мүгавимәти кичик олдуғундан һәјачанланма сигналы вериләндә илк анда чәрәјан ики дәфәјә гәдәр кәскин арта биләр.

Импулс сигналы илә һәјәчанланма заманы мәфтилин ани вә орта температуру кәскин фәргләнә биләр вә бу елементин иш мүддәтиндә мәнфи тә'сир кәстәрир. Она көрә импулсларын сыхлығынын 12-дән чох олмамасы мәгсәдәујғун һесаб едилир.

Бу елементләр парлаглығына көрә дикәр актив индикаторлардан үстүндүрләр. Бунларын мүсбәт чәһәти һәм дә ондадыр ки, мүхтәлиф ишыг сүзкәчләринин көмәјилә чүрбәчүр рәнкли тәсвирләр алмаг мүмкүн олур.

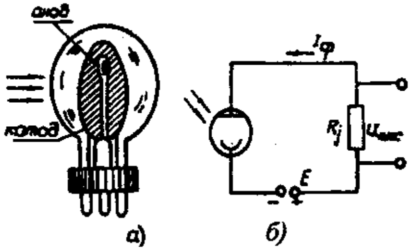
Импулс шәкилли вә дәјишән кәркинликлә һәјәчанланма заманы резонанс олмамасы үчүн 0-150 Һс диапазонунда вә 500 Һс-дән јухары тезликләрдә ишләмәк мәгсәдәујғундур.

11.6. Вакуумлу вә газбошалмалы фотоелектрон чиһазлары

Вакуумлу вә газбошалмалы (ион) фотоелектрон чиһазларынын иши харичи фотоеффект һадисәсинә әсасланыр. Бу чиһазлар електромагнит шүаланмасынын енержисини електрик сигналына чевирирләр.

Онларда сәнаје електроникасы схемләриндә инсанын көрмә функсијасыны јеринә јетирән елементләр кими, телевизијада, фототелеграфда, сигнализасија гурғуларында, рабитәдә, електрон автоматика схемләриндә истифадә олунур.

Бу чиһазлара чох вахт **фотоелементләр** дә дејилир. Бу чиһазларын әсас нүмајәндәләри вакуумлу вә газбошалмалы **фотоелементләр вә фоточохалдычылардыр.**

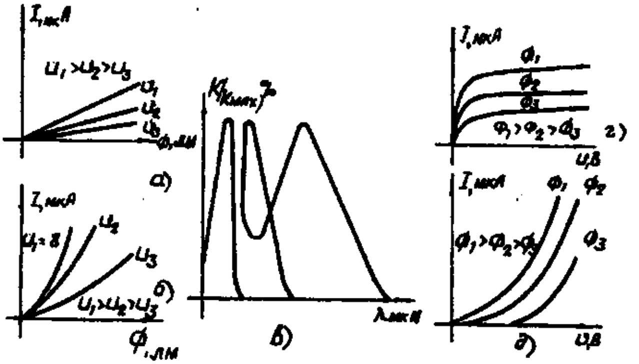


Шәкил 11.18. Фотоелементин гурулушу *(а)* вә дөврәјә гошулма схеми *(б)*

Конструктив чәһәтчә фотоелементләр ики електродафотокатода вә анода малик олурлар (шәкил 11.18*а*). Електродлар шүшә балонда јерләшдирилир. Вакуумлу фотоелементләрин балонунда 10^{-4}-10^{-5} Па һәддиндә вакуум јарадылыр, газбошалмалы фотоелементләрин балону исә 10-100 Па тәзјигдә аргонла долдурулур. Һәр ики тип чиһазларда истифадә олунан фотокатодлар ејни олдуғундан онларын спектрал характеристикалары ејни олур (шәкил11.19).

Фотокатод балонун дахили сәтһинә чәкилмиш назик ишыға һәссас олан гатдан ибарәтдир. Адәтән күмүш-оксикен-сезиум, сүрмә-сезиум вә чохгәләвили фотокатодлар истифадә олунур. Спектрин ултрабәнөвшәји һиссәсиндә ишләјән чиһазларда сүрмә-калиум фотокатодлары ишләдилир. Анод никелдән мәфтил һәлгә, илкәк вә ја назик тор шәклиндә дүзәлдилир вә ишыг селинин фотокатодун үзәринә дүшмәсинә мане олмур.

Фотоелементә харичи кәркинлик вериләндә вә фотокатодун үзәринә ишыг сели дүшәндә фотокатод електронлары емиссија едир вә чиһазын дөврәсиндән фоточәрәјан ахыр (шәкил 11.19*б*). Бу чәрәјан гијмәти ишыг селинә мүтәнасиб олур:



Шәкил 11.19. Електровакуумлу (а, г, в) вә газбошалмалы (б, д, в) фотоелементләрин ишыг (а, б), волт-ампер (г, д) вә спектрал (в) характеристикалары

$J_ф$ = KФ (K - фотоелементин интеграл һәссаслығыдыр). Ахан чәрәјан чыхыш кәркинлијини дә дәјишир: $U_{чых}=J_ф R_J=KФR_J$. Бу ифадәдән көрүнүр ки, ишыг селини дәјишмәклә чыхыш кәркинлијини идарә етмәк олар.

Газбошалмалы фотоелементләрдә тә'сирсиз газын балона долдурулмасы һәссаслығы вакуумлу чиһаза нисбәтән бир нечә дәфә артырыр. Бу артым чиһазда гаранлыг бошалманын јаранмасы илә әлагәдардыр. Бошалма нәтичәсиндә әмәлә кәлән икинчи електронлар чәрәјаны артырырлар. Бу һадисә газла күчләндирмә адланыр вә мүвафиг әмсал илә характеризә едилир: $K_г=J_г / J_в$. Бурада $J_г$ - газбошалмалы фотоелементин, $J_в$ - вакуумлу фотоелементин фоточәрәјаныдыр .

Електровакуумлу фотоелементләрин күчләндирмә әмсалы 6-10 һәддиндә олур.

Електровакуумлу вә газбошалмалы фотоелементләрин әсас характеристикалары шәкил 11.19-дә көстәрилмишдир. Көрүндүјү кими ишыг характеристикалары хәтти характер дашыјырлар. Волт-ампер характеристикаларындан көрүнүр ки, вакуумлу елементләрдә фоточәрәјан дојма гијмәтини чох тез алыр, чүнки катоддан чыхан бүтүн електронлар анода чатмыш

олур. Ион чиhазларында исə дојма hалы мүшаhидə олунмур, чүнки анод кəркинлији артдыгча газ ионлашыр. Кəркинлик јандырма кəркинлијинə чатанда мүстəгил газ бошалмасы баш верир вə фотоелемент сырадан чыхыр.

Вакуумлу фотоелементлəр ити сүр'əтли чиhазлардыр, онларын тезлик характеристикаларынын ишчи саhəси 10^8-10^9 Һс həддини əhатə едир. Бу чиhазлар 50-90^0 С температурда ишлəјə билирлəр. Температур јүксəлдикчə термоелектрон емиссијасы нəтичəсиндə əлавə чəрəјан əмəлə кəлир. Вакуумлу елементлəрин иш мүддəти 1000 саата јахын олур.

Газбошалмалы чиhазлар ионсузлашма hадисəсинин мөвчудлуғу илə əлагəдар мүəјјəн əталəтə малик олурлар. Ишыг селинин модулјасија тезлијинин 10 кҺс гијмəтлəриндə бунларын həссаслығы кəскин азалыр. Бу чиhазларын дикəр мəнфи чəhəти фотокатодун тез "јорулмасы" вə иш мүддəтинин аз (700 саат) олмасыдыр. Бу, катодун мүсбəт ионларла бомбардман едилмəси илə əлагəдардыр.

Вакуумлу вə газбошалмалы фотоелементлəрин əсас параметрлəри ашағдакылардыр:

1) интеграл həссаслыг - 1 лм ишыг селинин јаратдығы чəрəјан (вакуумлу чиhазларда 20-90 мкА/лм; газбошалмалы чиhазларда (150-200 мкА/лм);

2) спектрал həссаслыг - фотоелементин мүəјјəн далға узунлуглу (монохроматик) ишыг селинə həссаслығы;

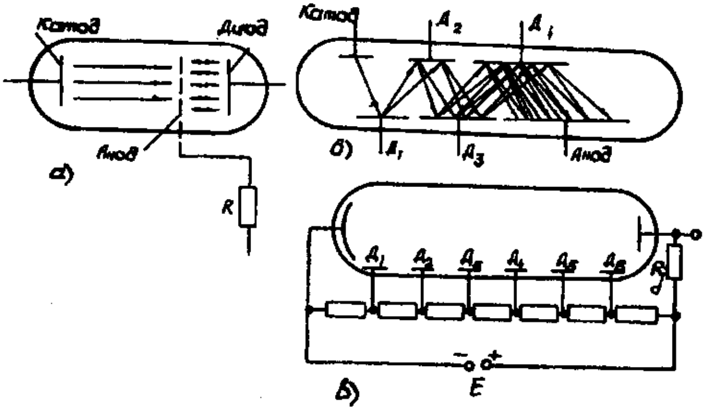
3) гаранлыг чəрəјаны - ишыг сели олмајан hалда дөврəдəн ахан чəрəјан (бу чəрəјан ики hиссəдəн ибарəтдир: катодун термоелектрон емиссијасындан алынан термочəрəјан вə балонун шүшəсинин вə алтынын həчми вə сəтhи кечиричилији hесабына əмəлə кəлəн сызма чəрəјаны).

Чиhазлар фотореле вə фотоөлчмə режиминдə ишлəјирлəр. Фотореле режиминдə чиhаз ики дајаныглы вəзијјəтə малик олур: гошулмуш (ишыг оланда) вə ачылмыш (ишыг олмајанда). Фотоөлчмə режиминдə чиhазын чəрəјаны ишыг селинин дəјишмəси нəтичəсиндə дəјишир. Иш режимини характеристикалар əсасында сечирлəр.

Фотоелектрон чохалдычылары електровакуумлу чиhазлара аиддирлəр вə онларда фотоелектрон емиссијасынын чəрəјаны икинчи електрон емиссијасы чəрəјаны hесабына артырылыр.

Бирkаскадлы чиhазлар үч електрода-фотокатода, јүксәк икинчи електрон емиссијасы әмсалына малик олан динода вә електронлар үчүн "шәффаф" олан анода маликдирләр (шәкил 11.20*а*). Динода анода нисбәтән даhа аз мүсбәт потенсиал верилир. Фотокатодлардан чыхан илкин електронларын бир hиссәси анода чатыб онун дөврәсиндә илкин чәрәјан јарадыр. Онларын дикәр hиссәси аноддан кечиб динода дәјир вә онун сәтhиндән икинчи електронлары вуруб чыхарыр. Бунун нәтичәсиндә чәрәјанын гијмәти чохалыр. Динод дөврәсиндәки чәрәјан катодун чәрәјандан чох ола биләр: $J_g = \tau J_k$ (τ-икинчи електрон емиссијасы әмсалыдыр).

Чохкаскадлы чохалдычыларын 10-15 диноду олур. Онларда 1-чи динoддан чыхан икинчи електронлар даhа јүксәк потенсиала малик олан 2-чи диноду, 2-чи динoддан чыхан икинчи електронлар 3-нү вә с. бомбардман едирләр (шәкил 11.20*б*).



Шәкил 11.20. Бирkаскадлы (*а*) вә чохкаскадлы (*б*) фотоелектрон чохалдычысынын гурулушу вә чохкаскадлы чиhазын дөврәјә гошулма схеми (*в*)

Динодларын сајы n оларса, јүк чәрәјаны $J_j = \sigma^n J_k$ олур.

Нәзәри чәhәтдән белә чиhазларда фотоелементин hәссаслығыны милјонларла артырмаг олар. Лакин практики олараг икинчи електрон селинин hамысыны сонраkы динода истигамәтләндирмәк мүмкүн олмадығындан 100 минлә 10 милјон арасында күчләндирмә әлдә едилир. Чохкаскадлы фоточохал-

дычынын дөврәјә гошулма схеми шәкил 11.20*в*-дә көстәрилмишдир.

Белә чиһазларын көмәјилә 10^{-9} лм һәддиндә ишыг селләрини өлчмәк мүмкүндүр. Бундан кичик ишыг селләринин өлчүлмәси катодун термоелектрон емиссијасы вә динодун автоелектрон емиссијасындан јаранан гаранлыг чәрәјанынын флуктуасијасы (дәјишмәси) сәбәбиндән мүмкүн олмур.

Бу чиһазларын волт-ампер вә спектрал характеристикалары вакуумлу фотоелементләрин характеристикаларына ујғундур. Тезлик характеристикасы вакуумлу фотоелементә нисбәтән даһа писдир, чүнки 1000 MҺс-дән јүксәк тезликләрдә електронларын катоддан анода учма мүддәти өзүнү көстәрир.

Фоточохалдычыларын мүсбәт чәһәти јүксәк һәссаслыг, мәнфи чәһәтләри исә конструксијанын мүрәккәблији, јүксәк дәјәри вә јүксәк кәркинлик мәнбәјинин олмасыдыр.

Чиһазларын әсас параметрләри: анод кәркинлији (200-2300В), динодлар арасындакы кәркинлик (50-150В), интеграл һәссаслыг (1-100 А/лм) вә һүдуд (һисс олуна билән минимал ишыг сели) һәссаслығыдыр.

ƏДƏБИJJAT

(рус дилиндә)

1. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991.-288с.
2. Быстров Ю.А., Мироненко И.Г. Электорнные цепи и устройства: Учебное пособие для электротехн. и энерг. вузов.-М.:Высшая школа, 1989-287с.
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. Виноградов Ю.В. Основы электронной и полупроводниковой техники. – М.: Энергия,1972. – 534 с.
5. Горбачов Г.Н., Е.Е.Чаплыгин Промышленная электроника Москва.: Энергоатомиздат, 1988г. 320с.
6. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. – К.: Высшая школа,1989.- 423с.
7. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учебное пособие для вузов. – М.:Высшая школа.,1991.-622с.
8. Ерофеев Ю.Н. Импульсная техника: Учеб.пособие для радиотехн. спец.вузов.-М.:Высшая школа.,1984.-391с.
9. 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.
10. Жеребцов И.П. Основы электроники. Л.: Энергия, 1985
11. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов.-М.:Высшая школа,1982.-496с.
12. Захаров В.К. Электронные элементы автоматики. Учебник для вузов. Изд.2-е, перераб. и доп.Л.,"Энергия",1975.-351с.
13. Захаров В.К., Лыпарь Ю.И. Электронные устройства автоматики и телемеханики: Учебник для вузов.-Л.:Энергоатомиздат. Ленинград. отд.-1984-432с.

14. Краснопрошина А.А., Скаржепа В.А., Кравец П.Н. Электроника и микросхемотехника, Часть 2, Электронные устройства промышленной автоматики. Учебник.-К.: Выща школа, 1989.-303с.
15. Криштафович А.К., Трифонюк В.В. Основы промышленной электроники: Учебник для электрорадиотехн. и электроприборостроит. спец. техникумов –М.: Высшая школа 1985.-287с.
16. Микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов. В 9 кинигах / Под ред. Л.А.Коледова. Кн. Физические основы функционирования изделий микроэлектроники / О.В.Митрофанов, Б.М.Симонов, Л.А.Коледов.-М.: Высшая школа, 1987-168с.
17. Основы промышленной электроники: Учеб. для электротехн. спец. вузов / В.Г.Герасимов, О.М.Князьков, А.Е.Кранопольский, В.В.Сухоруков; Под ред. В.Г.Герасимова.-М: Высшая школа, 1986-336с.
18. 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.
19. Промышленная электроника. Учеб. для вузов / А.И.Котлярский, С.П.Миклашевский, Л.Г.Наумкина, В.В.Павленко-М.: Недра 1984:, -248с.
20. Промышленная электроника"- М.: "Недра", 1984г.
21. Руденко В.С., Сенько В.И., Трифонюк В.В. Приборы и устройства промышленной электроники.-К.: Тэхника, 1990.-368с.
22. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Издание второе, перераб. и доп.-М.: Энергия, 1967-615с.
23. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники, Учебное пособие для вузов, -М.: Сов.радио, 1980-424с.
24. Тучов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А.- Полупроводниковые приборы, Для студентов вузов. -М.: Энергоатомиздат 1990г. -576с.

25. Электронные приборы: Учебник для вузов /В.Н.Дулин, Н.А.Аваев, В.П.Демин и др.: Под ред. Г.Г.Шишкина.-М.: Энергоатомиздат, 1989.-496с.
26. Ушаков В.Н., Долженко О.В. Электроника: от транзистора до устройства –М.: Радио и связь. 1983. -320с.

ӘДӘБИЈЈАТ

(азәрбајҹан дилиндә)

1. Абдуллајев Һ.Б., Искәндәрзадә З.Ә. Јарымкечиричи чевиричиләр, Бакы.: Елм, 1974.
2. Вакуумлу вә плазмалы електроника. Методик вәсаит, Бакы.: Азәрб.ДНА-нын нәшри, 1999, 44 с.
3. Давудов Б.Б., Дашдәмиров К.М. Радиоелектрониканын әсаслары, дәрс вәсаити. Бакы.: БДУ-нын нәшри 1992.
4. Ејвазов Е.Ә. Јарымкечиричиләр физикасындан хүсуси курс. Бакы.: АПИ-нин нәшри. I һиссә, 1980,
5. Иоффе А.Ф. Јарымкечиричиләр вә онларын тәтбиги, З.Казымзадәнин редаксијасы илә Бакы.: Азәрнәшр, 1958.
6. Каганов И.Л. Сәнаје електроникасы, Бакы.: 1966.
7. Микроелектроника (методик вәсаит), Бакы.: Азәрб.ДНА-нын нәшри, 1999, 32 сәһ.
8. Талиби М.Ә., Гәрибов М.А., Һачыјев М.Ч. Микроелектроника. Бакы.: Елм, 1976.
9. Таһиров В.И. Микрокечиричиләр физикасынын әсаслары, Дәрс вәсаити, Бакы.: «Маариф», 1984.
10. Фәрәчов В.Ч. Микросхемләрин вә микропросессорларын технолокијасы вә конструксија едилмәси (Һибрид интеграл микросхемләр), дәрс вәсаити, Бакы.: 1991.
11. Фәрәчов В.Ч. Јарымкечиричи интеграл схемләр, Дәрс вәсаити, Бакы.: АзТУ-нун нәшри 1996.

МҮНДӘРИЧАТ

Өн сөз 3
Кириш 4
1. Електрик сигналлары вә онларын електрик дөврәләриндән кечмәси 9
1.1. Сигналларын тәснифаты вә әсас параметрләри. 9
1.2. Дәјишән сигналларын әсас характеристикалары 18
1.3. Импулс шәкилли сигналларын әсас характеристикалары 21
1.4. Електрик дөврәләринин әсас характеристикалары 26
1.5. Сигналларын електрик дөврәләри васитәсилә чеврилмәси вә өтүрүлмәси просесләри 30
1.6. Електрон гурғуларынын електрик дөврәләринин әсас хүсусиј-јәтләри 39
2. Електрон чиһазларынын ишинин физики әсаслары. 55
2.1. Електрон чиһазлары һаггында үмуми мә'лумат 55
2.2. Електронларын електрик вә магнит саһәләриндә һәрәкәти . . 56
2.3. Електрон емиссијасынын нөвләри .57
2.4. Газларда електрик чәрәјанлары 59
2.5. Бәрк чисмин зона нәзәријјәси әсаслары. Енержи зоналары. . .61
3. Јарымкечиричиләр електроникасынын әсаслары 65
3.1. Јарымкечиричи материаллар һаггында үмуми мә'лумат 65
3.2. Јарымкечиричинин мәхсуси кечиричилији вә онун температур дан асылылығы.. 66
3.3. Јарымкечиричинин ашгар кечиричилији вә онун температурдан асылылығы. 69
3.4. Електронларын јарымкечиричиләрдә пајланмасы вә һәрәкәт етмәси ганунлары 74
3.5. Електрон-дешик кечидинин хүсусијјәтләри. Кечидин волт-ампер характеристикасы.. 77
3.6. Јарымкечиричиләрдә кечидләрин дикәр нөвләри 89
3.6.1. Јарымкечиричи – метал кечиди 89
3.6.2. Јарымкечиричи – диелектрик кечиди 95
3.6.3. Һетерокечид 97
3.7. Јарымкечиричиләрдә сәтһ һадисәләри 98
3.8. Јарымкечиричиләрдә електромагнит шүаланмасы. Дахили фото еффект һадисәси. 101
3.9.Јарымкечиричи елементләрин һазырланма технолокијасы...... 103
4. Јарымкечиричи параметрик елементләр..............................106
5. Јарымкечиричи диодлар...... 110
5.1. Дүзләндиричи диодлар 110

5.2. Импулс диодлары 113
5.3. Стабилитронлар 115
5.4. Тунел диодлары 116
5.5. Варикаплар 118
5.6. Шоттки диодлары 120
6. Биполјар транзисторлар... 123
6.1. Биполјар транзисторун иш принсипи 124
6.2. Биполјар транзисторун гошулма схемләри вә статик характеристикалары 128
6.3. Биполјар транзисторун динамик режими вә динамик характеристикалары 140
6.4. Иш режиминин вә температурун биполјар транзисторун параметрләринә тә'сири 144
6.5. Биполјар транзисторун еквивалент схемләри вә параметрләр системи 148
7. Униполјар транзисторлар 156
7.1. p-n кечидли униполјар транзистор 156
7.2. МДЈ- транзисторлар 162
8. Тиристорлар 167
9. Јарымкечиричи фотоелектрон чиһазлар 172
9.1. Фотоелектрон шүаландырычы чиһазлар 172
9.2. Фотоелектрон шүагәбуледичи чиһазлар 179
9.3. Оптоелектрон чүтләри 195
10. Микроелектроника 202
10.1. Микроелектроника елементләри 203
10.2. Интеграл микросхемләрин тәснифаты 206
10.3. Јарымкечиричи интеграл микросхемләрдә елементләрин һазырланмасы 210
10.4. Һибрид интеграл микросхемләрдә елементләрин һазырланмасы 218
11. Вакуумлу вә плазмалы електрон чиһазлары 225
11.1. Електровакуум чиһазлары 226
11.2. Електрон-шүа чиһазлары 237
11.3. Газбошалмалы (ион) чиһазлары 243
11.3.1. Мүстәгил бошалмалы ион чиһазлары 249
11.4. Вакуумлу лүминессент индикасија елементләри 254
11.5. Вакуумлу көзәрдилән индикасија елементләри 255
11.6. Вакуумлу вә газбошалмалы фотоелектрон чиһазлары 257

Әдәбијјат 262

Редактору: X.Һачы Һәсәноғлу
Техники редактору: Р.Һачыјев
Корректору: А.Һачыјев
Компүтер тәртибчиси: Н.Нағыјева
Јығылмаға верилмиш 02.*03. 2000.* Чапа имзаланмыш *02.05.2000.*
Шәрти чап вәрәги 16,7. *Сифариш № 467.*
Кағыз форматы 60х841/16. **Тираж 500**. *Гијмәти мугавилә илә.*

Китаб «Нурлан» нәшријјатында һазыр диапозитивләрдән чап олунмушдур. Мүәссисәнин директору Н.Б.Мәммәдли.
Үнван: Бакы 48, Гарачухур гәс. Гумлуг күч.69.