

**M. Serginow**

# **FIZIKI ELEKTRONIKA**

**Ýokary okuw mekdeplerniň talyplary üçin okuw  
gollanmasy**

Türkmenistanyň Bilim ministrligi tarapyndan hödürlenildi

**Aşgabat 2010**

**UOK 621.31**

**S.15**

**M.Serginow.**

**S19** Fiziki elektronika. Ýokary okuw  
mekdepleriniň talyplary üçin okuw gollanmasy -

**Elektronika** ylmyň we tehnikanyň iň çalt ösýän ugurlaryň biridir. Ol dürli elektron abzallaryň gurluşynyň prinsipini, işleýşini we ulanylyşyny öwrenýär. Fiziki **elektronika** wakuumda, gazlarda we ýarym geçirijilerde, wakuum ýa-da we gaty jisim ýa-da suwuk jisimleriň arasynda üst araçäkde bolup geçýän elektron we ion prosessler degişlidir.

Elektronika *tehniki* we *senagat elektronikasy* atlandyrylýan iki bölümden ybaratdyr. *Tehniki elektronika* tehnikada ulanylýan abzallaryň gurluşyny öwrenýär.

Senagat elektronikasy senagatda ulanylýan abzallaryň gurluşyny öwrenýär.

Elektronikanyň ösmegi radiotehnikanyň kämilleşmegine getirýär. Bu ugurlaryň ösüşi özara baglanyşylyklydyr. Şol sebäbe görä köplenç ugurlara bilelikde **radioelektronika** hem diýilýär. Elektron abzallar radiotehniki gurluşlaryň esasy elementi bolup, radioappaturalaryň iň ähmiýetli parametrlerini kesgitleýär. Ikinji tarapdan bolsa radiotehnikanyň ylmy amaly gazananlary täze elektron abzallarynyň döredilmegine getirdi. Bu abzallar radioaragatnaşykda, telewideniýede, ses ýazgyda, radiolokasiýada, radionawigasiýada, radioteledolandyryşda we radiotehnikanyň dürli ugurlarynda ulanylýar. Şunuň bilen birlikde, **elektronika** häzirki zaman ylmyň, tehnikanyň,

senagatyň, ähli pudagyna aralaşdy. Elektron abzallar awtomatikada, telemekanikada, simli aragatnaşykda, sesli kinoda, atom we raketa tehnikada, astronomiýada, meteorologiýada, geofizikada, medisina, biologiýada, fizikada, himiýada, metallurgiýada, maşyn gurluşykda, ölçeg tehnikasynyň dürli ugurlarynda ulanylýar.

Elektronikanyň ösüş progressi kibernetikanyň ösmegine itergi berdi. Bu ylym dolandyryş we janly organizmde bolup geçýän hadysalary öwrenýär. Mundan başgada çalt hereket edýär elektron hasaplaýyş maşynlaryň döredilmegine getirdi. Elektron apparaturasyz emeli hemralaryň kömegi bilen kosmos barlaglaryny geçirmek mümkin däl (raketalaryň, kosmiki gämileriň we awtomatiki planetaara stansiýalaryň kömegi bilen).

Elektron gurluşlaň dürli ylmy barlaglary we ölçegleri geçirmäge mümkinçilik berýär. Elektron usuliteller, generatorlar, göneldijiler, ossilograflar, ölçeg abzallar we beýleki gurluşlar önümçilik prosessde kuwwatly serişde bolup hyzmat edýär (ylmy barlaglarda olaryň ýoly has-da ýokarydyr). Elektronikanyň usuly tebigatda bar bolan köp maddalaryň häsiýetlerini öwrenmekligi has ýokary derejede gowulyndyrdy, materiýanyň gurluşyna çuň anyk ýetirmek we material dünýäniň kanunlaryna dogry düşünmeklige ýardam berdi.

Ýarymgeçiriji lazerlerde wolnowodyň galyňlygy we ini hem-de şöhlelenýän ýagtylygyň tolkun uzynlygy bilen şeýle baglansyk bar:  $d < \lambda < \omega$ . Difraksiýa hadysasy esasynda, ýagtylyk akymy, wolnowodyň gapdal üsti näçe kiçi bolsa, şonçada köp ýaýraýar. Köplenç gorizonta ugur boýunça ýaýrama burçy  $\theta = 15^\circ$  we wertikal  $\theta = 30^\circ$ . Gaz lazerleri bilen geňşdirende bu burç gaty ulydyr.

Optiki süýümiň girişinde şeýle şöhläni, ýagny ýarymgeçiriji lazeriniň uly burç boýunça ýaýran şöhlisini, fokuslemek gaty gynçylyk döredýär. Şol sebäpli hem köplenç, şöhläniň parallelligini gazanmak üçin öz-özünde fokuslenýän ulgam, ýa-da steržen görnüşli linzalar peýdalanylýar.

GaAsP ýarymgeçiriji materýallaryndan taýýarlanylýan gowy häsiýetnamaly lazerler üçin porog toky 10-30mA ýetýar. Lazer diodlarynyň çykýan şöhlelenmäniň kuwwaty komnat temperaturasynda 1-10mVt töweregi bolýar. Süýümli optikada peýdalanylýan lazerleriň kuwwaty 10 mVt-dan pes bolmasa gowy bolýar. Häzirki wagtda, GaAlAs lazerlerin kuwwaty 200mVt çenli ýetirilip, kuwwatlylygy 2,6 Vt bolan 40 özara baglanşykly wolnowotdan düzülen lazer matrisasy döredildi. Lazer sohlesiniň kuwwatynyň lazer diodindan akyp geçýän toguň ululygyna bolan gatnaşygyna, lazeriň peýdaly täsir koeffisiýenti diýilip, 10% töweregidir. Şeýle PTK, ýokary effektiwligi bolan CO<sub>2</sub> lazerleriň PTK-ti bilen deňiräkdir.

Haçanda inžektirlenen fotonlaryň sany bilen ýüze çykýan fotonlaryň sanynyň gatnaşygynyň 40-60% ýetýänligini göz önünde tutsaň, ýarymgeçiriji lazerleriň effektiwliginiň ýokarlanmaga mümkinçiligi bardyr.

Lazer şöhlesiniň esasy häsiýetnmalarynyň biri onuň şöhlesiniň dargama burçydyr. Şöhläniň ikinji bir häsiýetnamasy, olam kese kesik boýunça şöhläniň akymynyň paýlanysy bolup, ol rezonatoryň gapdal üstünde şöhläniň kuwwatynyň paýlanysyny görkezýär. Ýene esasy häsiýetnamalaryň birisi, olam bir ugra gaty kiçi burç bilen gönükdirilmegidir.

## **Fiziki elektronikanyň ylymda we tehnikada tutýan orny we onuň halk hojagynda ähmiýeti**

Geçen asyryň 30-njy ýyllaryndan başlap **ýarymgeçiriji elektronikanyň** intensiw ösüşi başlanýar Sankt-Peterburgyň Fiziki-Tehniki institutyň alymlarynyň ýarymgeçirijileriň nazaryýetine we amaly taýdan ulanylyşyna örän uly goşant goşdylar Alymlar ýarymgeçirijilerde bolup geçýän hadysalary, ol hadysalara garyntgylaryň täsiri, termoelektriki, fotoelektriki häsiýetlerini öwrenip, ýarymgeçiriji abzallaryň kömegi bilen üýtgeýän togyň göneldişine üns beripdirler. Bu tejribeleriň hemmesi akademik A.F.Ioffäniň ýarymgeçirijiler hakyndaky nazaryýeti doly suratda subut etdi. ýeti doly suratda subut etdi. A.I.Frenkel. L.D.Landan, B.I.Dawydow ýarymgeçiriji ýagtylandyrylanda EHG-iň ýüze çykmagynyň nazaryýetini ýarymgeçiriji termoelektriki batareýalar taýýarlanylady we elektronikada giňden ulanyldy. Soňra termoelektrogeneratorlar, gün batareýalarynyň döredilmegine getirdi. Ýarymgeçiriji ylmyň nazaryýetini döretmekde we onuň esasynda abzallary taýýarlamakda akademik A.F.Ioffä 1961-nji Linin baýragy berilýär.

1972-nji ýylda **W.M.Tučkewiçiň** ýolbaşçylygynda alymlaryň bir toparyna gurluşy boýunça dürli bolan **geterogeçiriji** ýarymgeçiriji

abzallary döredenligi üçin Lenin baýragyna mynasyp bolýarlar. Bu uly ylmy we praktiki ugurda esasy rol akademik **Z.I.Algýorowa** degişlidir, Tehniki ýarymgeçiriji abzallaryň ösüşine häzirki wagtda uly üns berilýär.

Fiziki elektronika häzirki zaman ýarymgeçiriji elektronikany, elektrowakuum abzallary, mikroelektronikany, krioelektronikany, akustoelektronikany, kwant elektronikany, optoelektronikany we başgalary öz içine alýar.

Elektronikada ýarymgeçiriji abzallar köp ýyllaryň dowamynda **elektronika** tutuşlaryň electron we ion elektrowakuum abzallaryň ösüşi bilen bagly bolupdyr. Emma soňky ýyllarda häzirki zaman elektronikanyň hemme ugurlarynda esasy abzallar ýarymgeçirijilerden taýýarlanylýar.

Tehniki ýarymgeçirijileriň abzallary elektronikanyň in ähmiýetli ugry bolup galdy. Elektron lampalaryň ýarymgeçiriji abzallary bilen çalşyrylmagy radiotehniki gurluşlarda örän ýokary derejede amala aşyryldy. Senagat köp sanly ýarymgeçiriji abzallary öndürýär.

Radiotehnikanıň bütin ösüş prosesinde kristallik detektorlary giňden ulanyldy. Bu defektorlar **ýarymgeçiriji diodlar** bolup, ýokary ýygyllykly tok üçin niýetlenendir. Üýtgeýän togy **göneltmek** üçin kuporosly we selenli ýarymgeçiriji **göneldijileri** ulanylýar. Emma ýarymgeçiriji göneldijileriň we

almaklyk mümkin däl, şu günki gün ýetilen dereje 2 mkm – den ýokarydyr.

Kese modalaryň birden artyk generirlenmezligi üçin, köplen refraksion wolnowod ulanylýar.

Lazeriň wolnowody x-oky boýunça hem döwürleme gorkezijisi üýtgeýän edip konstruirlenýär. Gaty güýçli wolnowod effekti esasynda, lazerde diňe in pes kese moda generirlenýär. Praktikada köplenç şeýle lazerler peýdalanylýar. Refraksion wolnowodly lazeriň boý tolkunly modasynyň spektri ulanylýar.

Refraksion wolnowodly lazerlerde, üznüksiz şöhlelenmede bir modaly boý tolkunly şöhlelenmäni almaklyk gaty aňsat, emma, gaty ýokary mdulýassiýa wagtynda köp modaly generassiýa ýüze çykyp bilýär. Boý tolkunıň generirlenmesinde köp modaly şöhlelenmäniň ýüze çykmazlygy üçin, ýörite konstruksiýa peýdalanylýar.

Adaty Fabri-Pero rezonatorlaryndan tapawutly, boý tolkunıň belli bir modasy üçin az ýitgili rezonatoryň döredilmegi ýerlekli bolup, şeýle meselaniň çözgüdini ýeňilleşdirýär. Başga söz bilen aýdanda rezonatorda şöhlelenmäniň dine belli bir modasy güýçlenip, şol moda üçin ýokary dobrotnost bolmatydyr.

Lazer rezonatorlarynda şöhläniň generirlenmesiniň porog toky, rezonatordaky ýitga, aktiw gatlagıň galyňlygyna we birnäçe başda esasy konstruktiv häsiýetnamalara baglydyr. AlGaAs we

$$\frac{S}{S} = \frac{2I_f^2 M^2}{2e(I_f + I_s)M^2 M^x B + 2eBI_y + 4kTFB/R_c}$$

(20.3)

Bu ýerde  $M^x$ -artykmaç şumyň koeffisiýenti (lawina fotodiodynyň gurluşy bilen kesgitlenilýär). Iý-ýaýraýan toguň ulylygy, p-n-geçişiň daş-töwereginden togyň geçişi bilen kesgitlenilýär. Iý-togy p-n-geçişden geçmänligi sebäpli ters naprýaženiýanyň hasabuna güýçlenmeýär. Maýdalowjynyň üçünji goşulyjysy ýylylyk şumyny kesgitleýär.

Lawina fotodiodlary gaty ýokary duýujylykly we çaltlykly häsiýetnamalary boýunça in bir gowy fotoditektorlardyr. Emma bularyň durnukly işlemegi üçin gaty ýokary durnuklylygy (stabilizasiýasy) bolan ters naprýaženiýanyň çeşmesi zerurdyr. Bu ýagdaýlary göz önünde tutanda p-i-n-fotodiodlary ýörite güýçlendiriji bilen ulanmaklyk gaty amatlydyr.

Wolnowodlaryň teoriýasyna laýyklykda, haçanda aktiw gatlagyň döwülme görkezijisi  $n_1$  we ony gurşap alan daşky gatlagyň döwülme görkezijisi  $n_2$  bolup, olaryň arasyndaky otnositel tapawut  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 = 0,08$  bolsa, diňe bir pes tertipli kese modanyň generirlenmegi üçin şeýle şert ýerine ýetmeli:  $d < 0,45$  mkm we  $\omega < 0,45$  mkm. Ýarymgeçiriji lazerlerde aktiw gatlagyň galyňlygyny  $d \approx 0,1 - 0,2$  mkm alyp bolýar, emma  $\omega < 0,45$  mkm

kristallik detektorlaryň işleýiş prinsipi köp wagtlaýdyň bolmandyr.

Ýarymgeçiriji abzallar elektron lampalar bilen deňeşdirilende artykmaçlygy örän ulydyr. Olar aşakdakylardan ybaratdyr: Ýarymgeçiriji gurluşlaryň massasy we ölçegi örän kiçidir; Olar iş režiminde energiýanyň üýtgenegine durnuklydyr we ulanyş möhleti köpdür (takmyn 10 mün sagatdan hem ulydur); ýarymgeçiriji abzallaryň peýdaly täsir koeffisiýentri elektron lampalaryňka garanynda has ýokarydyr; ýarymgeçirijileiň mikroelektron abzallarynda ulanylmak çägi elektron lampalaryňkydan has giňdir.

Şunuň bilen birlikde ýarymgeçiriji abzallar birnäçe kemçiliklere hem eýedir. Berlen abzalyň aýratyn görnüşinde ýarymgeçirijileriň parametrleri we häsiýetnamalary olaryň baglylyk kanunalaýyklyklaryndan belli bir derejede gyşarma eýedir;

ýarymgeçirijileriň fiziki häsiýetleri we parametrleri olaryň temperaturasyna örän baglydyr;

Birnäçe ýarymgeçiriji abzallaryň häsiýeti we parametri wagtyň geçmegi bilen erbetleşýär, meselem ýarymgeçiriji tranzistorlarda wagtyň geçmegi bilen goşmaça zyýanberiji sesler döreýär; tranzistorlaryň birnäçe görnüşleri ýokary ýygýlykly elektrik signallarynyň zynjyrynda işläp bilmeýärler;

Giriş garşylygy köp tranzistorlarda elektron lampalar deňeşdirilende kiçidir.

Tranzistorlaryň peýdaly kuwwaty elektrowakuum abzallaryňkydan häzirlilikçe kiçi ionizirleýji şöhläniň täsiri astyndas birnäçe ýarymgeçiriji abzallaryň işleýşi peselýär.

Häzirki wagtda ýarymgeçiriji abzallaryň işleýiş prinsipini gowylandyrmak barada uly işler alnyp barylýar. Bu ýerde bir zady belläp geçmeli, ýagny ýarymgeçiriji abzallary döretmekde täze materiallary ulanylmaly.

Häzirki wagtda tranzistorlar usulitellerde (güýçlendirijilerde), kabul edijilerde (priýomniklerde, generatorlarda, telewizorlarda, ölçeg abzallarda, impuls shemalarda, electron hasaplaýyş maşynlarynda, kopmýuter tehnologiýasynda giňden ulanylýar.

Ýarymgeçiriji abzallar iýmitlendiriji çeşmelerde (istoçnik pitaniýa) köp energiýany tygşytlamaga we olaryň ölçegini we apparaturalaryň agramyny kiçektämäge mümkinçilik berýär. Elektron lampany iýmitlendirmek üçin minimal kuwwat 0, st wt, emma tranzistory işletmek üçin 1 mk Wa, ýagny 100.00 esse az egergiýa talap edýär.

Kremniý ýarymgeçiriji plastinkasynda döredilen ýarymgeçiriji integral mikroshemada meýdany birnäçe inedördül (kwadrat) millimeter bilen 1000 gowrak tranzistorlar ýerleşýär. Şeýle mikroshemalaryň

meýdanynyň täsiri esasynda, täze ýüze çykýan elektronlar öz gezeginde ýenede täze elektronlary ýüze çykaryp bu hadysa dowam edýär. Şeýlelikde bir fotondan birnäçe ýüzlerçe elektronlar emele gelýär. Lawina fotodiodlarynyň güýçlendiriş koeffisiýenti elektronlaryň sanynyň köpelişi bilen kesgitlenýär.

Kremniý esasynda döredilen lawina fotodiodlaryň güýçlendiriş koeffisiýenti, haçanda ters naprýaženiýanyň ululygy 100-150 V bolanda,  $M \approx 1000$  bolýar. P-i-n-fotodiodlara seredende lawina fotodiodlarynda  $I_f$  fototok  $M$  gezek ulydyr.

Emma lawina fotodiodlarynyň ýokary çaltlygyny çäklendirýän birnäçe faktorlar (şertler) bar: 1) diodyň wagt hemişeligi ( $R_C C$  – çykyş garşylygy bilen geçiş sygymyň köpeltmek hasyly); haçanda  $C=1,5$  pF,  $R_C=50$  Om bolsa wagt hemişeligi 75 ns deňdir; 2) zarýadyň diffuziýa zonasynda hereket wagty, 100 ns töweregi; 3) lawina boýunça güýçlenmäniň bolýan wagty, haçanda  $M=100$  bolsa ol 100 ns deňdir.

Bu ýokarda sanalynan wagtlaryň hemmesi bilelikde, fototogyň ýüze çykyş wagtyny berýär. Bu ýagdaý üçin fototogyň ýüze çykyş çaltlygy  $1 \div 2$  GGs bolýar.

Lawina fotodiodlarynda signal-şum gatnaşygy şeýle kesgitlenilýär,



$$\frac{S}{S} = \frac{2I_f^2}{2e(I_f + I_s)B + 4kTFB / R_g} \quad (20.2)$$

bu ýerde  $I_s$  – doýgun tok (temnowoý tok),  $B$  – ölçeğiň ýygylýk giňligi, fotopriýomnikden soňky birinji güýçlendiriji kaskadyň giriş garşylygy,  $F$  – bu kaskadyň şumynyň koeffisiýenti.

Haçanda, signal we şum gatnaşyklary  $S/\Sigma = 1$  şert ýerine ýetlendäki fotopriýomnikiň duýujylygy 0,5 mK deňdir. P-i-n-fotodiodlaryň duýujylygyny we çaltlygyny ýokarlandyrmaklyk üçin, ters naprýaženiýanyň ululygyny artdyrmaly, onuň üçin hem köplenç göwrüm zarýadynyň gatlagy giňeldilýär.

Lawina fotodiodlarynda fototogyň güýçlendirilmesi ýüze çykyp, bu bolsa öz gezeginde fotodiodyň ýokary duýgurlygyny we çaltlygyny kesgitleýär. Şol sebäpli hem, lawina fotodiodlary ilki başda optiki aragatnaşyk we gaty gysga ýagtylyk signallaryny ölçemeklige niýetlenendir.

Ters naprýaženiýanyň artmagy bilen, birbada göwrüm zarýadynyň giňelmesi emele gelip, p-n-geçişiň ýakynynda ýokary elektrik potensialy gatlak (100 kV/sm) emele gelýär. Diffuziýa elektronlary, ýokary elektrik meýdanly gatlag aýytip neýtral atomlar bilen çaknyşyp olary oýandyryýar we olardan erkin elektronlary emele getirýär. Gaty ýokary elektrik

esasynda özünde million element saklaýan elektrohasaplaýyş maşynlar gurulan.

Tranzistorlaryň kömegi bilen miniatýur radiopriýomnikler we radiodatçikler işleýärler. Şular ýaly miniatýura ýarymgeçiriji abzallar transistor bilen ylmyň we tehnikanyň hemme pudagynda ulanylýar.

Soňky ýyllarda ýarymgeçiriji elektronikanyň ösüşi örän depgin bilen geçýär. Bu ugryň ösmeginde täze ýarymgeçirijileriň açylmagy we olaryň esasynda dürli-dürli strukturalaryň döredilmegi ýarymgeçiriji elektronika fiziki elektronikalider bolup durýar.

Miniatýur electron gurluşlaryň ýüze çykmagy täze electron ýarymgeçiriji abzallara baglydyr. Ýarymgeçiriji elektronikanyň wakuum elektronikasýndan tapawudy onuň durnuklylygy we ministýurlygy. Kwant kanunlaryň esasynda ön belli bolmadyk abzallar döredildi. Ol abzallaryň aglabasy ýarymgeçirijileriň araçäginde, ýagny dürli tip geçirijilikli arasynda bolup geçýän effektlere esaslanandyr. Şeýle araçäk electron-deşikli ýa-da p-n geçiş diýilýär. Elektron-deşik geçiş efektine birnäçe diodlaryň işleýşi esaslanandyr; göneldiji we stabizirleýji naprýeženiýany, ýokary ýygylýlyk yrgyldyny generirleýän (dörediji), goýberýäk we kabul ediji ýagtylyk şöhle, atom radiasiýany registrirleýän diodlar.

Ýarymgeçiriji materiallaryň klasy örän giňdir. Ýarymgeçiriji materiallar kristallik, amorf we suwuk

ýagdaýda bolup biler. Nähili halda az daşary “güýjiň täsiri astynda olaryň häsiýetleri güýçli üýtgeýär”.

Diýmek, bu häsiýetler ýarymgeçiriji materiallar beýleki materiallardan tapawutlanýar. Ýarymgeçiriji häsiýete 9 topar birleşmeler eýe bolýarlar:  $A^I B^{VII}$ ,  $A^2 B^6$ ,  $A^3 B^5$  we ş.m. Soňky ýyllarda elementden ybarat bolan ýarymgeçiriji materiallar alnan. Olaryň umumy simwolikasy  $A^2 B^4 C_2^5$  (Zn Si P<sub>2</sub>, Cd Si P<sub>2</sub>, Cd Si P<sub>2</sub>, CdGe As<sub>2</sub> we ş.m.). Birnäçe ýagdaýda ýarymgeçiriji häsiýete olaryň arasynda emele gelýän gaty erginler hem eýe bolýarlar, mysal üçin Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub>, ýa-da erginiň komponentiniň. Bolup geçýän açyşlara syn etsek, ýarymgeçiriji elektronkanyň fiziki elektronika goşandy ägirt ulydyr.

Geçen asyryň 60-njy ýyllaryndan başlap täze tipli ýarymgeçiriji materiallar açyldy. Bu ýarymgeçirijiler biziň belläp geçişimiz ýaly  $A^2 B^4 C_2^5$  üçleýän ýarymgeçirijiler diýilýär. Bular elementar we binary ýarymgeçirijilerden tapawutlylykda anizotropiýa häsiýete eýe bolýarlar, ýagny kristallografik ugurlar boýunça olaryň fiziki häsiýetleri dürlidir. Şonuň üçin bu görnüşli ýarymgeçirijilere **anizotrop** ýarymgeçirijiler diýilýär. Elementar (Si, Ge) we binary (GaAs, GaP) ýarymgeçirijilere **izotrop** ýarymgeçirijiler diýilýär.

Şeýlelikde fiziki we tehniki ýarymgeçirijiler ugrunda täze ugur –anizotrop ýarymgeçirijileriň

Egerde p-n-geçişe ters ugra elektrik meýdany berilse, onda bu gatlakdan elektrik zarýadlary gidýär: elektronlar oňyn polýusa (n-gatlak) “çekilýärler”, emma deşikler – otrisatel polýusa (p-gatlak) “çekilerler”. Şeýlelikde, i-gatlakda zarýadlar gaty azalyp, garyplaşan zarýadly gatlak emele gelýär. Ters napryaženiýanyň täsiri esasynda p-n-geçişde ýokary elektrik potensialy ýüze çykýar. Haçanda daşdan ýagtylyk düşse, göwrüm zarýadynyň içinde elektronlar we deşikler emele gelip, daşky elektrik meýdanynyň täsiri esasynda elektronlar oňyn polýusa ýymtylyp, diffuziýa togyny dörederler. Şeýle, daşky meýdanyň täsiri esasyndaky zarýadlaryň çaltlanyp hereket etmegi, priboryň çaltlygyny artdyrýar. Ýagtylygyň düşmegi esasynda ýüze çykýan togyň ululygy şeýle formula bilen tapylýar:

$$I_f = e\eta P_f / h\nu \quad (20.1)$$

bu ýerde  $e$  – elektrik zarýady,  $P_f$  – düşýän ýagtylygyň kuwwaty,  $h\nu$  – fotonyň energiýasy,  $\eta$  – kwant effektiwligi (emele gelýän elektronlaryň sanynyň fotonyň sanyna bolan gatnaşygy).

Fotodiodlardaky hakyky signalyň şuma (galmagal) bolan gatnasygy

generirlenýär. Kese (popereçnyý) tolkunlaryň modalarynyň generirlenmegi bilen porog tokuň bahasy ýokarlanýar, ýagtylygyň generirlenmeginde durnuksuzlyk ýüze çykyp, modulýasiýa häsiýetnamasy erbetleşýär, şol sebäpli hem kese tolkunlaryň in pes derejeli diňe bir modasynyň generirlenmegi ýerliklidir. Şeýle netijäni, ýagny kese modalaryň diňe pes modasyny generirlenmegini, wolnowod görnüşli rezonatoryň kese kesiginiň meýdanyny kiçeltmek bilen gazanmaklyk mümkin. Şeýle modalaryň generirlenmesini basyp ýatymaklygyň mümkinçiligine, kese modalary urukdyrmagyň tehnikaýy diýilýär.

### 6.10 Optiki süýüminiň gurluşy

Süýümlü optikanyň datçikleri üçin peýdalanylýan ýagtylyk duýujy priborlar, birnäçe talaby ödemelidirler: birinjiden olar gaty kiçi ölçegli bolmalydyr we energiýany az harç etmeli hem-de ýokary duýujylykly we utgaşma wagty gaty kiçi bolmalydyr. Şeýle ýagtylyk duýujy priýomniklere p-i-n diodlar we lawina diodlary giýärler.

P-i-n-fotodiodlarda p-n-geçişiň ýakynynda garyndylaryň mukdary azaldylyp, elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy kiçi bolan hususy gatlak (i-gatlak) döredilýär.

**polýarizasion elektronikanyň** emele gelmegi amala aşyryldy.

**Polýarizasion elektronikanyň** ulanyş mümkinçiligi örän ulydyr, ýagny optotron jübtleri (pary) döretmek üçin informatiw parametr hökmünde ýagtylygyň intensiwligi bilen birlikde şöhlelenmäniň polýarizasiýasyny hem ulanmak mümkinçiligi bar. Bu bolsa süýmlü optiki aragatnaşygyň informasiýanyň sygymynyň potologyny has ýokary galmagy itergi berer. **Polýarizasion ýarymgeçiriji elektronikanyň** mümkinçiligini dürli polýarimetriki sistemalara ýaýradylmagy özünde artykmaçlygy saklaýandygy gürrüňsizdir. **Polýarizasion ýarymgeçiriji elektronikanyň** emele gelmeginde Ž.I.Alfýorowyň işlerine esaslanan **geterogurluşly elektronika** fundamental rol oýnady. Hakykatdanam, anizotrop ýarymgeçirijileriň esasynda döredilen geterogurluşlaryň netijeleri polýarizasion fotoduýgurlygyň record parametrlerini almaklygy üpjün etdi.

Diýmek,  $A^2B^4C_2^5$  üçleýin ýarymgeçirijileriň esasynda döredilen fotodetektorlaryň emele gelmegine çenli esasy üç sany ýarymgeçiriji elektronikanyň ugruna: elektroözgerdiji, fotoelektroözgerdiji we lýuminessentnyý elektronikalar (bu üç ugur esasanam izotrop Ge, Si, GaAs we ş.m. kristallaryň esasynda taýýarlanylýan) dördünji ugur goşulýar – **polýarizasion ýarymgeçiriji elektronika**. Bu ýerde bir ýagdaýy

belläp geçmeli, ýagny polýarizasion elektronika funksional gatnaşykda mümkinçiligini birleşdirýär we täze dördünjisi goşulýar. **Polýarizasion elektronikada** üçleýin  $A^2B^4C_2^5$  ýarymgeçirijiler bilen beýleki  $A^3B^5$  ýarymgeçirijiler (üçleýin  $A^2B^4C_2^5$  ýarymgeçirijileriň electron we struktura analogy) konkurensiýa edip bilmeýär.

Bu deňlige şöhläniň ýygylgy üçin Boryň şerti diýilýär. Bu ýerde,  $c$  – ýagtylygyň wakuumdaky tizligi,  $E_g$  – gadan zonanyň giňligi,  $\lambda$  – ýagtylyk şöhlesiniň tolkun uzynlygy.

Ýarymgeçiriji geterostrukturadan taýýarlanýan lazeriň rezonatorynyň uzynlygy 300 mkm. Başga bir tarapdan seredende, aktiw gatлага inžektirlenen zarýadlaryň diffuziýa aralygy 1-2 mkm-dan geçmeýänligi sebäpli, aktiw gatlagyň galyňlygy şondan galyň bolmaly gäl. Ondan başgada, kese modalaryň diňe pes derejelisi generirlener ýaly d mümkin boldugyndan ýuka alynýar, köplenlenç ~0,1 mkm.

Aktiw gatlagyň ini  $x$  okunyň ugryna ( $\omega$ ) hem gaty kiçi bolýar, sebäbi injektirlenen elektronlary şol ýerde gäbamaklyk, generirlenmäniň effektiwligini artdyrýar. Şeýlelikde, elektron lazer diodynyň göni burçly rezonatoryň içinde gabalýar. Rezonatoryň kese kesiginiň ölçegleri,  $x$  we  $y$  oklar boýunça degişlilikde  $\omega$  we  $d$  bolýar.

Şeýlelikde ikigatlakly geterostrukturada aktiw gatlag optiki süýüme meňzeş bolup, onda ýagtylyk şöhlesi wolnowoda meňzeş generirlenýär. Aktiw gatlagda ýagtylyk şöhlesini saklamaklyk koeffisiýenti bary-ýogy 0,2 bolsa, lazer generasiýasynyň ýüze çykmagy üçin ýetikdir.

Ýarymgeçiriji lazerlerde birnäçe kese moda generirlenýär, ondan başgada dürli dik (boý) modalar

wagtlarynyň arasyndaky tapawut, kritiki (çäk) burçyny  $\psi_k = \cos^{-1}(n_2/n_1)$  hasaba alyp şeýle ýazylýar.

$$\delta\tau = \frac{n_1 L}{c} \left( \frac{1}{\cos \psi_k} - 1 \right) \approx \frac{n_1 L}{c} \cdot \Delta,$$

(19.7)

bu ýerde  $L$  - suýumiň uzynlygy. Bu ýerden, başgaçakly köp modaly süýümden göýberilip boljak ýygylýgyň aralygy (giňligi)  $B$  şu aşakdaky deňlikden tapylýar:

$$BL = \frac{L}{\delta\tau} = \frac{c}{n_1 \Delta}$$

(19.8)

Haçanda,  $\Delta = 1\%$ ,  $n_1 = 1,47$  diýip alsak onda  $BL = 20$  MGs·km bolýar.

Lazerleriň esasy aýratynlygy, olam, lazer kogerent şöhlelenmäniň çeşmesi bolup, ýagtylyk şöhesi diňe bir öz-özünden şöhlelenmäniň esasynda ýüze çykman, indusirlenen (daşky täsir esasynda) şöhlelenmäniň esasynda generirlenýär. Bu ýagdaýda, geçiş zonadaky erkin elektronlara ýygylýgy  $v \sim v_0$  bolan ýagtylyk şöhesi täsir etse, onda düşýan ýagtylyga goşmaça, ugry boýunça gabat gelýän,  $v_0$  ýygylýkdaky şöhlelenme ýüze çykýar.

$$v = c/\lambda = E_g/\hbar \quad (19.9)$$

## 1. ÝARYMGEÇIRIJI ABZALLARYŇ FIZIKI ESASLARY

### 1.1 Gaty jisimlerde energetiki zonalar we erkin zarýad äkidijiler

Ýarymgeçirijiler fizikasynyň fursundan belli bolşy ýaly, kristallik gaty jisimlerde elektronlaryň ygtyýar edilen bahaly energiýalaryň kwaziüznüksiz zonalar bar. Absolýut nul temperaturada ýokary ygtyýar edilen zona tutuşlaýyn doldurylar we walent zona diýip atlandyrylýar. Bu zonanyň ýokarsynda ýerleşen indiki ygtyýar edilen absolýut nul temperaturada boş ýa-da bölekleyin elektronlar bilen doldurylan –geçiriji zona diýip atlandyrylýar. Arassa ýarymgeçirijilerde we dielektriklerde  $T = 0K$  geçiriji zona boş we geçirijilik ýok, sebäbi elektriki meýdanyň täsiri hereket edip biljek erkin elektronlar ýok.

Atomlaryň ýylylyk hereketiniň täsiri astynda elektronlaryň uly bolmadyk mukdary walent zonadan geçiriji zona geçýärler emma walent zonada şonça mukdarda energiýanyň eýelenmedik derejeleri ýüze çykýar. Takmynan doly eýelenen walent zonanyň köp sanly elektronlaryň toplumynyň hereketi polozitel zarýadly bölekler- deşikleriň hereketine – ekwiwalentdir, olaryň sany elektronlar tarapdan eýelenmedik energetiki derejeleriň sanyna deňdir.

Deşikler geçiriji zonanyň elektronlary bilen birlikde erkin zarýad äkidijilerdir.

Birwagtyň özünde atomlaryň ýylylyk yrgyldylarynyň täsiri adtynda erkin elektronlaryň we deşikleriň emele gelmek prosesine elektron-deşikler jübtiň ýylylyk generasiýasy diýilýär. Ýylylyk generasiýasy bilen birlikde ters proses bolup geçýär. Oňa elektronlaryň we deşikleriň rekombinasiýasy diýilýär, geçiriji zonanyň elektronlary walent zonanyň eýelenmedik energetiki derejelerine geçýärler. Bu ýagdaýda elektronlar we deşikler edil erkin zarýad äkidijiler ýaly ýok bolýarlar (elektronlar bagly ýagdaýa geçýärler). Deňagramlylykda iki proses hem ortaça biri-birini kompensirleýärler we elektronlaryň, deşikleriň deňagramlyk konsentrasiýasy döreýär.

Temperaturanyň ösmegi bilen elektronlaryň we deşikleriň sany köpeliýär, şonuň üçin ýarymgeçirijide garyntgy bolmadyk halda (hususy ýarymgeçirijide) udel garşylyk azalýar.

$$\lambda_k = \frac{2\pi}{v_k} \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}.$$

(19.6)

Haçanda ýagtylyk şöhlesiniň tolkun uzynlygy  $\lambda_k$ -den uly bolsa, onda optiki süýüm bir modaly režimde işleýär.

Adaty optiki süýümleriň tipiki görnüşleriniň shematik çyzgylary ulanylýar. Olary köp modaly optiki süýüme ( $v=30$ ) we bir modaly optiki süýüme ( $v<2,4$ ) bölüp bolýar.

Optiki süýümiň özeninde döwülme görkezijisiniň ( $n$ ) kese kesik boýunça üýtgeýşi boýunça köp modaly optiki süýüm iki görmüşe bölünýär: basgançakly we ýuwaş-ýuwaşdan (gradiýent) üýtgame. Süýümleriň bu iki görnüşiniň hem özeniniň diametri 50 mkm töweregi bolup, onüň döwülme görkezijisi daşky gatlagyňkydan 1% töweregi ulydyr. Köp modaly süýümlerde modanyň ýokarlanmagy bilen şöhläniň ýaýrama burçy  $\psi$  ulalýar. Döwülme görkezijisi basgançakly üýtgeýän süýümlerde ýagtylyk modasynyň ýaýraýyş tizligi.  $V_b = (c/n_1) \cdot \cos \psi$ , ýagny modanyň nomeriniň artmagy bilen onuň ýaýraýyş tizligi kiçelýär ( $c$  - wakuumda ýagtylygyň ýaýraýyş tizligi,  $\psi$  - gorizontal polýarlanan ýagtylyk şöhlesiniň süýümiň okyna görä düşüş burçy. Iň kiçi we iň uly modalaryň ýaýraýyş

Şöhläniň şeýle ýaýramasy modalar bilen häsiýetlendirilip, elektromagnit meýdanynyň ýaýraýyş tipi bilen kesgitlenilýär.

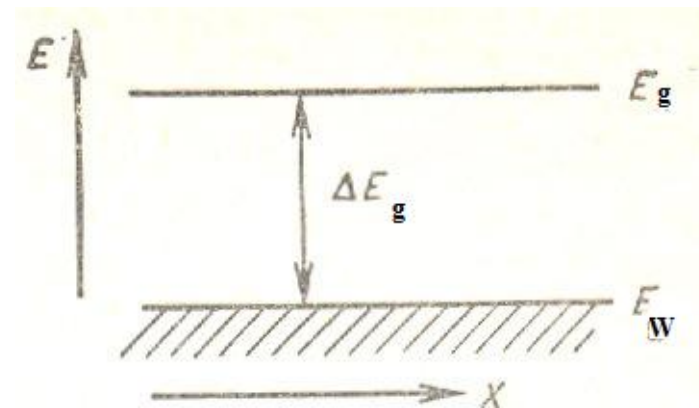
Optiki süýümler häsiýetlendirilende esasy häsiýetnamalaryň biri normirlenen ýygylýdyr. Normirlenen ýygylýgyň ulylygy boýunça bir süýmde näçe modanyň ýaýrap biljegi kesgitlenilýär. Normirlenen ýygylýk  $v$  ululyk bilen bellelinip, şeýle formula bilen hasaplanylýar:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a n_1 \sqrt{2\Delta},$$

(19.5)

bu ýerde  $a$  - süýümiň özeniniň radiusy,  $\lambda$  - tolkun uzynlygy.

Ýokarda seridilen optiki süýümlerde, ýagny ýagtylygyn döwürleme koeffiýenti basgançakly üýtgegyän ýagdaýynda  $v = v_k = 2,405$  araçäk ululykdyz ( $v_k$  - kesigiň normirlenen ýygylýgy). Eger-de  $v$ -niň hakyky bahasy  $v_k$ -dan kiçi bolsa onda bir moda ýaýraýar, eger-de  $v$ -niň bahasy uly bolsa onad birnäçe moda ýaýraýar. Şeýlelikde  $v_k$  süýmde bir modanyň bolmagynyň şertini, ýa-da ýokary modalaryň bolmagynyň çägin kesgitleýär, şonuň üçin kesigiň normirlenen ýygylýgy diýilip at berilýär. Kesigiň tolkun uzynlygynyň ululygy:



1.1-nji surat

1.1-nji suratda ýarymgeçirijiniň energetiki diagrammasy getirilen. Onda geçiriji zonanyň aşaky çägi (düýbi)  $E_n$  we walent zonanyň ýokary çägi (depes)  $E_a$  görkezilen.  $E_n$  we  $E_a$  energiýanyň derejeleriniň arasynda zonanyň elektronlaryň energiýasynyň gadagan edilen bahalarfy ýerleşen. Energiýalaryň tapawudy  $E_n - E_a$  gadagan zonadan ybaratdyr  $E_G$ . Gadagan zonanyň ini ýarymgeçirijileriň we dielektrikleriň in ähmiýetli elektrofiziki parametridir. Gadagan zonanyň ininiň ulalmagy bilen  $\Delta E_G$  elektron-deşik jübütiniň sany, şonuň bilen birlikde hususy ýarymgeçirijiniň geçirijiligi azalýar, emma udel garşylygy ulalýar. Gadagan zonanyň ini  $\Delta E_G \geq 3eW$  - dielektrikler diýilýär. Gadagan zonasynyň ininiň uly bolmagy sebäpli dielektriklerde erkin zarýad äkidijileriň

konsentrasiýasy dielektriklerde ýokary temperaturada hem ujypsyzdyr. Bu bolsa udel garşylygyň ýokary bolmagy bilen baglydyr  $\rho \geq 10^{10} \text{ Om} \cdot \text{sm}$ . Ýarymgeçirijileriň udel garşylygy gadagan zonanyň inine baglylykda  $\Delta E_G$  giň predellerde üýgäp biler ( $10^{-10} - 10^{-10} \text{ Om} \cdot \text{sm}$ ). Metallarda  $\rho < 10^{-10} \text{ Om} \cdot \text{sm}$  we aşak temperaturada  $T = 0K$  udel garşylygyň pes bahasy geçiriji zonada bölekleyin doldurylan erkin elektronlaryň bar bolmagy sebäpli saklanýar. Ýarymgeçiriji kristallarda erkin zaryad äkidijileriň hereketlerini beýan etmek üçin kwant mehanikanyň nazaryýetinde elektronlaryň we deşikleriň effektiv massa düşünjesini ulanmak bolar. Effektiv massalaryň bahalary düzgün boýunça, elektronlaryň wakuumdaky effektiv bahasy bilen gabat gelmeýär. Elektron abzallarda has giňden ulanylýan ýarymgeçirijilerde (krenniý, arsenid galliý, germaniý)  $m_p \geq m_n$ ;

Gaty jisimlerde elektronlar we deşikler erkin zaryad äkidijiler hökmünde kwaziimpuls  $P$  ululyk bilen häsiýetlendirilýär. Wakuumdaky elektronlardan tapawutlylykda  $E_n$  energiýanyň we kristallarda elektronlaryň kwaziimpulsynyň baglanyşygy  $E_n = P^2 / (2n)$  funksiýa bilen beýan edilmeyär.. Kristalyň anizotropiýasy sebäpli funksiýanyň görnüşi  $E_n(p)$  kristallografiki ugra baglydyr. Kristallografiki ugurlar

toweregidigini göz önünde tutsaň, onda  $\Theta_{\max}$  şeýle görmüşde aňladyp bolar.

$$\Theta_{\max} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (19.2)$$

Bu burç ( $\Theta_{\max}$ ) ýagtylygyň süýüme girip ýaýrap biljek maksimal burçdyr. Bu ululyga (burça) san aperturasy diýilip at berilip, NA bellik bilen belenilýär.

Optiki süýümlere seredilende, köplenç  $n_1$  we  $n_2$ -niň tapawudyna derek, basga bir ululyk, ýagny döwürleme koeffisiýentleriň otnositel tapawudy ( $\Delta$ ) ulanylýar:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (19.3)$$

Döwürleme koeffisiýentleriň arasyndaky otnositel tapawut köplenç prosentlerde aňladylýar. Mysal üçin, haçanda  $n_1=1,47$  we  $\Delta=1\%$  bolanda  $NA=0,21$  we  $\Theta_{\max}=12^\circ$ .

#### Modalar hakynda düşünje.

Optiki süýümiň içinde şöhle ýaýranda birnäçe gezek doly serpilmä sezewar bolýar. Emma süýümde şöhle diňe belli bir burçlar bilen ýaýrap bilýär.



duýujy (elementden) durýar. Süýümlü optika ylgamynyň düzüjilerine aýratynlykda seredip geçeliň.

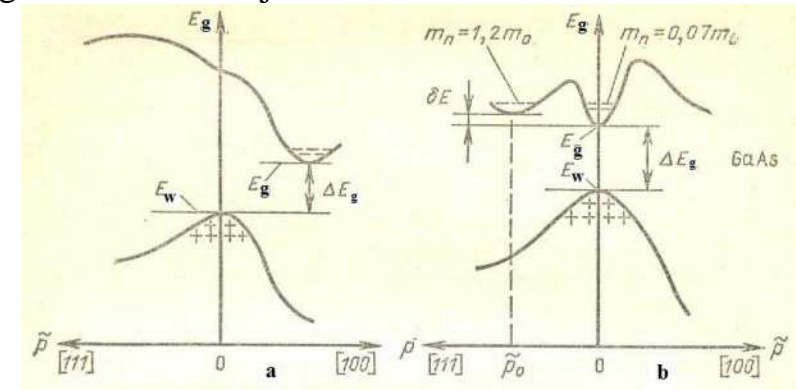
Öňki sapaklarda seredilen, ýagtylyk göýberiji elementler we fotokabuledijiler barada umumy düşünelere esasanyp, optiki süýümiň häsiýetnamalaryna seredip geçeliň. Optiki süýüm ýagtylygyň ýaýraýan özeninden we onuň daşky gatlagyndan-üst gatlagyndan durýar. Soňky öz gezeginde daşky gabyk bilen örtülip, örtük süýümi daşky täsirden gorayar, onuň mehaniki berkligini ýokarlandyrýar, şeýlelikde ony ulanmagy ýönekeýleşdirýär. Optiki süýümiň özeninde ýagtylygyň döwürleme koeffisiýenti  $n_1$ , üstki gatlagyň döwürleme  $n_2$  koeffisiýentinden ulydyr, şol sebäpli hem optiki süýümiň özenine girizilen ýagtylyk şöhesi, üstki gatlagyň araçäginden doly serpilip, diňe özen boýunça ýaýaraýar.

Haçanda ýagtylyk süýüme  $\Theta$  burç bilen girýän bolsa, ýagtylyk şöhesiniň özen bilen daşky gatlagyň araçäginden doly döwürlemegi üçin, şeýle şert ýerine ýetmelidir.

$$0 \leq \Theta \leq \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \Theta_{\max} \quad (19.1)$$

Eger-de süýümiň özeni bilen üstki gatlagyň döwürleme koeffisiýentleriniň tapawutlarynyň 0,01

we olara perpendikulýar tekizlikler üçbelgili Milleriň indeksi bilen belgilenýär, deňşililikde kwadrat ýa-da tegelek skobkalarda bellenýär, mysal üçin, [100] we [111] we ş.m.  $E_n(p)$  baglanyşygyň mysallary kremnide (a) we arsenidgalliýde (b) [100] we [111] kristallografiki ugurlar üçin 1.2-nji suratda görkezilen. 1.2-nji surat.



1.2-nji surat

Ýokary egriçyzyklar geçiriji zonada elektronlaryň energiýalaryna deňşlidir, aşakylar-onuň walent zonan energiýasyna. Geçiriji zonada absolýut energiýanyň minimumy  $E_n$  zonanyň düýbüniň ýagdaýyny maksimum walent zonada  $-E_a$  zonanayň potologyny kesgitleýär. Bu iki ekstremumlar kwaziimpulýsyň dürli bahalaryna deňşli bolup biler.

Effektiw massa  $m = \frac{1}{\left(\frac{d^2 E}{dp^2}\right)}$  formula boýunça

kesgitleniýär. Geçirijilerde zonalaryň çäginde  $E_n$  we  $E_a$  golaýynda ýerleşen energiýanyň elektronlary gatnaşýarlar, funksiýa  $E_n(p)$  parabola bilen dogry beýan edilýär. Olar üçin effektiw massa praktiki taýdan kwaziimpulsa bagly däl. Walent zonanyň depesinde (potologynda) elektronlaryň effektiw massasy otrisateldir, onuň moduly deşikleriň effektiw massasyna laýyk gelýär. Arsenid gallide (1.2b) ýokary egri çyzyk iki minimuma eýe bolýar:  $p=0$  we  $p=p_0$ . Birinji minimumyň golaýynda  $E_n(p)$  baglanyşyk aýdyň, we oňa kiçi effektiw massa degişlidir  $m_{n1}=0,07m_0$  (ýeňil elektronlar). Ikinji minimumyň golaýynda energiýanyň oky boýunça  $\delta E=0,36eV$  birinjide ýokary  $E_n(p)$  baglanyşyk endigan, we oňa uly effektiw massa degişlidir  $m_{n2}=1,2m_0$  (agyr elektronlar)

### Elektron we deşikli geçirijilikli ýarymgeçirijiler

Eger hususy ýarymgeçirijä donor garyntgysy girizilse, onda erkin elektronlaryň deşikleriň sanyndan ýokary bolar. Şeýle ýarymgeçiriji elektron geçirijilie eýe bolýar we elektrik ýarymgeçiriji diýip atlandyrylýar ýa-da n-tipli ýarymgeçiriji. Goşmaça

Fotoelement adatça ýüklenýän rezistor bilen yzygiderli birikdirilýär. Fototogyň örän kiçi bolanlygy üçin fotoelementiň hemişelik toga görkezýän garşylygy gaty uly bolup ol birnäçe ýa-da onlarça megaom bolup biler. Ýüklenilen rezistoryň garşylygy näçe uly bolsa şonça-da gowy. Ondan ýagtylyk signalynyň naprýaženiýasy alynýar. Bu naprýaženiýa giriş sygymy rezistora şuntirlenen güýçlendiriji girişine berilýär. Rezistorýň garşylygynyň uly bolmagy, we ýygyllygyň nuly bolmagy şuntirleme täsiriň hem uly bolmagyna getirýär we rezistordaky naprýaženiýanyň bahasyny hem kiçi edýär. Elektrowakum fotoelementleri awtomatikanyň, sesli kinolarň enjamlarynda, fiziki priborlarda giňden ulanylýar. Ýöne olaryň kemçiligi olaryň uly ölçegleri we anutdaky naprýaženiýanyň uly bolmagy. Bu kemçilik zerarlly soňky ýyllarda olary ýarymgeçirijili ýagtulyk kabul edijiler bilen çalyşmaga getirdi.

Fotoelektron köpeldijiler (FEK) – bunuň özi elektrowakum pribory bolup oňa elektron fotoelement bilen ýenege fototogy ikilenji elektron emisiýanyň kömegi bilen köpeltmäge niýetlenen enjam goýlan.

### 6.9 Süýümli optiki aragatnaşyk ulgamlary

Süýümli optika ulgamynyň, ýagny süýümli optika datçiginiň esasy düzümi, optiki süýümden, ýagtylyk şöhesini göýberjiden we ýagtylyk şöhesini

başda özüni elektron fotoelementleriňki ýaly alyp barýarlar. Soňra anod naprýaženiýanyň köpelmegi bilen gazyň ionizirleme sebäbi bilen akym gaty ösýär. Bu ösüş gazyň güýçlendiriji koeffisienti arkaly bahalanýar, ol 5-den 12 çenli deň bolup bilýär. Elektron we ion fotoelementleriň energetiki häsiýetnamalary fotoakymyň fotoelemente düşýan ýagtylygyň akymyna anod naprýaženiýasy hemişelik bolanda baglanyşygy aňladýar  $I_f = f(F)$ .

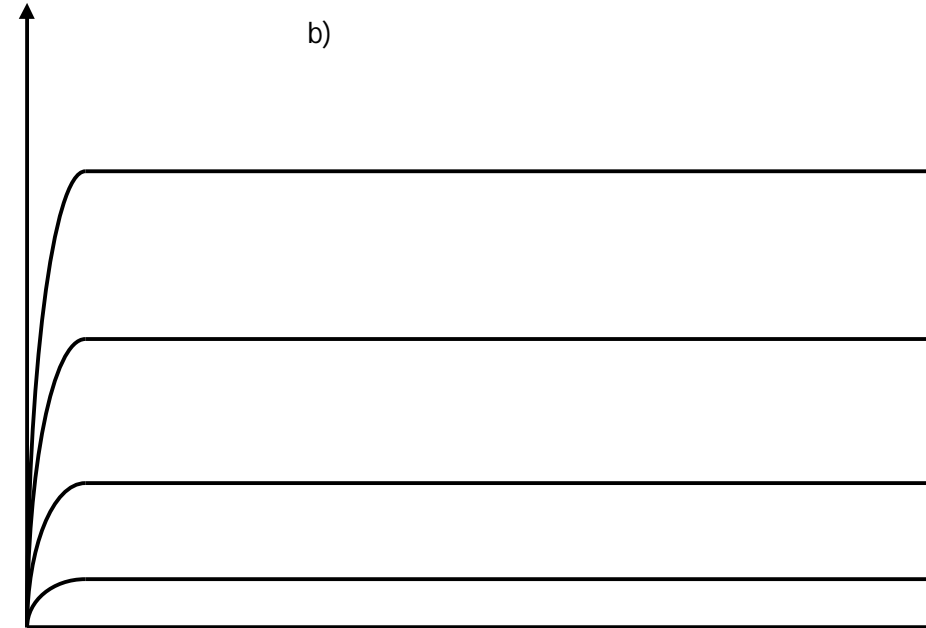
Fotoelementleriň esasy parametirleri – duýgurlyk, maksimal ýol berilýän anod naprýaženiýasy we garaňky akym. Elektron fotoelementleriň duýgurlygy onlarça, ionly fotoelementlerde bolsa – her lýmene ýüzlerçe mikroampere ýetýär. Garaňkylyk togy, munuň özi ýagtylandyryş ýok wagtyndaky tok bolup durýar. Ol katodyň termoelektron emisiýasy bilen we elektrodalaryň arasynda akyp geçen akymlar bilen düşündirilýär. Otag temperaturasynda termoelektronemisiýa zerarly dörän akym  $10^{-10}$  A, elektrodalaryň arasyndaky akymlar zerarly bolsa –  $10^{-7}$ . Fotoelementleri ýörite gurnamagyň kömegi bilen ýitgi akymalaryny ýeterlik derejede azaldyp bolýar. Termoemission akymlyary bolsa diňe katody örän pes temperatura çenli kiçeldip azaldyp bolýar. Garaňkylyk akymalarynyň bolmagy fotoelementleri öň kiçi ýagtylyk signallary üçin ulanmaga mümkinçilik bermeýär.

erkin elektronlar kristallik gözenegiň ýylylyk yrgyldylaryň “täsiiri adtynda ionlaşdyrylan donor atomlardan elektronlaryň üzülmegi (aýrylmagy) ýüze çykýarlar, netijede, donor atomlar položitel zaryadlanan ionlara öwrülýärler. Donor atomlary gadagan zonada geçiriji zonanyň düýbüniň golaýynda ýerleşen ygtyýar edilen derejeleri  $E_g$  emele getirýär.(1.3.surat).Donor atomy ionlaşanda elektron 1 donor derejesinden  $E_g$  geçiriji zona geçýär,  $\Delta E_g = E_n - E_g$  tapawut donorlaryň energiýa aktiwizasiýasy diýilýär.  $\Delta E_g \ll \Delta E_a$  bolan ýagdaýda, onda örän ýokary temperatura bolmadyk ýagdaýda erkin elektronlaryň sany, ýagny donorlaryň ionlaşmagy sebäpli ýüze çykýan ýeterlik derejede ýokary donorlaryň konsentrasiýasy ýylylyk generasiýanyň täsiiri astynda emele gelen elektronlaryň we deşikleriň sanyndan aşa ýokarydyr.Bu halatda elektronlar esasy zaryad äkidijilerdir. Eger ýarymgeçirijä akseptor garyntgy girizilse, onda onuň uly konsentrasiýasy ýarymgeçirijide deşikli geçirijilige eýe bolýar. Beýle ýarymgeçirijä deşikli ýarymgeçiriji ýa-da p-tipli diýilýär. Goşmaça deşikler akseptor atomlar ionlaşanda emele gelýärler,ýagny olara elektronlaryň birikdirilmeginiň netijesinde ýarymgeçirijiniň atomlaryndan aýrylýar. Bu proses energetiki diagrammada elektron 2-iň walent zonadan akseptor derejä  $E_a$  geçişine degişlidir.Bu dereje walent

zonanyň depesiniň golaýynda ýerleşýär. Netijede walent zonada deşiklere degişli erkin elektronlar emele gelýär, emma akseptor atom otrisatel iona öwrülýär.

Tapawut  $E_a - E_w$  akseptorlaryň ionlaşmagynyň aktiwasion energiýasy diýilýär. Deşikler bu halatda essay zarýad äkidijiler hasaplanylýar. Ýarymgeçiriji tehnologiýanyň häzirki ýagdaýynda donorlaryň we akseptorlaryň konsentrasiýalaryny giň predellerde üýtgetmek bolar:  $10^{13} \div 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ . Garyntgy atomlaryň uly konsentrasiýasynda ( $10^{18} \text{ sm}^{-3}$  ýokary) olaryň arasynda güýçli özara täsir netijesinde aýratyn garyntgy dereje (donor ýa-da akseptor) goşmaça derejelere (podurowniý) bölünýärler we dar garyntgy zonany emele getirýärler. Bu halatda ionlaşma energiýa azalýar. Örän ýokary konsentrasiýalarda ( $10^{20} \text{ sm}^{-3}$  ýokary) garyntgy zona şeýle derejede giňelýär, ýagny geçiriji zona bilen birleşýärler n-tipli ýarymgeçirijiler üçin ýa-da walent zona bilen birleşýärler p-tipli ýarymgeçirijiler üçin. Netijede ionlaşma energiýasy azalýar nula çenli we bölekleyin doldurylan zona ýüze çykýar. Metallardaky ýaly bular ýaly ýarymgeçirijilerde  $T = 0K$  geçirijilik bar.

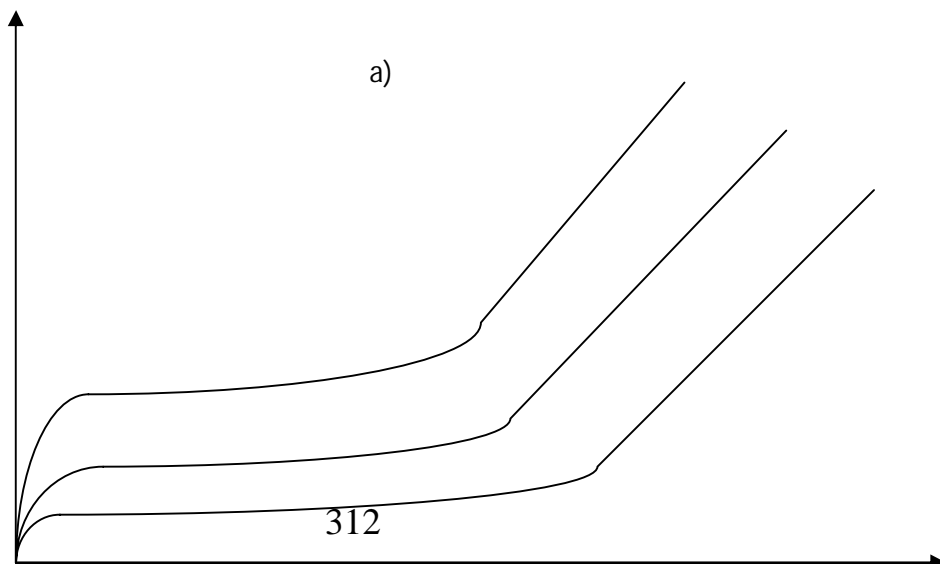
Praktikada ýarymgeçirijilerde donor, şonuň ýaly akseptor garyntgy bolýarlar. Emma olaryň konsentrasiýasy dürli-dürlidir ( $N_d$  we  $N_a$ ). Eger  $N_d \geq N_a$ , onda  $T = 0K$  hemme akseptor derejeleri donor



Çyzg. 18.1 Ion (a) we elektron (b) fotoelementiň anod häsiýetnamalary

Fotoelementleriň häsiýetleri we aýratynlyklary olaryň häsiýetnamalary arkaly beýan edilýar. Elektron fotoelementiň anod (wolt-amper) häsiýetnamalary  $F = \text{const}$  ýokarky (Çyzg. 18.1(b)) suratda görkezilen. Bu häsiýetnamalarda doýgun režiminiň barlygy anyk görünýar. Ion fotoelementlerde şeýle häsiýetnamalar

Fotoelektronlary emitirleýan maddanyň inçé gatlagy görnüşinde aýna ballonyň içki üstüne çalyňan fotokatodly dioda elektrowakuum fotoelementi diýilýär. Anod hökmünde fotokatoda ýagtylygyň düşmegine päsgelçilik bermeýan metal halkasy ulanylýar. Elektron fotoelementlerde ýokary wakuum döredilen, ion fotoelementlerde bolsa birnäçe ýüz paskal basyş astynda inert gazy ýerleşýar, mysal üçin argon. Katodlar köplenç surma-seziý ýada kümüş-kislorod-seziý garyndylardan ýasalynýar.



derejelerden geçen elektronlar bilen doldurylýar we akseptorlaryň atomlary otrisatel iona öwrülýärler. Bu ýagdaýda şunuň ýaly polozitel donor ionlaryň sany emele gelýär, emma neýtral atomlaryň donorlarynyň sany  $N_g - N_a$  azalýar. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen esasanam bu atomlar elektron geçirijiligi amala aşyran elektronlary bererler. Şonuň üçin  $N_g - N_a$  tapawudy donorlaryň effektiv konsentrasıýasy diýip hasap etmek bolar.  $N_a \geq N_g$  halda p-tip geçirijilikli ýarymgeçirijini alarys we effektiv konsentrasıýaly akseptorlaryň  $N_a - N_g$  deň bolar. Eger  $N_a = N_g$ , onda effektiv konsentrasıýa nula deň, ýarymgeçiriji kompensirlenen bolýar. Bular ýaly ýarymgeçirijilere hem edil hususy ýarymgeçiriji ýaly erkin zarýad äkidijileriň konsentrasıýasyna eýe bolýarlar.

Lowuški-(gapyjylar) tutujylar. Ýarymgeçirijileriň gadagan zonasında garyntgylaryň atomlary olaryň golaýynda generasıýa we rekombinasiýa proseslere aktiw gatnaşýarlar we (gapyjylar) tutujylar diýýärler. Olar elektron hereket edende tutup alyp, galmak ukyba eýe bolýarlar. Eger energetiki derejeler doldurylan bolsa, onda donor tipli tutujylar neýtralnyý bolýarlar we (+) iona öwrülýär eger dereje boş bolsa. Akseptor tipli (gapyjylar) boş derejede neýtralnyý we otrisatel iona öwrülýär. (doldurylan ýagdaýda). Şonuň üçin  $N_g - N_a$

tapawudy donorlaryň effektiw konsentrasiýasy diýip hasap etmek bolar.  $N_a \geq N_g$  halda p-tipli geçirijilikli ýarymgeçirijini alarys we effektiw konsentrasiýaly akseptorlaryň  $N_a - N_g$  deň bolar. Eger  $N_a = N_g$ , onda effektiw konsentrasiýa nula deň, ýarymgeçiriji kompensirlenen bolýar. Bular ýaly ýarymgeçirijiler hem edil hususy ýarymgeçirijiler ýaly erkin zarýad äkidijileriň konsentrasiýasyna eýe bolýarlar.

**Fononlar.** Birnäçe atomlaryň özara täsiri astynda käbir atomlaryä ýylylyk yrgyldylary baglanyşukly bolmaýarlar. Bir atomyň yrgyldysy beýleki goňşy atoma berilýär we kristalda kollektiv (köpçülikli) atomlaryň süýşmem, ýagny maýyşgak tolkun görnüşde ýüze çykýar. Bular ýaly prosesleri beýan etmek üçin kwant mehanikada aýratyn bölejikler hakynda düşünje girizilýär-fononlar, kristallik gözenegiň ýylylyk yrgyldylarynyň kwantlary. Bu düşünje edil elektromagnit şöhlä ekwiwalent fotonlar goýbermegine meňzeşdir. Fononlar impulsa  $p_{fon}$  we energiýa  $E_{fon}$  eýe bolýarlar we ýygylyk bilen  $\nu_{fon}$ . Plankyň formulasy boýynça  $E_{fon} = h \nu_{fon}$  (niredede  $h$  - Plankyň mydamalygy) baglydyr. Fononlaryň ortaça energiýasy  $kT$ , niredede  $k$  - Bolsmanyň mydamalygy. Fononlar akustiki we optiki bölege bölünýärler. Birinjiler kristallik gözenegiň elementar ýaçeýkasynda atomlaryň sinfaz yrgyldylaryna degişlidir we kristalda akustik tolkuna

2. Eýnşteýnyň kanuny. Daşky fotoelektrik hadysasynda fotonyň energiýasy  $h\nu$  çykyş işe  $W_0$  we uçyp çykan elektronyň kinetik energiýasyna öwrülýär:

$$h\nu = W_0 + m\nu^2/2, \quad (18.2)$$

bu ýerde  $m$  we  $\nu$  - fotoelektronyň massasy we tizligi,  $\nu$  - şöhlendirmäniň ýygylygy,  $h$  - Plankyň hemişeligi,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ .

Elektromagnit şöhlelenme ikilik häsiýetini eýeleýär. Bir tarapdan bu elektromagnit tolkunlary, olaryň tolkun uzynlygy  $\lambda$  we ýygylygy  $\nu$  bar. Başga tarapdan şöhlelenmäni  $h\nu$  energiýaly foton bölejikleriň akymy görnüşinde göz önüne getirip bolýar.

3. Daşky fotohadysasynda gyzyly ýada uzyntolkunly araçägi bar. Egerde şöhlelenmäniň ýygylygyny  $\nu$  peseldip başlasak, onda käbir  $\nu_0$  ýygylykda fotoelektron emissiýasy bes edýär, sebäbi bu ýygylykda  $h\nu_0 = W_0$  we fotoelektronlaryň energiýasy nola deň bolýar.
  4. Fotohadysasy üçin kiçi inersionlyk häsiýetli bolýar. Fotoakym şöhlelenmä görä diňe birnäçe nanosekunda gijä galýar.
- Fotokatodlar emissiýa sebäp bolan fotonlaryň sanyna fotoelektronlaryň sanynyň gatnaşygy arkaly häsiýetlendirilýärler. Bu häsiýetnama elektronlaryň kwant çykyşy diýilýär.

Katod zyjyrynda jemleýji katod akymy akýar:

$$I_k = I_a + I_g, \quad (17.4)$$

bu ýrede  $I_g$  – tor akymy.

## 6.8 Fotoelektron enjamlary

Elektromagnit şöhlendirme täsiriniň astynda ýerine ýetirilýan elektron emissiýa fotoelektron emissiýa ýada daşky fotoelektrik hadysasy diýilýar. Emitirleýan elektroda fotoelektron katod diýilýär (fotokatod), onuň arkaly çykarylýan elektronlara fotoelektronlar diýilýar. Fotoelektron emissiýanyň esasy kanunlary we aýratynlyklary

1. Stoletowyň kanuny. Fotoelektron emisiýanyň hasabyna ýüze çykýan  $I_f$  fotoakymy ýagtylyk akymyna  $F$  proporsional:

$$I_f = SF, \quad (18.1)$$

bu ýerde  $S$  – fotokatodyň duýgurlygy, mikroamper/lýumen ölçenýar. Egerde  $F$  akym monohromatik bolsa, başgaça diňe bir tolkun uzynlykly şöhleleri eýeleýän bolsa, onda duýgurluga monohromatik diýilýar we  $S_\lambda$  arkaly belgilenýar. Dürli tolkun uzynlykly şöhlelerden düzülýan ak (monohromatik däl) ýagtylyga duýgurluga integral duýgurluk diýilýar we  $S_\Sigma$  belgi arkaly belgilenýar.

meňzeş ýaýraýar. Olaryň spektrleri nuldan tä birnäçe maksimal ýygyllykly ýaýraýar ( $10^{13} \text{Gs}$   $\text{Si}$  üçin) ýaýraýar. Ortaça ýygyllyk ses yrgyldylarynyň ýygyllygyndan has ýokarydyr, şonuň üçin termin “akustik” şertleýindir. Impulsynyň ulalmagy bilen energiýa ulalýar  $E_{fon} = p_{fon} * v_{fon}$ , nirede  $v_{fon}$  -akustik fononlaryň ýaýramagynyň tizligi (kristalda sesiň tizligi  $10^5 \text{sm} \setminus \text{s} - \text{dir}$ ).

Optiki fonolar-kristalyň elementar ýaçeýkasynda atomlaryň garşyfazaly yrgyldylaryna degişlidir. Optiki fononlar birnäçe uly çägiň ýygyllykdan uly bolan ýygyllyklarda emele gelýär ( $1,2 * 10^{13} \text{Gs}$  kremniý üçin ( $\text{Si}$ )). Şonuň üçin olary oýandyrmak üçin ýeterlik derejede energiýa talap edilýär.  $E_{fon.opt.}$  we ýarymgeçirijiniň elektrofiziki parametri bolup durýar, mysal üçin, kremniý üçin  $E_{fon.opt} = 0,063 \text{eV}$ ,  $T = 300 \text{K}$  temperaturada  $2,4kT$  deňdir. Akustik fononlardan tapawutlylykda optiki fononlar uly energiýa we ýygyllyga eýe bolýarlar, impulsyň ulalmagy bilen energiýa azalýar.

## Erkin zarýad äkidijileriň deňagramlyk konsentrasiýasy

Deňagramlyk ýagdaýda biri-birini kompensirleýji prosesler bolup durýar, ýagny erkin elektronlaryň emele gelmegi weýok bolmagy:

jübütleriň generirlenmegi elektron-deşik we olaryň rekombinasiýasy, mundan başgada garyntgy atomlaryň ionlaşmagy we ionlaryň neýtrallaşmagy, netijede elektronlaryň we deşikleriň mydamalyk deňagram konsentrasiýasy dikeldilýär. Elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy deň bolan hususy ýarymgeçirijä seredeliň.  $n = p = n_i$

$$n_i = \sqrt{N_n \cdot N_w} \exp\left(\frac{-\Delta E}{2kT}\right) \quad (1.1)$$

Eksponensial köpeldiji temperaturanyň ulalmagy bilen konsentrasiýanyň çalt ösmegini ( $n_i$ ) ýa-da gadagan zonanyň ininiň azalmagyny amala aşyrýar.

1.3-nji suratda esasy ýarymgeçiriji materiallary üçin zarýad äkidijileriň konsentrasiýalaryň temperatura görä eksperimental paýlanyşygy getirilen. Çyzgylaryň göni çyzyga ýakynlygy eksponensial çleniň kesgitleýji täsirini tassyklaýar. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen konsentrasiýalaryň köpelmegi

deň bolan anod akymlary üýtgeýärler. Şu hadysa anod akymyň dolandyryşynyň elektrostatik prinsipi esaslanýar.

Egerde anodyň potensialy katoda görä oňyn däl bolsa onda katod bilen anodyň arasyndaky meýdan katoddan uçyp çykýan elektronlary haýallandyrýar we olary katoda yzyna gaýtarýar. Bu ýagdaýda katod we anod akymlary nola deň. Anod bilen katodyň arasyndaky potensiallaryň tapawudyna anod naprýaženiýasy diýilýar.

Triodlarda anod bilen katodyň arasynda üçünji elektrod – dolandyryjy tor ýerleşýar. Ol anod akymy elektrostatik dolandyrmak üçin ulanylýar. Egerde toryň potensialy üýtgedilse onda elektrik meýdany we onuň bilen baglanyşykda çyranyň katod akymy üýtgeýär. Katod we anod triodlarda diodlardaky ýaly. Tor köplenç simdan ýasalynýar. Triod gyzdryjy we anod zynjyrlary eýeleýär we goşmaça toryň zynjyryny. Tor bilen katodyň arasyndaky potensiallaryň tapawudyna tor naprýaženiýasy diýilýar. Tor naprýaženiýanyň oňyn bahalarynda elektronlaryň bir bölegi tora düşýärler we onuň zynjyrynda tor akymy peýda bolýar.

Esasy we peýdaly akym triodda – anod akymy. Ol bipolar tranzistoryň kollektor akymyna meňzeş. Tor akymy tramzistoryň baza akymyna meňzeş, ol peýdasyz. Köplenç tor akymyny aýyrýarlar. Onuň üçin tor naprýaženiýasy oňyn däl bolmaly.



bu ýerde  $N - 1$  sekundda uçyp çykýan elektronlaryň sany,  $q$  – elektronyň zarýady.

Anod bilen katodyň arasynda oňyn däl zarýad peýda bolýar, oňa göwrüm ýada giňişlik zarýad diýilýar, ol elektronlaryň anod tarapa hereketine päsgelçilik döredýärler. Anodyň oňyn potensialy ýeterlik bolmasa onda hemme elektronlar göwrüm zarýadyň täsirini eýgerip bilenoklar we olaryň käbir bölegi yzyna katoda gaýdýärler.

Katoda yzyna gaýtmadyk elektronlar katod akymyny kesgitleýärler:

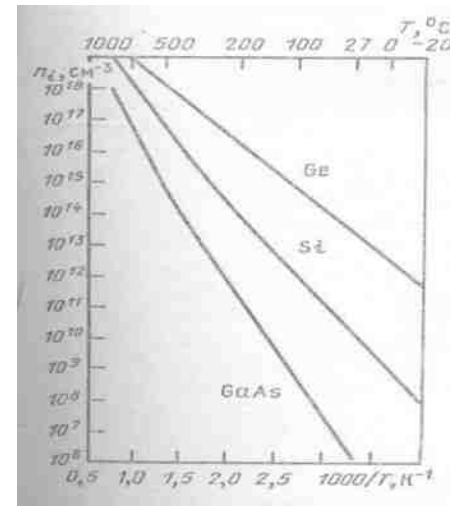
$$I_k = nq < I_e, \quad (17.2)$$

bu ýrede  $n - 1$  sekuntda katoddan çykan we yzyna gaýdyp gelmän elektronlaryň sany. Näçe anodyň potensialy uly bolsa şonça köp elektronlaryň sany göwrüm zarýaddan geçýär we anoda tarap barýarlar, şonça katod akymy uly bolýar.

Katoddan anoda tarap uçýan we anoda barýan elektronlaryň akymyna anod akymy diýilýär. Ol anod zynjyrynda akýar. Diodda katod we anod akymlyry deň biri birine:

$$I_a = I_k \quad (17.3)$$

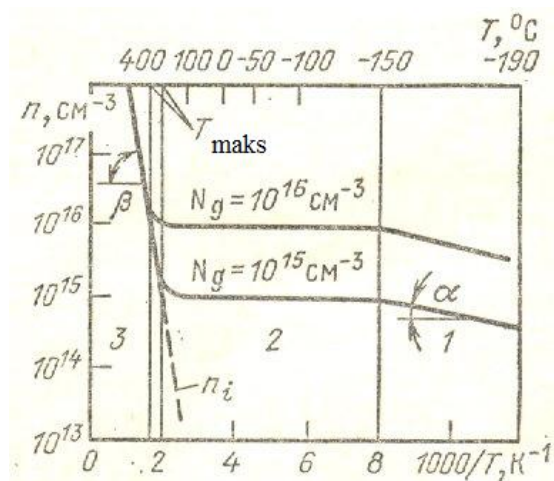
Aod akymy elektron çypanyň baş akymy bolup durýär. Anodyň oňyn potensialy üýtgedilende katod we oňa



energetik derejeleriň  
effektiw  
dykzlygynyň  
ulalmagyna  $N_n \sim T^{3/2}$ ,  
 $N_w \sim T^{3/2}$  we gadagan  
zonanyň ininiň  
ujypsyz azalmagyna  
mümkinçilik  
berýär.  $\Delta E_a$  temperatu  
ra koeffisienti  
 $-3,9 \cdot 10^{-4}$ , we

### 1.3-nji surat

$-4,3 \cdot 10^{-4} eV / K$  deňişlilikde germaniý, kremniý we arsenid galliý üçin deňdirler. Şol sebäpli eksperimental grafikleriň göni çyzykdan gysarmagy ýüze çykarylýar. Gadagan zonanyň ininiň hususy konsentrasiýa täsiri indiki mysaldan aýdyňdyr: 300K temperaturada  $\Delta E_G$  bahasy kremniý we arsenid galliý üçin deňişlilikde 1,12 we 1,41 eV deňdirler, tapawut 1,27 essedir, emma zarýad äkidijileriň hususy konsentrasiýasy  $-1,4 \cdot 10^{10}$  we  $1,8 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$  4 esse



1.4-nji surat

tapawutlanýar.

Elektron geçirijilikli garyntgyly ýarymgeçirijide elektronlaryň konsentrasiýasynyň temperatura baglylygyna seredeliň. 1.4-nji suratda kremniý üçin dürli konsentrasiýaly donrlaryň elektronlaryň konsentrasiýasynyň temperatura baglylygy görkezilen. Onda üç oblasty aýdyňlaşdyryp bolýar. Aşak temperaturalarda (1-nji oblast) donrlaryň ionlaşma energiýasy bilen deňşdirilende ( $kT < \Delta E_g$ ) fononlaryň ortaça energiýasy az, şonuň üçin donrlaryň bir bölegi ionlaşan, erkin elektronlaryň konsentrasiýasy az. Temperaturanyň ösmegi bilen 1-nji

trubkalar, şekilleriň elektron-optiki özgerdijiler, elektron-şöhle geçirijiler we başgalar. Fotoelektron enjamlaryň toparyna elektrowakuum fotoelementleri (elektron we ion) we fotorlektron köpeldijiler girýärler.

Diodyň esasy etmeli işi – üýtgeýän akymy göneltmek. Kä mahal diodlary gohlary (tertipsiz üýtgeýän akymlyry we naprýaženiýalary), elektrik impulslary çäklendirmäge we başgalary ýasamaga peýdalanýarlar. Diod aýna, metal ýada keramiki wakuum ballonda iki sany elektrody eýeleýär. Bir elektrod – bu gyzdyrylan katod, ol elektron emissiýany (çykarmagy) amala aşyrýar. Beýleki elektrod – anod – katodyň çykarýan elektronlary kabul edýär. Wakuum diodyň katody we anody ýarymgeçiriji diodyň emitterin we bazasyna meňzeş. Anod elektronlary dartýar egerde ol katoda görä oňyn potensialy eýeleýän bolsa. Anod bilen katodyň arasynda elektrik meýdan peýda bolýar. Bu meýdan anodda oňyn potensial bolsa elektronlar üçin tizlendiriji bolýar. Katoddan uçyp çykýan elektronlar meýdanyň täsiri astynda anoda tarap hereket edýärler.

Katoddan uçyp çykýan elektronlar emissiýa akymyny emele getirýärler:

$$I_e = Nq, \quad (17.1)$$

Ýenede geçiriji (razrýadsyz) elektrowakuum enjamlaryň topary bar. Olara ýagtylyk çyralary, akymyň stabilizatorlary(baretterleri), wakuum kondensatorlary we başgalar degişli. Aýratyn elektrowakuum enjamlaryň toparyny elektron çyralary düžýärler. Olar elektrik ululyklary öžgertmäge niýetlenen. Bu çyralar generator, güýçlendiriji, göneldiji, ýygylýk-özgerdiji, detektor, ölçeg we baş. Bolup bilýärler. Olaryň köpüsi üznüksiz režimda işlemäge niýetlenen, ýone impuls režimda işleýän çyralar hem bar. Olarda kiçi dowamly akymalar – elektrik impulsar akýarlar.

Iş ýygylýklara görä elektron çyralar pes-, ýokary- we aşa ýokary ýygylýkly çyralara bölünýärler.

Iki elektrody – katody we anody - eýeleýän elektron çyralara diodlar dýilýär. Iýmitleme çeşmelerdäki akymy göneltmäge ulanylýan diodlara kenotronlar diýilýär. Katoddan we anoddan başga tor görnüşinde umumy sany üçden sekize çenli bolýan elektrodly eýeleýän çyralara – triod, tetrod, pentod, gekso, geptod we oktod diýilýär. Iki we ondan köp torlaryň sany bolan çyralara köpelektrodly çyralar diýilýär. Esasy ion esbaplary – bu tiratronlar, stabilitronlar, ion razrýadçylar we başgalar.

Elektrowakuum enjamlaryň uly toparyny elektron-şöhle esbaplary düžýärler. Olara kineskoplar (kabul edýän telewizion trubkalar), geçirýän telewizion trbkalar, ossillograf we ýadynda saklaýan

oblastda elektronlaryň konsentrasiýasy ulalýar, ionlaşan donorlaryň konsentrasiýasy köpeliýär. Elektronlaryň konsentrasiýasynyň  $1/T$  görä baglanyşygy eksponensialdyr,  $\exp\left[\frac{\Delta E_G}{(2kT)}\right]$  görnüşde, şonuň üçin ýarymlogarifmik masştabda ol göni çyzyk bilen şekillendirilýär, ýapgyt burçuň  $\lg \alpha$  donorlaryň ionlaşma energiýasyna proporsionaldyr.

2-nji oblastda fononlaryň energiýasy garyntgylaryň ionlaşma energiýasy bilen deňräd, emma ýeterlik derejede gadagan zonanyň ininden kiçidir. Otag temperaturada ( $300\text{K}$ ) fononlaryň ortaça energiýasy  $kT = 0,026\text{eV}$ . Şonuň üçin hemme donorlar ionlaşan, emma hususy elektronlaryň konsentrasiýasy  $n_i$  köpdäl. Erkin elektronlaryň doly sany takmynan mydamalykdyr, emma olaryň konsentrasiýasy donorlaryň konsentrasiýasyna deňdir:  $n_i \approx N_d$ . Şeýlelikde, 1 we 2-nji oblastlarda esasy zarýad äkidijileriň garyntgylary geçirijiligi işläp başlaýar. 3-nji oblastda, ýokary temperaturalarda fononlaryň energiýasy şeýle bir köpeliýär, ýagny hususy zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy donorlaryň konsentrasiýasyndan köpdür.  $n_i \geq N_d$ . Deňagramlyk ýagdaýda elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy

$$np = n^2_i \quad (1.2)$$

(1.2) aňlatmada garyntgylaryň konsentrasiýasyna bagly däl. Garyntgylaryň konsentrasiýasynyň köpelmegi, mysal üçin, donorlaryň diňe bir elektronlaryň konsentrasiýasynyň ulalmagyna getirmän (esasy zarýad äkidijileriň), eýsem deşikleriň konsentrasiýasynyň proporsional azalmagyna getirýär (esasy däl zarýad äkidijiler). Bu hadysa olaryň rekombinasiýasynyň ähtimallygynyň ulalmagy bilen düşündirilýär, ýagny rekombinasiýalaryň köpeltmek hasylyna proporsionaldyr. Ýarymgeçiriji abzallaryň aglabasy diňe 2-nji temperatura diapazonda normal ýagdaýda işläp biler. Esasy zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy praktiki taýdan temperatura bagly däl. 2-nji oblastyň araçägi boýunça ýarymgeçiriji abzallaryň işçi temperaturasynyň maksimal we minimal bahasy kesgitlenilýär.

Esasy zarýad äkidijilerden tapawutlylykda esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy temperaturanyň ösmegi bilen çalt ulalýar. Hakykatdanam 1.2 formula görä esasy däl zarýad äkidijileriň deňagramlyk konsentrasiýasy deşikleriň elektron tipli ýarymgeçirijide  $P_{no} = \frac{n_i^2}{n_o}$ , niredede  $n_o$  - elektron ýarymgeçirijide elektronlaryň deňagramlyk konsentrasiýasy. 2-nji oblastdan alarys:

energiýasyny şöhlendirmek arkaly (ýokarky derejeden aşaka) hem geçirilip bilner.

## 6.7 Elektrowakuum enjamlary

Gazlar geçip bilmeýän gabak bilen izolirlenen, dyklyzlygy aşa ýokary bolan ýada ýörite gurşaw bilen doldyrylan (buglar ýada gazlar), täsiri wakuumda ýada gazda elektrik hadysalary ulanmaga esaslanan işjeň giňişligi eýeleýän enjamlara elektrowakuum enjamlary diýilýär.

Atmosfera basyşyndan pes basyşda saklanýan gazyň ýada howanyň ýagdaýyna wakuum diýilýär. Egerde elektronlar giňişlikde erkin hereket edýän bolsalar, gazy soryp alnandan soň galan molekulalar bilen çaknyşmaýan bolsalar, onda ýokary wakuum diýýärler.

Elektrowakuum enjamlar elektron we ion (gazrazýadly) enjamlara bölünýärler. Elektron esbaplarda wakuumda arassa elektron akym akýar, ion esbaplarda gazlarda ýada bugda elektrik razýad geçýar. Elektron esbaplarda ionizirleme ýok diýen ýaly, gazyň basyşy 100 mkPa kiçi (uly wakuum). Ion enjamlarda basyş  $133 \cdot 10^{-3}$  Pa (10-3 mm simaw sütüniň) we ýokary. Onsoň hem hereket edýän elektronlaryň aglabasy gazyň molekulalary bilen çaknyşýalar we olary ionizirleýärler.

juda kiçi çäkke ýagtylyk energiýasyny jemläp bilmeklik ukyby lazerlere uly gyzyklanma döredýändir.

Şonuň üçin kä halatda kwant elektronikasyna lazerler baradaky ylym hem diýilýär.

Kwant elektronikasynyň ylmy esasy 1916 ý. A.

Eýnşteýn tarapyndan kesgitlenen mejbury

(indusirlenen) şöhlelenmek hadysasy düzýändir.

Diskret (kesgitli) energetiki derejeleri bolan kwant sistemalarynda geçişleriň 3 (üç) görnüşi bardyr:

1. **elektromagnit meýdany tarapyndan indusirlenen geçişler (mejbury).**
2. **Spontan (öz-özünden) geçişler.**
3. **Şöhlelenmesiz relaksasion geçişler.**

Indusirlenen şöhlelenmäniň häsiýetleri kwant elektronikasynyda şöhlelenmäniň kogorentlili- gini we güçlenmäni kesgitleýändir.

Spontan şöhlelenmesi yrgyldylary aýarmak we güýçlendirmek prosesine ilkibaşky itergini berýär we şöhlelenmesiz relaksasion geçişler bilen bilelikde termodinamiki deňagramsyz şöhlendiriji ýagdaýy almakda we ony saklamakda wajyp rol oýnaýandyr. Goý, bize  $E_1, E_2, \dots, E_n$  diskret energetiki derejeleri bolan kwant sistemasy berlen bolsun. Mejbury (indusirlenen) geçişlerde kwantsistemasy bir energetiki derejeden beýlekä elektromagnit energiýasyny ýuwutmak bilen (aşky energetiki ýagdaýdan ýokarda) birlikde elektromagnit

$n_{no} = N_g$ ,      onda

$$P_{no} = \frac{n_i^2}{N_g} = \left( \frac{N_n \cdot N_p}{N_d} \right) \exp \left[ \frac{-\Delta E_g}{kT} \right] \quad (1.3)$$

Ýylylyk generasiýasy tarapdan emele gelen jübüt zarýad äkidijileriň temperatura güýçli bagly bolmagy esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasynyň güýçli üýtgemegine getirýär. Abzallaryň birnäçe häsiýetleri, ýagny esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasyna bagly bolýan temperatura baglylykda garyntgylaryň doly ionlaşan oblastynda birden üýtgemegi mümkin bolar. Ýarymgeçiriji abzallaryň maksimal işçi temperaturasy  $n_i = N_g$  şertde kesgitlenilýän temperaturalar has aşakda bolmagy mümkin. Emma bu ýagdaýda gadagan zonanyň ininiň ulalmagy bilen ulalýar, sebäbi esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy azalýar.

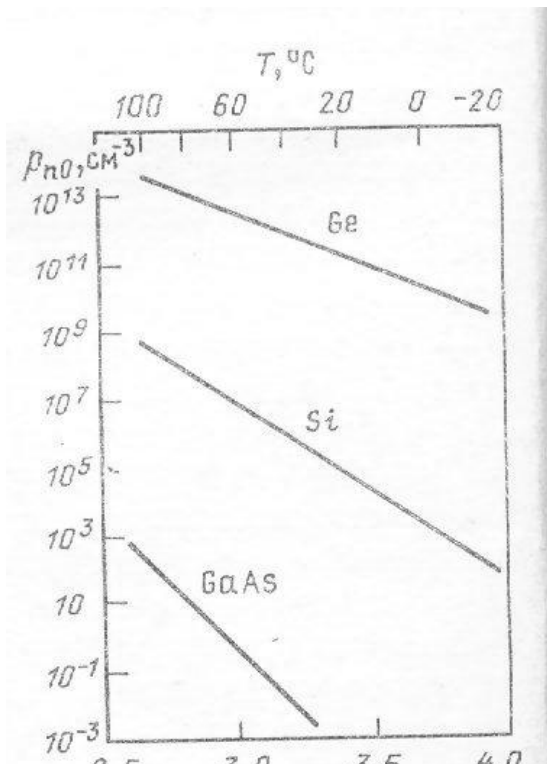
**Fermi derejesi.** Energetiki diagramma gurlanda Fermi derejesi giňden ulanylýar. Gaty jisim fizikasynyň iň fundamental düzgünnamalarynyň biri-mydamalyk (birmeňzeşlik) hemme gaty jisimleriň deňagramly sistemalar üçin, ýagny olaryň dürli bolmagyna garamazdan. Garyntgylaryň dürli konsentrasiýasynda we temperaturada energetiki diagrammada Fermi derejesiniň ýagdaýyny bilmeklik zerurdyr. Biziň bilşimiz ýaly hususy ýarymgeçirijide

$m_n = m_p$  bolanda Fermi derejesi gadagan zonanyň ortasynda ýerleşýär:

$$E_f = E_i = 0,5(E_n + E_w).$$

Elektron tipli ýarymgeçirijide  $N_n \gg n \gg n_i$  (newyrozdyonnyý)  $E_f$  gadagan zonanyň ýarysyndan ýokary böleginde ýerleşýär, emma p-tipli ýarymgeçirijide aşak böleginde ýerleşýär. Otag temperaturasynda ( $T = 300K$ )  $E_f$  donor derejeden aşakda ýa-da akseptor derejeden ýokarda (degişlilikde  $n$  we  $p$  tip ýarymgeçirijiler üçin)

Temperatura  
nyň  
ýokarlanma  
gy bilen  
 $m_n \approx m_p$   
Fermi  
derejesi  
gadagan  
zonanyň  
ortasynda  
golaýlaşýar,  
sebäbi  
hususy  
geçirijilige  
eýe bolýar



**Oýandyrylma** – sistemany (atomy, molekulany, maddany) kiçi energiýaly ýagdaýdan uly energiýaly ýagdaýa geçirýän prosesdir.

**Oýandyrylan dereje** – atomyň, molekulanyň, gaty jisimiň sistemanyň energiýasynyň soňky ululygyň mümkin bolan iň kiçi bahasyndan agdyklyk edýän ýagdaýyna jogap berýän energetiki derejesidir.

**Derejedäki ýaşayş wagty** – atomyn, molekulanyň ýa-da beýleki kwant sistemasynyň kesgitli energiýaly ýagdaýda bolmaklygynyň ortaça dowamlylygy.

**Işjeň gurşaw (madda)** – bölejikleriniň energetiki derejelerdäki sany elektromagnit tolkunlarynyň güýçlenmek mümkinçiligi döredýän madda. (ýagny, inwersiýa ýagdaýy döredilen madda.)

Kwant elektronikasynyň gurluşlary diýlende ilki bilen elektromagnit şöhlelenmesiniň kogorent çeşmeleri – lazerler we mazerler göz önüne tutulýar.

“Lazer” adalgasy **“Light amplification by stimulated emission of radiation”** diýen iňlis aňlatmasynyň baş harplaryndan düzülendir. Ol ýagtylygyň şöhlelenmäni mejbury göýbermek arkaly güýçlendirmek” diýmekdir. “Mazer” adalgasy hem ýokardaky manyny berýär, ýöne “light” sözünüň ýerine “microwave” gelýär. Ol aşa ýokary ýygyllykly radiotolkunlara degişlidir.

Lazer bilen mazeriň arasynda düýpli tapawut bolmasa-da, giňişlikde, wagta görä we spektr babatda

$C = \lambda \cdot \nu$  bolýanlygyny hasaba alsak, onda “real” optika  $\nu = 1,5 \cdot 10^{13} \div 1,5 \cdot 10^{15}$  Gs ýygyllyklar çäginde ýerleşýär diýip aýtmak bolýar.

**Ýagtylyk tolkunlary** – tolkun uzynlyklary optiki çäkde ýerleşen elektromagnit tolkunlary.

**Monohromatik şöhlelenme** – ýagtylyk yrguldylarynyň haýsy hem bolsa bir ýygyllygy (tolkun uzynlygy) bilen häsiýetlendirilýän optiki şöhlelenme.

**Kwant generatory** – mejbury şöhlelenmä esaslanan kogorent şöhlelenmäniň çeşmesidir.

**Mejbury şöhlelenme** – mejbury göýberilme netijesinde döreýän kogorent elektromagnit şöhlelenmegi.

**Lazer** (optiki kwant generatory) – optiki şöhlelenmäniň kwant generatory.

**Mazer** – radioçäkdäki elektromagnit şöhlelenmesiniň kwant generatory.

**Kogorentlilik** – yrgyldyly ýa-da tolkun prosesleriniň wagta görä we giňişlikde sazlaşykly bolup geçmegidir.

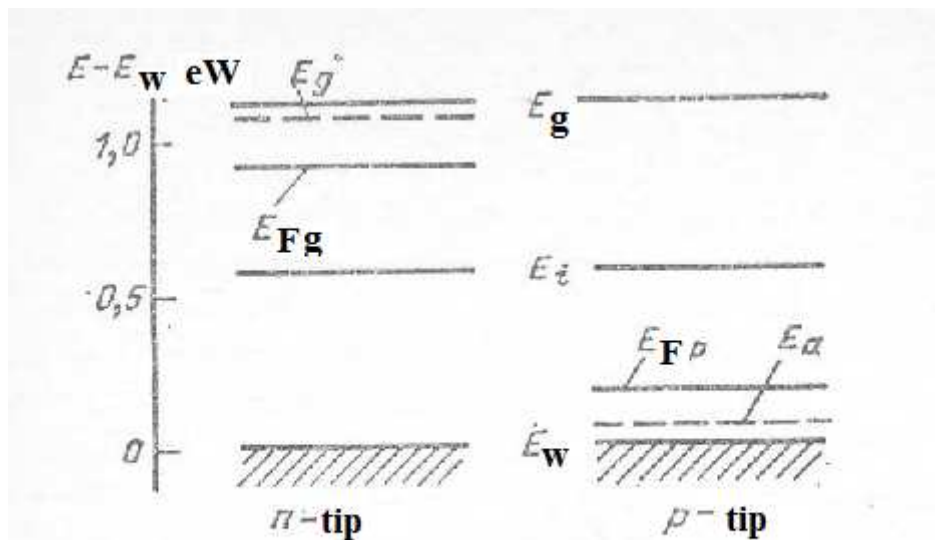
Eger-de elektromagnit tolkunynyň amplitudasy, ýygyllygy, fazasy, ýaýraýyş ugry we polýarizasiýasy hemişelik galýan bolsa ýa-da kesgitli bir kanun boýunça (tertipli) üýtgeýän bolsa, onda ol kogorentdir.

**Wagt birligindäki Geçiş ähtimallygy** – sistemanyň (atomyň, molekulanyň we ş.m.) bir energetiki ýagdaýdan beýlekä kwantlaýyn geçişiniň tizligini häsiýetlendirýän ululykdyr.

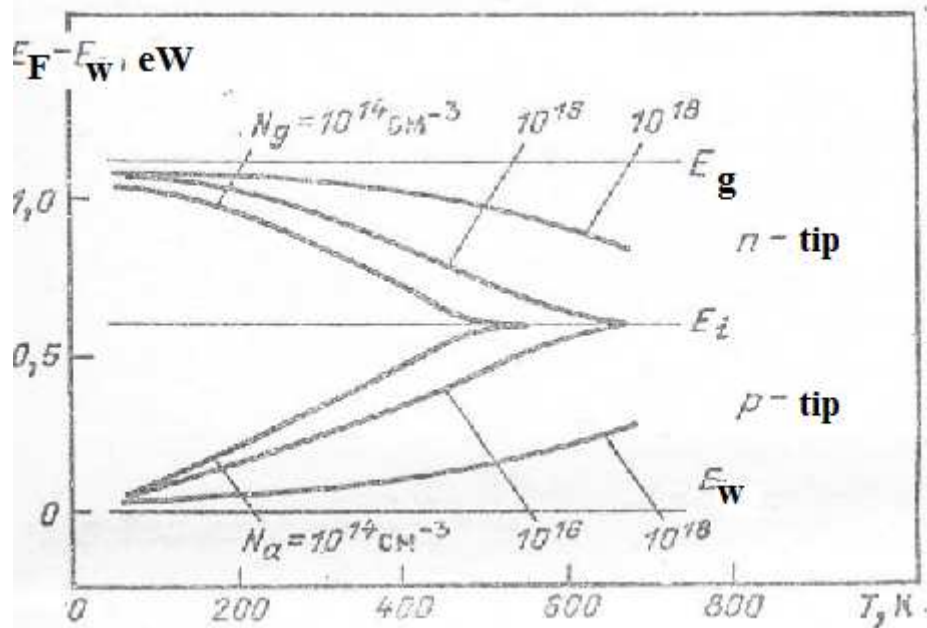
(3-nji oblast).

Suratda kremniý ýarymgeçirijide Fermi derejesiniň garyntgylaryň dürli konsentrasiýasynda temperatura baglanyşygy görkezilen.

Eger  $n \geq N_g$  ýa-da  $0 \geq N_w$  onda ýarymgeçiriji wyrozdyonnyý diýilýär. Olar üçin diňe Fermi-Diragyň kwant statistikasy dogrudyr. Konsentrasiýa ýokary, ýagny ygtyýar edilen ýerleşiş ýagdaýlaryň konsentrasiýasy bilen deňeçer, onda elektronlar energetiki derejeleri biri-birine baglanyşyksyz Pauliniň prinsipine baglylykda eýeläp bilmeýärler. Fermi derejesi bu ýagdaýda  $(2-3) kT$  azrak aralykda gadagan zonada onuň araçäginde ýa-da n-tipli ýarymgeçirijiler üçin geçiriji zonada, ýa-da walent zonada p-tipli ýarymgeçirijiler üçin. Praktikada wyrozdyonnyý ýarymgeçiriji garyntgylaryň ýokary konsentrasiýasy alynýar.



1.6-njy surat



elektronlar we fotonlar bilelikde “zähmet çekýärler”. Şunlukda, fotonlaryň täsiri kesgitleýjidir, sebäbi optiki elektronkany (OE) adaty elektronikadan tapawutlandyryň hil taýdan täze zat hut fotonlar bilen baglanyşyklydyr.

Umuman, OE – bu optikanyň we elektronkanyň birligidir, бүтewligidir, elektronlaryň fotonlara özara öwrülmeğidir we tersinedir.

OE-da esasan şöhlenmäniň kogorent çeşmeleri ýagny kwant gurluşlary peýdalanylýar. Özünden dürli tolkun uzynlykly kogorent şöhlenmäni göýberýän gurluşlar bilen, bilşimiz ýaly kwant elektronikasy (KE) meşgullanýar. Diýmek, kwant we optiki elektronika bir-biri bilen aýrylmaz baglanyşykly ylymlardyr.

Ili bilen dersiň bütün dowamynda ulanyljak esasy düşüňjeleriň we kesgitlemeleriň sanawyna seredeliň.

**Optiki şöhlenme** – optiki çäkdäki elektromagnit tolkunlydyr.

**Spektriň optiki çägi** – tolkun uzynlygy 1 mm-den 1 nm aralykda ýerleşen elektromagnit yrgyldylarydyr.

Şunlukda, **görüňän spektre**  $\lambda=0,38$  mkm –den  $\lambda_0=0,78$ mkm, **infragyzyl spektre**  $\lambda=0,78$ mkm÷1000mkm, **ultramelewşe spektre**  $\lambda=0,001$ ÷0,38mkm degişlidir.



jisimlerin düzümine girýän elektronlar bilen özara tasirini öwrenýän we şunlukda alnan bilimlerin esasynda dürli tolkun uzynlykdaky we dürli maksatlar üçin niýetlenen kwant gurluşlaryny döredýän fizikanyň bir bölümidir.

**Optiki elektronika** – optiki şöhlelenmäniň maddalar bilen özara täsir proseslerini maglumaty (informasiýany) aralyga bermek, kabul etmek, täzeden işlemek, saklamak we görkezmek üçin derneýän we ulanyan ylmyň we tehnikanyň bir bölümidir.

Başgaça aýdanymyza, optiki elektronika ýokarda agzalan derňewlerin netijesinde (esasynda) informatikanyň maksatlary üçin abzallary we gurluşlary döredýändir.

Optiki elektronika optikanyň we elektronikanyň yönekey jemi dälde, eýsem olaryň utgaşydyr, optiki elektronikanyň gurluşlarynyň esasy aýratynlygy olarda elektron we optiki usullaryň diňe golaý bolman, eýsem bir-biri bilen eriş-argaç bolup integrirlenmegidir.

Elektronikada maglumat elektrik togunyň impulsalary arkaly äkidilýändir, elektrik togy bolsa, bilşimiz ýaly elektronlaryň akymydyr. Diýmek, elektronikada maglumatyň elementar görterijisi elektrondyr.

Optikada bolsa şeýle görteriji kwantlardyr. Şöhlelenmäniň görünýän bölegi üçin – fotonlardyr. Optoelektroniki gurluşlarda informatika üçin

### 1.7-nji surat

Örän güýçli ýokary konsentراسiýaly garyndy girizilmek ýarymgeçiriji üçin  $N_d \gg N_g$  ýa-da  $N_a \gg N_w$ .

$$E_{fn} - E_n = 1,2kT \left( \frac{N_g}{N_n} \right)^{2/3}$$

$$E_n - E_{fp} = 1,2kT \left( \frac{N_n}{N_w} \right)^{2/3}$$

Mysal üçin,

$$N_g = 10^{20} \text{ sm}^{-3} \quad T = 300K$$

$S_i$  ýarymgeçirijide  $E_{fn} - E_n = 0,07eV$  Bu baha temperatura bagly däl. Şeýlelikde, güýçli wyrozdýonnyý ýarymgeçirijide esasy zaryad äkidijilerin konsentراسiýasy, Fermi derejesi temperatura bagly däl.

### Dreýf we diffuzion hereketler

Dreýf we diffuziýa ýarymgeçirijilerde zaryad äkidijilerin dürli görnüşli ugrukdyrylan hereketidir. Ýokarda belläp geçişimiz ýaly ugrukdyrylan hereket diňe erkin zaryad äkidijiler üçin mümkindir.

Giňişlikde zarýad äkidijileriň paýlanyşy deňölçegli bolsa we daşky elektrik meýdany bolmadyk ýagdaýda erkin zarýad äkidijiler tertipsiz hereket edýärler (gazlara meňzeşlikde). Ýylylyk hereketde erkin ylgawyň ýarymgeçirijiniň yrgyldaýan atomlarynda garyntgylaryň ionlaşdyrylan atomlarynda we beýleki defektlerde olaryň dargama prosesleri bilen kesgitlenilýär.

Dargamada zarýad äkidijileriň energiýasy we ugry üýtgäp biler we fononlaryň oýandyrylmasyna ýa-da ýuwdulmasyna getirýär.

Erkin ylgawyň ortaça uzynlygy  $l = \bar{g}_t \bar{t}_n$ , nirede  $\bar{t}_n$  -erkin ylgawyň ortaça wagty,

$$W_t = \sqrt{3kT/m} \quad (1.6)$$

Ýylylyk haotiki hereketiň ortaça energiýasy ; m-zarýad äkidijileriň effeektiw massasy. Haotiki hereketde zarýad äkidijileriň tizlikleriniň ugry deňähtimaldyr we rok nola deňdir. Eger ýarymgeçirijide elektrik meýdan döredilen bolsa, onda haotiki hereketden başga-da ugrukdyrylan hereket hem ýüze çykýar. Elektriki meýdany tarapyndan döredilen ugrukdyrylan ýarymgeçirijiniň zarýad äkidijileriň hereketine dreýf hereketi diýilýär.

zarýadsyzlanmanyň aşakdaky şertlerine bagly: zarýadsyzlanma togy, garyndynyň düzüjileriniň gatnaşygy, garyndyň basyşy we zarýadsyzlanma turbajygyň diametrine bagly. Zarýadsyzlanma togunuň artmagy bilen plazmadaky elektronlaryň dykzlygy artýar. Kiçi basyşlarda (1-2 mm. sim. süt) garyndyň basyşynyň artmagy bölejikleriň sanynyň artmagyna getirýär. Generasiýanyň şöhlelenme kuwwatyny almakda esasan gazozarýadsyzlanma trubkanyň diametri uly orun tutýar.

Generasiýa režimligini almak üçin işjeň gurşawy oňyn ters baglanyşygy emele getirmek üçin ulanylýan optiki rezonatorda ýetleşdirýarlar.

Köplenç gaz lazerinde rezonator hökmünde Fabri-Pero interferometrine meňzeş sistema ulanylýar. Ýöne gaz gurşawyň ýokary birhilligi esasynda ol generirlenýän şöhläniň tolkun frontuny ýoýulma sezewar etmeýär. Şonuň bilen ýokary derejede He-Ne lazeriniň şöhlelenmesiniň spektral düzüjisi kesgitlenilýär.

## 6.6 Mazerler

Kwant elektronikasynyň esaslaryna bagyşlanan umumy okuwlaryň başynda onuň kesgitlemesini bereliň.

**Kwant elektronika** – elektromagnit şöhlelenmesiniň atomlaryň, molekulalaryň, gaty

Indi gös-göni käbir gaz lazerlerini seretmeklige geçeliň. Gaz lazerleriniň ilkinjisi bolan He-Ne lazerinden başlalyň.

Onuň işjeň maddasy hökmünde He-Ne gazlaryň garyndysy ulanylýar. Bu tipli OKG-lar giň ýaýrandyr. He-Ne energetik derejeleriň shemasy ulanylýar.

He-niň esasy halynyň termy S diýip belenilýär. He – atomy üçin hakyky L – S – baglanyşyk, onuň oýandyrylan hallary jemleýji S, L, I He – atomyň aşaky oýandyrylan hallary bolup 2 Si, SO hyzmat edýär, olaryň energiýasy 19,8 we 19,6 eW.

Zarýadsyzlanma özünde He – gazyny 1 mm. Sim. Süt basyşdaky gaz garyndysynda ýanýar. Zarýadsyzlanmadaky kesgitli energiýa eýe elektronlar He we Ne oýandyrylan hala geçirilýärler. He-niň metostabil atomlarynyň zarýadsyzlanmada bolmagy olaryň tolgunmasynyň tolgundyrmasy bolmadyk atomlara geçmesi bolýar. He-Ne – hallarynyň energiýa tapawudy takmynan 300-400sm.

Iň uly güýçlendiriş  $\lambda = 3,39$  mkm geçişe degişlidir, ýagny 1mm uzynlykly trubkada şöhlendiriş 100 esse artýar.  $\lambda = 1,15$  mkm çyzykda generasiýany amala aşyrmak kynyrak.  $\lambda = 0,63$  mkm çyzyk generirlemesi iň kyn hasap edilýäni, ýone onuň şöhlisiniň görünýän diapazona düşýänligi sebäpli ol praktikada diňden ulanylýar.

Inwersiýa döretmegiň we degişlilikde generasiýanyň kuwwatyny emele getirmeklik

Dreýf tizligi- bu tizlik elektrik meýdanyň güýjenmesiniň wektorynyň ugruna ugrukdyrylan tizlige aýdylýar. (hemme zarýad äkidijiler boýunça ortaça “n”, “p” geçirijilikli ýarymgeçirijiler). Eger-de zarýad äkidijiler iki yzygiderli özara täsir etmäniň dargadyjy merkezli deňtizlenmeli bolsa, onda dreýf tizligi

$$\overline{g}_{dr} = t_n q \varepsilon / m = \mu \varepsilon \quad (1.7)$$

Nirede “m” erkin zarýad äkidijileriň effektiw massasy;  $\varepsilon$  -elektrik meýdanyň güýjenmesi;  $q$  -elektronyň zarýady;

Proporsionallyk koeffisiýenti “ $\mu$ ” dreýf tizligiň we elektrik meýdanyň güýjenmesiniň arasyndaky “ $\mu$ ” dreýf hereketiň esasy parametri bolup hyzmat edýär we hereketlilik diýip atlandyrylýar.

Hereketlilik  $1W/sm$  birlik güýjenmeli elektrik meýdanda erkin zarýad äkidijiler tarapdan alnan dreýf tizligini häsiýetlendirýär. Ölçeg birligi  $sm^2/(W * s)$ .

Hereketlilik erkin zarýad äkidijileriň effektiw massasyna baglydyr we elektronlar, deşikler üçin dürli baha eýe bolýarlar. Elektronlaryň hereketliliği

deşikleriňkiden köpdür. Mysal üçin  $S_i$ .  $\mu_n \geq 2\mu_p$ ,  
*GaAs*  $\mu_n \gg \mu_p$ .

Elektronlaryň we deşikleriň hereketlilikini bilip  $\mu_n$ ,  
 $\mu_p$  elektronlaryň we deşikleriň dreýf togunyň  
 dykzlygynyň aňlatmasyny ýazmak bolar.

$$j_{ndr} = qn\mathcal{G}_{ndr} = qn\mu_n \varepsilon ;$$

$$j_{pdr} = qp\mathcal{G}_{pdr} = qp\mu_p \varepsilon ;$$

Elektronlaryň we deşikleriň dreýf togunyň  
 dykzlygynyň jemi:

$$j_{dr} = q(n\mu_n + p\mu_p) \varepsilon \quad (1.9)$$

Bu aňlatma Omuň kanunynyň differensial görnüşidir.  
 Ýarymgeçirijileriň göwrümünde erkin zarýad  
 äkidijileriň tertipsiz paýlanyşy sebäpli ýüze çykarylan  
 ugrukdyrylan herekete diffuzion hereket diýilýär.  
 Diffuziýa erkin zarýad äkidijileriň elektriki zarýadlary  
 bilen bagly däl. Diffuziýa neýtral bölejiklerde,  
 mysal üçin gazlardaky ýaly ýüze çykarylýar we  
 tertipsiz ýylylyk hereketi bilen baglanyşyklydyr.  
 Diffuziýanyň teoretiki esasy Finiň kanunydyr. Şol  
 kanuna görä erkin zarýad äkidijileriň akymynyň  
 dykzlygy  $\Pi \text{ (sm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$  konsentrasiýanyň

$$n^* = \frac{KN^*}{KN_0} \cdot n_0 = \frac{N^*}{N_0} \cdot n_0 \quad (15.6)$$

Şeýlelikde, gaz işjeň maddalary üçin häsiýetli  
 bolan oýandyrma energiýasyny çaknyşmalaýyn  
 bermek prosesi (15.2) şert ýerine ýetende netijelidir.  
 Öz gezeginde N ggörnüşli bölejikleri oýandyrmak  
 arkaly n bölejikleriň esasynda lazer döredilende  
 ýokardaky (15.2) proses (15.6) şert ýerine ýetende has  
 hem netijelidir. Agzalan usul bilen lazer  
 şöhlelenmesini almak prosesi iki bölekleyin bolup  
 geçýär. Ilki ol ýa-da beýleki usul bilen kömekçi garyň  
 bölejikleri oýandyrylýar we olar artykmaç energiýany  
 göteriji hem-de oýandyrma energiýasynyň donory  
 hökmünde çykyş edýärler. Soňra maýyşgak däl  
 çaknyşmalaryň netijesinde energiýa işçi gazyň  
 bölejiklerine-akseptorlara geçirilýär. Şeýlelik bilen  
 olaryň ýokarky lazer derejeleri doldurylýar. Kömekçi  
 gazyň ýokarky derejeleriniň hususy ýaşaýyş wagty uly  
 bolmalydyr, şonda energiýa oňat toplaýar. Seredilýän  
 prosesiň shemasy Çyzg. 15.1 görkezilendir.

Ýokardaky usul giň ýaýrandyr, sebäbi  
 oýandyrmanyň ähli görnüşlerinde (elektrik  
 zarýadsyzlanma, himiki, gazdinamiki we ş.m.)  
 köplenç oýandyrma energiýasyny ilki bilen gös-göni  
 şöhlelenýän bölejiklere däl-de, energiýany ýeňil  
 ýuwudýan we ony “höwes bilen” degişli bölejiklere  
 berýän donora siňdirmek amatly bolýar.

çaknyşýan bölejikleriň tizligi,  $\sigma$  – energiýany beriş prosesiniň kese-kesigi.

(15.3)-de ters proses  $N + n^* \rightarrow N^* + n$  hem göz-öňüne tutulan.

$N$ ,  $N^*$  we  $n$ ,  $n^*$  üçin bölejikleriň sanynyň saklanmak kanuny ýerine ýetýändir:

$$n + n^* = n_0, \quad N + N^* = N_0 \quad (15.4)$$

Onda (15.3)-den:

$$\begin{aligned} \frac{dn^*}{dt} &= -\frac{n^*}{\tau} + K[N^*(n_0 - n^*) - n^*(N_0 - N^*)] = \\ &= \frac{n^*}{\tau} + K[N^*n_0 - N^*n^* - n^*N_0 + n^*N^*] = \\ &= -\frac{n^*}{\tau} + k(N^*n_0 - n^*N_0) \end{aligned}$$

Stasionar şertlerde:  $\frac{dn^*}{dt} = 0$

$$\begin{aligned} \frac{n^*}{\tau} &= K(N^*n_0 - n^*N_0), \\ \frac{n^*}{\tau} + n^*N_0K &= KN^*n_0, \\ n^* &= \frac{KN^*}{\frac{1}{\tau} + N_0} \cdot n_0 \end{aligned}$$

(15.5)

$KN_0 \gg \frac{1}{\tau}$  bolanda donorlary oýandymagyň

berlen şertlerinde aksentorlary oýandymaklygyň max derejesi alynýar.

gradiýentine proňpotsionaldyr ters belgili alnan, sebäbi diffuzion akym zarýad äkidijileriň az konsentrasiýaly tarapyna ugrukdyrylan.

Bir ölçegli ýagdaýda elektronlar üçin

$\Pi = -D_n \left( \frac{d_n}{d_x} \right)$ , nirede  $D_n$  -proporsionallyk koeffisiýenti ýa-da elektronlaryň diffuzion koeffisiýenti diýilýär ( $\frac{sm^2}{s}$ ). Akymyň dykzlygyny elektronyň (-) zarýadyna köpeldip ýa-da deşigiň (+) zarýadyna diffuzion toguň dykzlygyny elektronlar we deşikler üçin

$$j_{ndf} = qD_n \left( \frac{d_n}{d_r} \right); \quad j_{pdf} = -qD_p \left( \frac{d_p}{d_x} \right) \quad (1.10)$$

Bu ýerde  $D_p$  - deşikleriň diffuzion koeffisiýenti.

Dreýf we diffuzion hereketleriň parametrleri özaralarynda Eýnşteýniň gatnaşygy bilen baglydyr.

$$D_n = (kTq)\mu_n = \varphi_t \mu_n; \quad D_p = (kTq)\mu_p = \varphi_t \mu_p \quad (1.11)$$

Bu gatnaşyklar diňe wyrozdennyý däl ýarymgeçirijiler üçin deňagramly ýagdaýda ýerine ýetirilýär.

Eýnşteýniň gatnaşygynyň ýönekeý manysy bardyr: Erkin zaryad äkidijileriň ugrukdyrylan hereketi tarapyndan ýüze çykarylan sebäplere garamazdan özleriniň hereket ugrunda şol bir defektler bilen duşýarlar we olarda dargaýarlar. Şol sebäpli dreýf we diffuzion esasy parametrleriň arasynda “  $\mu_n$  ” “  $D$  ” göni proporsionallyk emele gelýär. 2- nji gatnaşyga görä proporsionallyk koeffisiýenti  $\varphi_i = \frac{kT}{q}$  potensialyň ölçeg birligine eýe bolýar. (wolt) we ýylylyk potensialy diýip atlandyrylýar.

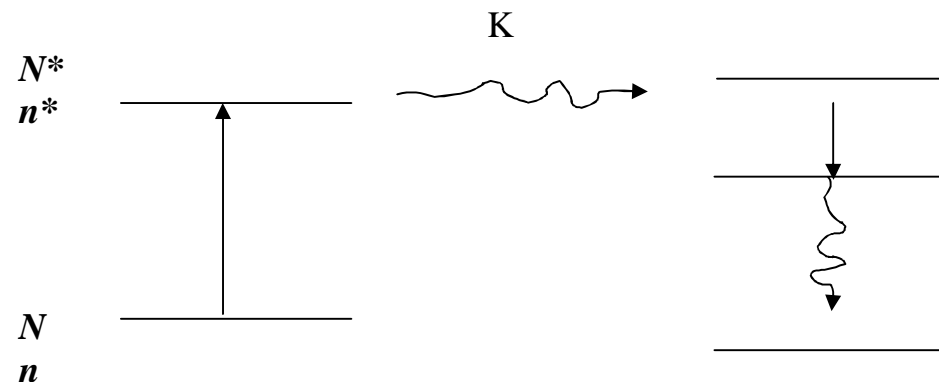
Otag temperaturasynda  $\varphi_i = 0.026W = 26mW$

Garyntgylaryň deňölçegli paýlanylmadyk ýagdaýda erkin zaryad äkidijileriň diffuziýasy ýarymgeçirijiniň aýry böleklerinde elektriki neýtrallygyň bozulmagyna getirýär we içki elektriki meýdany ýüze çykýar. Biz n-tipli geçirijilikli ýarymgeçirijilerde donorlaryň deňölçegli däl paýlanylan ýagdaýyna seredeliň. Belli işçi temperaturada donorlaryň doly ionlaşmagynda ( $n = N_g$ ) elektronlar hem deňölçegli däl paýlanylan, ýagny ugrukdyrylan diffuziýanyň ýüze çykmagyna we onuň az konsentrasiýaly tarapa ugrukdyrylandyr. Ýokarlandyrylan konsentrasiýaly oblastda birnäçe böleginiň pes oblata geçmegi sebäpli kompensirlenmedik polozitel göwrüm zaryady ýüze çukýar, donorlaryň ionlary, emma donorlaryň

energiýasyny alýan (akseptorlaryň) dykyzlygy, (\*) ýyldyzjyk degişli bölejigiň oýandyrylmagyny aňladýar. Ýokarda agzalan prosesin has netijeli bolmagy üçin, her çaknyşmada sistema berilýän (ýa-da sistemadan alynýan) energiýa bir bölejigiň ýylylyk hereketiniň orta  $kT$  energiýasyndan uly bolmaly däldir. Ýa-da başgaça

$$|E_{N^*} - E_{n^*}| \ll kT \quad (15.2)$$

Bu ýagdaýda oýandyрма energiýasynyň rezonans berilmesi bolup geçýändir. Umumy ýagdaýda (1) hadysa aşakdaky tizlik deňlemeleri arkaly aňladylýar:



Çyzg. 15.1

$$\frac{dn^*}{dt} = -\frac{n^*}{\tau} + K(N^*n - n^*N) \quad (15.3)$$

$\tau$  – relaksasiýa wagty, oýandyрма energiýasyny beriş tizliginiň hemişeligi üçin bolsa  $K = \langle \sigma v \rangle$ ,  $v$  –

energiýasyna, gazyň basyşyna, zarýadsyzlanma turbajygyň diametrine we zarýadsyzlanmadaky potensialyň gradiýentine.

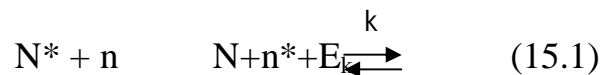
Berlen atomyň ionizasiýasynyň potensialy näçe uly bolsa, şonça-da onuň energetik hallary ýokarda ýerleşen bolýar. Şonuň üçin elektronlaryň energetik ýitgileri kiçi, temperaturalary uly bolýar.

Basyşyň artmaga plazmadaky bölejikleriň konsentrasiýasynyň artmagy bilen baglanyşyklydyr.

Zarýadsyzlanma plazmasyndaky zarýadlanan bölejikleriň ýitmeginiň sebäbi bolup, olaryň zarýadsyzlanma turbasynyň diwaryna çökmegidir.

Elektron temperaturasy gaz ionizasiýasyna göni we gaz basyşynyň gazozarýadsyzlanma diwarynyň diametrine bolan köpeltmek hasylyna test baglydyr.

Gazlar üçin maýyşgak däl çaknyşmada bölejikleriň bir görnüşiniň beýleki görnüşine oýandyrma energiýasyny bermekligi häsiýetlidir. Energiýanyň şeýle alyş-çalyşynyň netijeliligi bölejikleriň energiýa derejeleriniň gabat geliş takyklygyna gös-göni baglydyr. Eger-de energiýa derejeleri gabat gelmeýän bolsa, onda Gu proses Ek kinetik energiýanyň bölünip çykmasy (ýuwdulmasy) bilen utgaşýandyr:



bu ýerde  $N$  – oýandyrma energiýasyny berýän bölejikleriň (donorlaryň) dyklyzlygy,  $n$  – oýandyrma

konsentrasiýasynyň az oblastynda – otrisatel zarýad äkidijiler. Şonuň üçin içki elektriki meýdany ýüze çykýar, bu meýdan elektronlaryň mundan beýläk diffuziýasyna päsgel berýär. Bu meýdan dreýf toguny ýüze çykarýar, diffuzion toga garşy ugrukdyrylan. Deňagramlyk ýagdaýda bu iki tok biri-biri bilen kompensirlenýärler we doly tok nola deňdir. Şol sebäpli deňagramlyk şerti şeýle görnüşe eýe bolýar:

$$qD_n \left( \frac{d_n}{d_x} \right) + qn\mu_n \varepsilon = 0 \quad (1.12)$$

nirede

$$\varepsilon = -\left( \frac{\varphi_i}{n} \right) \left( \frac{d_n}{d_x} \right) \approx -\left( \frac{\varphi_i}{N_g} \right) x \left( \frac{dN_g}{d_x} \right) \quad (1.13)$$

- içki elektrik

meýdanyň güýjenmesi. Donorlaryň gradiýent konsentrasiýasynyň we temperaturanyň ösmegi içki elektriki meýdanyň ulalmagyna getirýär. Ýarymgeçiriji abzallar taýýarlanylanda diffuziýa usuly bilen ýarymgeçirijilerde garyntgylaryň girizilmegi giňden ulanylýar.

### Ýarymgeçirijilerde diffuzion prosesler Üznüksizligiň deňlemesi

Haýsy hem bolsa daşarky güýjüň täsiri astynda deňagramly zarýad äkidijiniň konsentrasiýasyndan gyşarýan wagtyndaky ýarymgeçirijiniň özüni alyp

barşyna seredeliň. Bu ýagdaýda erkin elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy giňişlik koordinatalaryň we wagtyň funksiýasy bolýarlar, ýagny  $n(x, y, z, t)$  we  $p(x, y, z, t)$  we wagtyň tizliginiň üýtgemegi üznüksizlik deňlemäniň kömegi bilen aňladyp bolar.

Üznüksizligiň deňlemesini diňe bir ölçegli nusga üçin hem konsentrasiýa “ $x$ ” oky boýunça üýtgeýär. Şu ýarymgeçirijide kese-kesiginiň meýdany  $1^2 sm$   $dx$  gatlagy bölüp alalyň. Bu gatlagyň göwrümi  $dx$  deň bolar. Goý  $t$  wagtda elektronlaryň konsentrasiýasy  $n(x, t)$  onda  $dx$  göwrümde elektronlaryň sany  $n(x, t)dx$  bolar.  $t + dt$  wagtda elektronlaryň mukdary  $n, t + dt, dx$  we  $dt$  wagtda elektronlaryň sanynyň üýtgemegi  $dx$  göwrümde:

$$n(x, t + dt)dx - n(x, t)dx = \frac{\partial n}{\partial t} dx dt$$

(1.14)

Elektronlaryň sanynyň üýtgemegi generasiýanyň, rekombinasiýanyň netijesinde bolup biler, mundan başga-da zarýad äkidijileriň diffuziýasynyň dreýfiniň barlygy hem sebäp bolup biler

1. Walent zonadaky, lokal garyntgy energetiki derejelerdäki ýa-da, ýelmeşilen merkezlerdäki

tokdaky zarýadsyzlanma ulanylýar we elektrodlara hemişelik naprýaženiýe berilýär.

Onuň esasynda haotik hereketiň orta energiýasy artýar, emma dürli bölejikler üçin orta energiýanyň artmagy dürli bolar. Elektronlar atomlar bilen maýyşgak çaknyşanda öz energiýasyny massalar tapawudynyň uly bolanlygy üçin bermeýärler. Ionlar bolsa atomlar bilen energiýalaryny intensiw çalyşýarlar. Şonuň üçin olaryň orta temperaturasy elektronlaryňkydan kiçidir. Neýtral atomlar elektrik meýdan bilen tizlenmän ionlar bilen maýyşgak özara täsirindäki energiýada işlemeýärler.

Ionlar bolsa atomlar bilen energiýalaryny intensiw çalyşýarlar, şonuň üçin olaryň orta temperaturasy elektronlaryňkydan kiçidir. Neýtral atomlar elektrik meýdan bilen tizlenmäni, ionlar bilen maýyşgak özara täsirindäki energiýa eýe bolýarlar. Neýtral atomlaryň energiýasy hemme wagt zarýadlanan bölejikleriň hereketleri bolsa haotik bolýar.

Elektronlaryň orta kinetik energiýasyny häsiýetlendirýän temperatura parametr hökmünde maýyşgak däl proporsiyanyň intensiwligini kesgitlemekde uly rol oýnaýar. Elektron temperatura näçe uly bolsa tolgunma we ionlaşma prosesleriň intensiwligi artýar.

Elektron temperatura zarýadsyzlanmanyň aşakdaky parametrlrine baglydyr: gaz ionlaşmanyň



tizlenýärler. Maýyşgak özara täsiriň hasabyna bu energiýa neýtral bölejiklere berilýär, ugrykdyrylan hereketleri bolsa haotige öwrülýär.

## 6.5 Lazer şöhlenmesi

Kwant elektronikasynyň enjamlary diýilende ilki bilen haýsy hem bolsa bir görnüşli optiki kwant generatorly laser göz önüne tutlýar. Şonuň üçin biz şu okuwdan başlap, dürli işjeň maddalarda işleýän lazerler bilen meşgullanjakdyrys. Olardan aýratyn gyzyklanma döredýänleri-bu gaz lazerleridir.

Elektrodlar ýagdaýda gaz zaryadsyzlanma turbajygynyň da ýüzünde ýerleip bilýär. Emma ýokary ýygyllykly zaryadsyzlanmany ulanmaklygyň z ýetmezçiligi bar, ýokary ýygyllykly meýdanyň turbajygy ýokary derejede gmaça gaz blünmekligine we güýçli radiogalmagallary emele getirýär. Şoňa esaslanyp nümçilikde diňe hemişelik akymdaky zaryadsyzlanma ulanylýar we elektrodlara hemişelik

derejeleriň elektronlaryň geçiriji zona geçiş prosesiniň ähli mehanizmine generasiýa diýip atlandyrylýar.

Hemme ýagdaýda ýylylygyň we daşarky güýçleriň täsiri astyndaky erkin zaryad äkidijileriň generasiýasyny göz önüne tutmaly. Daşky täsirler: ýagtylyk, ýadro bölejikleri, deňagram däl şöhlelenme (ýarymgeçirijiler özi goýberip bilýär). Iki hili generasiýanyň tizligini  $g$  we  $g_0$  bile belläliň, onda

generasiýanyň doly tizligi  $g_0 + g$  bolar.

Seredilýän ýagdaýda elektronlaryň oýandyrylmasy ýagtylygyň täsiri astynda bolup geçýär diýip hasap edeliň we  $1 \text{ cm}^2$  meýdanda  $1 \text{ sek}$  wagtda ýagtylyk tarapdan döredilýän elektron-deşikler jübütleriň sany “ $g$ ” deňdir. Onda  $dt$  wagtda  $dx$  göwrümde ýagtylyk tarapdan döredilen elektronlaryň sany:

$$g \, dx \, dt \quad (1.15)$$

2.  $dx$  göwrümde zaryad äkidijileriň sany rekombinasiýanyň netijesinde üýtgäp hem biler. Rekombinasiýanyň doly tizligi  $r_0 + r$ ,  $r_0$  - ýylylyk deňagramlyk ýagdaýdaky rekombinasion geçişleri tizligi we  $r$  - daşky täsirleriň astyndaky rekombinasiýanyň tizligi. Bu ýagdaýda haçanda  $\tau_n$  -

deňagram däl elektronlaryň ýaşaýyş wagty, olaryň konsentrasiýasy  $\Delta n = n - n_0$ ,  $dx$  göwrümde  $dt$  wagtda rekombinasiýa netijesinde elektronlaryň sanynyň üýtgemegi bipolýar generasiýa görä alarys:

$$rdxdt = -\left(\frac{dn}{dt}\right)_r dxdt = \frac{n - n_0}{\tau_n} dxdt \quad (1.16)$$

3.  $dx$  göwrümde zarýad äkidijileriň mukdarynyň üýtgemegi diffuziýanyň we dreýfiň kömegi bilen hem bölüp biler. Eger  $I_n(x, t)$  1sek wagt içinde we  $1 \text{ sm}^2$  üste geçýän elektronlaryň sany bolsa, onda  $dt$  wagtda “ $X$ ” gatlagyň çägi arkaly  $dx$  göwrümde  $I_n(x, t)dt$  elektronlar girer.

Emma  $x + dx$  çäkden  $I_n(x + dx, t)dt$  elektronlar çykar. Diýmek,  $dx$  göwrümde ini akymyň netijesinde elektronlaryň sanynyň üýtgemegi:

$$I_n(x, t)dt - I_n(x + dx, t)dt = -\frac{\partial I_n}{\partial x} dxdt \quad (1.17)$$

Elektronlaryň sanynyň doly üýtgemegi :

zarýadsyzlanmalarynda 3 sany maýyşgak özara täsiri tapawutlandyrmak mümkin:

1. elektronlaryň arasynda;
2. agyr bölejikleriň arasynda;
3. elektronlar bilen agyr bölejikleriň arasynda.

Maýyşgak çaknyşmaklary netijesinde plazmanyň bölejikleri impulsalary we energiýalary bilen çalyşýarlar.

Şunlukda iki bölejigiň jemleýji energiýasy we impulsy üýtgemeyär. Meňzeş bölejikleriň kinetik energiýalaryny bir-birine bermegi, stasionar režimde bölejikleriň tizlik (energiýa) boýunça bölünişine eltýär (impulsalaryny bir-birine bermekleri netijesinde bölejikleriň hereketi izotrop bolmaga ymtylýar).

Plazma üçin  $P = 0,1 \text{ mm.sim.süt}$  basyşda häsiýetlendiriji režim ýüze çykýar. Bu režimde bölejigiň erkin ylgaw ýaly zarýadsyzlanma turbajygyň radiusyndan köp esse kiçidir. Şeýlelikde bölejik diwara diňe başga bölejikler bilen çaknyşmagy netijesinde ýeter. Bu režime diffuzion režim diýilýär. Eger-de bu režimde maýyşgak özara täsirler agdyklyk etse, plazmanyň islendik uçastogunda (böleginde) bölejikleriň tizlik boýunça paýlanyşygy çykýar. Bu paýlanyşyk diffuzion režimiň agyr bölejikleri we ionlar üçin hemme wagt dogrudyr. Emma maýyşgak däl prosesleriň köpüsi elektronlara degişlidir. Zarýadsyzlanma ýagdaýynda zarýadlanan bölejikler goşmaça energiýa eýe bolup elektrik meýdanynda

gurşawyňň bölejikleriniň özara lazer proseslerini öz içinde alýar. OKG-da gaz zaryadlyzlanmasynyň görnüşleriniň klassifikasiýasyny geçireliň.

Impuls zaryadlyzlanmasynda tok diňe kiçi wagt interwalynda akyp geçýär. Bu ýagdaýda inwersiýa döretmek prosesleri stasionar däl plazmanyň häsiýetleri bilen baglanyşykly: inwersiýanyň özi bolsa impuls togunyň frontunda ýa-da pese gaçmagynda ýüze çykýar. Düzgün bolşy ýaly impoulsdaky togyň dykzlygy ( $10^3$  A/sm<sup>2</sup>) ýokary bahalar bilen häsiýetlendirilýär. Gaz lazerinde ulanylýan stasionar ýa-da üznüksiz zaryadlyzlanmany köreýän we duga şekilli zaryadlyzlanmalara bölüp bolýar. Duga şekilli zaryadlyzlanmanyň esasy häsiýetli tarapy toguň uly dykzlygy ( $10^3$  A/sm<sup>2</sup>) we gazyň ýokary temperaturasydyr, ionizasiýanyň derejesi bolsa 10% ýetýär. Bu görnüşli zaryadlyzlanma ion lazerlerinde ulanylýar.

Plazma zaryadlanmasyndaky bölejikleriň özara täsir proseslerini 2 topara bölýärler. Bölejikleriň özara täsiri netijesinde kinetik energiýalaryň jemi üýtgemeýän bolsa, ol özara täsire maýyşgak diýilýär. Eger-de özara täsir prosesinde kinetik energiýanyň jemi üýtgeýän bolsa, oňa maýyşgak däl özara täsir diýilýär. Bu ýagdaýda sistemanyň kinetik energiýasynyň üýtgemesi bölejigiň içki energiýasynyň üýtgemesine gabat gelýändir. Gaz lazerleriniň

$$\frac{\partial n}{\partial t} dxdt = g dxdt - \frac{\partial I_n}{\partial x} dxdt - \frac{n - n_0}{\tau_n} dxdt$$

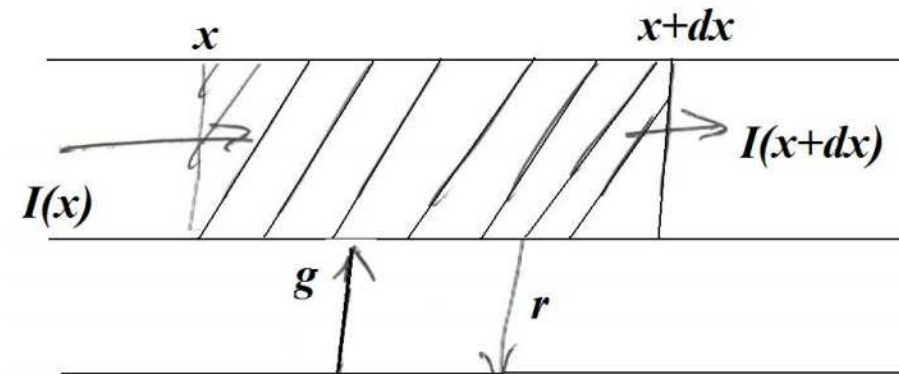
**(1.18)**

Bu ýerden: 
$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - \frac{\partial I_n}{\partial x} - \frac{n - n_0}{\tau_n}$$

üznüksizligiň deňlemesi diýip atlandyrylýar.

Üznüksizligiň getirilip çykarylyşyna degişli

Deşikli zaryad äkidijiler üçin hem meňzeş deňlemäni ýazyp bileris:



**1.8-nji surat**

$$\frac{\partial p}{\partial t} = g - \frac{\partial I_p}{\partial x} - \frac{p - p_0}{\tau_p}$$

Elektronlaryň  $I_n$  we deşikli zarýad äkidijileriň  $I_p$  akymyny toguň dykyzlygy arkaly aňlatmak bolar:

$$j_n = -ej_n \text{ we } j_p = -ej_p$$

Haçanda zarýad äkijileriň konsentrasıýasy  $(x, y, z)$  koordinatalara görä funksiýa bolýan bolsa, onda üznüksizligiň deňlemesi degişli toklaryň üsti bilen şeýle ýazylar:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g + \frac{1}{e} \operatorname{div} j_n = \frac{n - n_0}{\tau_n} \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = g - \frac{1}{e} \operatorname{div} j_p - \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad (1.21)$$

$$\operatorname{div} j = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z}$$

Stasionar ýagdaýda elektronlaryň we deşikleriň konsentrasıýasy wagt boýunça üýtgemeyär, ýagny  $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$ . Üznüksizligiň deňlemesi bir ölçegli ýagdaýda şeýle görnüşe eýe bolýar:

geçýän ýagtylygyň intensiwliginiň artmagy bilen, daşyna çykýan ýagtylygyň intensiwligi hem artýar.

Ýarymgeçiriji lazerleriniň içinde iň giňden peýdalynylýanylanyň biri arsenid-galliý esasyndaky inžeksion lazerlerdir.

Gaz OKG-sy, ýada gaz lazeri işjeň madda hökmünde gaz ýa-da gaz garyndysyny ulanýar. Ilki bilen gazlaryň energetik spektriniň aýry-aýry atomlaryň we molekulalaryň energetik derejelerine laýyk gelýänligini nugtalyň. Bu häsiýet dürli gazlarda bolup geçýän energetiki geçişleriň shemasyny öňünden aýtmaga mümkinçilik berýär. Netijede infragyzył oblastdan, ultramelewşe oblata çenli diapozonda işleýän gaz lazerleri döredildi. Gazlaryň başga bir aýratynlygy- bu olaryň ýokary optiki birhililigidir (bu bolsa gaz laserlerinde ýokary monokromatikligi we ýiti ugrukdyrylyşy almaga mümkinçilik berýär). Şöhledenme çyzygynyň giňligi gersiň birnäçe birliklerine, dargaýyş derejesine bolsa birnäçe burç sekuntlaryna çenli eltilip bilner.

Gazlaryň aýratyn häsiýeti- bu olarda inwersiýany emele getirýän fiziki prosesleriň köpgörnüşliligidir. Bu proseslerde atomlaryň maýyşgak däl çaknyşmalary, molekulalaryň dissosiýasy, atomlaryň elektron urgusy, ýagtylyk, himiki reaksiýalar arkaly oýandyrylma we ş.m. girýärler. Emma gaz lazerleriniň köpüsünde inwersiýa gaz zarýadsyzlanmaşynyň plazmasynda emele gelýär. Gaz zarýadsyzlanmasy

derejeden aşaky derejä geçişi, ýygylgy  $v$  bolan ýagtylygyň täsiri esasynda bolýar.

$$v = \frac{(E_n - E_p)}{\hbar}$$

(14.4)

Bu ýerde göýberilýän energiýa  $E_n - E_p$ , täsir eden ýagtylyk energiýasyna goşulyp onuň amplitudasy artar. Şeýlelikde ýagtylygyň güýçlenmesi ýüze çykýar. Termodinamiki deňagramlyk ýagdaýynda energiýa boýunça aşakdaky derejeler, ýokarky derejelere seredeniňde elektronlar bilen köp doldurylandyr. Munuň tersine, haçanda ýokarky dereje, asakdaka seredeniňde aşad doldurylan bolsa (inwersiýa zaselennosti), şeýle gurşaw aktiw gurşaw diýilip, ol diňe ýarymgeçiriji deňagramlykdan çykan ýagdaýynda mümkin. Lazerlerde ýagtylyk tolkunyny aýnalarydan serpilip gaty köp gezek aktiw gurşawdan geçýär. Eger ýagtylyk tolkunyny aýnalarydan serpilende, aktiw gurşawdan geçendäki alýan energiýasyndan az energiýa ýitirýän bolsa, onda onuň intensiwligi ýuwaş-ýuwaşdan artýar. Şeýlelikde ýagtylygyň intensiwligi lawina boýunça güýçlenip, generirlenme emele geler. Her gezek aýnadan serpilende ýagtylyk şöhlesiniň bir bölegi aýnadan geçýär. Şol sebäpli aktiw gurşawdan

$$-\frac{1}{e} \frac{\partial j_n}{\partial x} = g - \frac{n - n_0}{\tau_n}$$

$$\frac{1}{e} \frac{\partial j_p}{\partial x} = g - \frac{p - p_0}{\tau_p} \quad (1.22)$$

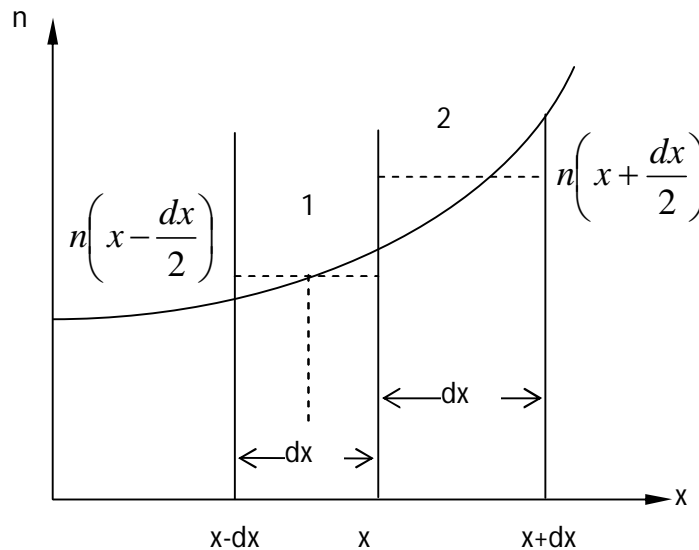
(1.22) deňlemeler zarýad äkidijileriň sanynyň saklanmasynyň şertlerini aňladýarlar, ýagny stasionar ýagdaýda göwrümden çykýan zarýad äkidijileriň akymy daşarky täsirleriň astynda döredilen zarýad äkidijileriň mukdaryna deňdir.

### 1.6 Diffuzion we dreýf toklar

Elektronlaryň  $n(r)$  we deşikli zarýad äkidijileriň  $p(r)$  konsentrasıýasy bir nokatdan başga nokada geçende üýtgäp durýan bir tüsli däl ýarymgeçirijä seredeliň. Şu sebäplere birmeňzeş bolmadyk ýarymgeçirijide diffuzion tok ýüze çykýar, ýagny ýarymgeçirijiniň zarýad äkidijileriniň konsentrasıýasy az bölege diffuziýa geçýär.

Goý ýarymgeçirijide zarýad äkidijileriň konsentrasıýasy " $x$ " ugur boýunça ösýär diýip hasap edeliň. Suratda görkezilen. " $X$ " nokat arkaly  $X$  oka perpendikulýar bolan tekizlik geçirýäris we  $dx$  galyňlykly 1,2 gatlakda zarýad äkidijileriň hereketine

seredeliň (şol tekizligiň çep we sag tarapynda). Haotik hereketiň netijesinde zaryadlar 1 gatlakdan giderler (zaryadlar çepe we saga hereket edýärler). Şonuň üçin ýarysy 1-nji gatlakdan 2-nji gatlaga gider. Emma şol bir wagtyň özünde 1-nji gatlaga 2-nji gatlakdan zaryadlar geler sebäbi 2-nji



**1.9-njy surat**

gatlakda olaryň sany köp, onda ters akym göni akymdan uly bolar. Eger  $n\left(x - \frac{dx}{2}\right)$  - 1-nji gatlakda elektronlaryň ortaça konsentrasiýasy,  $n\left(x + \frac{dx}{2}\right)$  - 2-

( $\Delta v_l$ ), öz-özünden şöhlelenmäniň fluktuasiýasyna baglydyr

$$\Delta v_l = \frac{2\pi(\Delta v_c)^2}{P} \cdot \hbar v \frac{N_a}{(N_a - N_b)_{th}}.$$

(14.3)

Bu ýerde,  $P$  - lazer şöhlesiniň kuwwaty;  $N_a$  - ýokarky energetiki derejede inwersiýasynyň paýlanyş sany.  $(N_a - N_b)_{th}$  - derejelerde inwersiýanyň paýlanyşynyň porog tapawudy. Şeýlelikde, lazer şöhlesiniň spektriniň giňligi, kuwwatyna ters baglylykdaky ululykdyr.

#### Ýarymgeçiriji lazeri.

Ýarymgeçiriji diodlarda indusirrlen şöhlelenmäniň ýüze çykmagy üçin, öz-özünden şöhlelenme ýüze çykýan materialyň ulanylmagy zerurdyr. Başga söz bilen aýdylanda, hiç bolmanda, ýagtylyk diod taýýarlamaga mümkinçiligi bolan materialy ulanmaklyk zerurdyr. Lazerler üçin  $A^3B^5$  ýarymgeçiriji birleşmeler esasyndaky materiallar gaty gowy bolýarlar. Lazerlerde - ýagny ýaýramaýan göni urukdyrylan şöhläni generirlemekde, daşky täsiriň esasyndaky şöhlelenme hadysasy ulanylýar. Bu hadysa şeýle düşünmek mümkin. Elektronýň ýokary

$\alpha_{yt}=2\cdot 10^{-4} \text{ sm}^{-1}$  bolar. Bu ýerde He-Ne gaziň hususy ýuwdalmasy nola deň diýseň, generlenmäniň güýçlendirme koeffisiýentiniň gaty kiçi bolmagyna seretmezden, generirlenme ýüze çýkýar.

#### Şöhläniň häsiýetnamalary.

Gaz lazerleriniň göýberýän ýagtylygynyň kuwwaty 0,1-5,0 mVt bolup, bu lazerleriň peýdaly täsir koeffisiýenti 0,01% töweregidir. Şöhläniň dargama burçy

$$\theta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi L_r}} = 2 \quad \text{mrad,}$$

(14.1)

şöhlelenýän ýagtylyk dargamaýar diýen ýalydyr. Rezonatoryň aýnasynyň üstüne düşýän ýagtylygyň ýagtylandyryýan meýdanyň radiusy şeýle tapylýar.

$$R_a = \sqrt{\frac{L_r \cdot \lambda}{\pi}} = 0,15 \quad \text{mm.}$$

(14.2)

Hasaplama üçin rezonatoryň aýnasynyň egrilik radiusy  $R_\ell = L_r$ . Lazer şöhlisiniň spektriniň giňligi

nji gatlagyň, onda bu gatlaklarda konsentrasiýalaryň tapawudy bolar:

$$n(x - \frac{dx}{2}) - n(x + \frac{dx}{2}) = -\frac{dn}{dx} dx \quad (1.23)$$

1.23 deňlemä laýyklykda elektronlaryň konsentrasiýasynyň tapawudy olaryň konsentrasiýasynyň gradiýentine proporsionaldyr. Şonuň üçin elektronlaryň sanyny  $I_n$ , ýagny  $x$  ugurda ýüze çýkýan diffuziýanyň netijesinde şol  $x$  ugurdaky elektronlaryň konsentrasiýasynyň gradiýentine proporsionaldyr. Ony şeýle görnüşli deňleme bilen aňlatmak bolar:

$$I_n = -D_n \frac{dn}{dx} \quad (1.24)$$

$D_n$  – elektronlaryň koeffisiýent diffuziýasy. Deşikli zarýad äkidijiler üçin diffuziýa akym:

$$I_p = -D_p \frac{dp}{dx} \quad (1.25)$$

$D_p$  -deşikli zarýad äkidijileriň koeffisiýent diffuziýasy.

(1.24) we (1.25) deňlemelerden görnüşi ýaly elektronlaryň we deşikleriň akymy zarýad äkidijileriň

az konsentrasiýasy bolan tarapa akýar. Zarýad äkidijleriniň diffuzion akymyna elektronlaryň we deşikleriň diffuzion toklary degişlidir:  $j_{n.dif}$  we  $j_{p.dif}$ .

$$j_{n.dif} = eDn \frac{dn}{dx}$$

$$j_{p.dif} = -eD_p \frac{dp}{dx}$$

Eger  $n(x, y, z)$  koordinatalaryň funksiýasy bolsa, onda diffuzion tok elektronlar üçin wektor görnüşde ýazyp bolar:

$$\vec{j}_{n.dif} = -eD_n \text{grad}n(\vec{r}) \quad (1.28)$$

Deşikli zarýad äkidijiler üçin:

$$\vec{j}_{p.dif} = -eD_p \text{grad}p(\vec{r}) \quad (1.29)$$

Zarýad äkidijileriň gradiýent konsentrasiýasynyň bolmagy- diffuzion toguň ýüze çykmagyna we giňişlikde zarýadlaryň bölünmegine alyp barýar. Zarýadlaryň bölünmegi statistik meýdanyny döredýär.

naprýaženiýe berilse, akýan toguň ululygy 5mA bolan tleýuşyý razrýad ýüze çykýar. Lazeriň şöhlelenmesine degişli bolan neonyň derejeleri ulanylýar. Ýokarky we aşaky energetiki derejeler bir-birinden gaty uzakda ýerleşmän (1,95 eV), esas bolup durýan derejeden has uzakda ýerleşendirler (18,5 eV).

Neonyň energetiki gurluşyna laýyklykda, elektrik zarýady bilen daşdan berilýän energiýa garamazdan derejeleriň arasyndaky geçiş gaty kiçi bolýar. Bu zonara geçiş artdyrmak üçin neon gazynyň üstüne geliý gazy goşulýar. Geliý gazynyň goşulmagy bilen generirlemäniň güýçlendiriş koeffisiýenti artýar.

Gazrazrýad trubkasynyň uçlaryna, äpişge (окно) hökmünde,

$\theta_{\text{ç}} = \text{tg}^{-1}n_{\text{ç}}$  burç bilen optiki ýylmalan çüýşe äpişgeler ýelmelinýär ýa-da eredilip birleşdirilýär. Bu burça Brýusteriň burçy diýilip at berilýär. Şeýle burçda çyzykly polýarlanan şöhle üçin serpilme koeffisiýenti nola deňdir, şol sebäpli hem diňe şu polýarizasiýaly ýagtylyk generirlenýär.

Generirlemäniň güýçlenmesiniň kiçi bolanlygy sebäpli gazrazrýad trubkasynyň iki tarapyndan, bir birine garşy iki sany tekiz ýa-da oýuk aýna goýulýar. Bu iki aýnanyň arasynda Fabri-Peronyň rezonatory emele gelýär. Bu aýnalaryň serpme koeffisiýenti 99% töweregi bolanda gaty ýokary dobrotnost alynýar. Eger-de rezonatoryň uzynlygyny  $L_r=20$  sm, serpilme koeffisiýentini  $R_1=R_2=99,8\%$  diýip alsak onda rezonatoryň ýitigisi



Spontan şöhlelenmesi arassa (hakyky) kwantlaýyn hadysadyr, ony klassyky düşüňjeler bilen beýan edip bolmaýar. Emma mejbury şöhlelenme klassyky seretmä mümkinçilik berýär. Onuň üçin bölejiklere garmoniki ossilýator hökmünde garap, onuň daşky monohromatik şöhlelenme arkaly rezonans “çaýkalyşyna” seretmeli.

### Lazerleriň görnüşleri

Lazerler esasy üç görnüşinde bolýarlar: gaz, suwuklyk we gaty jisimli (ýarymgeçiriji) lazerler). Ýarymgeçiriji lazerlerine seretmezden öň, lazerleriň iş prinsipine düşünmeklik üçin gaz lazerlereiniň gurluş konstruksiýasyna, işleýiş prinsipine seredip geçeliň. Lazerler ýagtylyk diodlardan tapawutlylykda kogerent ýagtylyk çeşmeleridir. Ilki bilen gyzyly ýagtylyk şöhlesiniň (tolkun uzynlygy 633 nm) adaty mysaly bolan He-Ne gaz lazerine seredeliň. Gaz lazerleriniň içinde ýönekeýligi we kiçi şumlylygy boýunça He-Ne lazerleri tapawutlanýarlar.

Lazeriň konstruktiv görnüşi ulanylýar. Lazeriň rezonatorynyň uzynlygy 20 sm töweregi. Rezonatoryň ortasynda uzynlygy 10 sm töweregi bolan, inçejik (içki diametri 1mm töweregi) trubka ýerleşdirilen. Bu trubkanyň içinde umumy basyşy 0,4 kPa bolan He:Ne=5:1 gazlarynyň garyndysy ýerleşdirilen. Egerde elektrodlara ululygy 1...3 kV bolan

Stasionar ýagdaýda ýarymgeçirijiniň islendik nokadynda dreýf togy diffuzion tok bilen deňagramlaşýar, şonuň üçin termodinamik deňagramlykda tok nola deň bolýar (jemi). Birtüýsli däl daşky elektrik meýdanyna  $\mathcal{E}$  ýerleşdireliň. Daşky elektriki meýdanyň täsiri astynda elektronlar we deşikler ugrukdyrylan herekete eýe bolýarlar, netijede elektron we deşik tok geçirijiligi ýüze çykýar. Eger daşky meýdan gaty güýçli bolmasa we zarýad äkidijileriň hereketiniň häsiýeti üýtgemese toguň dykzlygynyň dreýf düzümi Omuň kanuny esasynda şeýle ýazylyp bilner:

$$\left. \begin{aligned} j_{ndr} &= en\mu_n \mathcal{E} \\ j_{pdr} &= ep\mu_p \mathcal{E} \end{aligned} \right\} \quad (1.30)$$

Doly tok diffuzion we dreýf toguň goşulmagyndan ybaratdyr. Elektron we deşikli zarýad äkidijiler üçin doly tok:

$$j_n = j_{ndr} + j_{ndif} = en\mu_n \mathcal{E} + eD_n \frac{dn}{dx} \quad (1.31)$$

$$j_p = j_{pdr} + j_{pdif} = ep\mu_p \mathcal{E} + D_p \frac{dp}{dx} \quad (1.32)$$

Şeýlelikde, umumy toguň dykzlygy birmeňzeş däl ýarymgeçirijiniň islendik nokadynda we islendik wagtda şu aşakdaky deňleme bilen kesgitlenilýär:

$$j = j_n + j_p = e(n\mu_n + p\mu_p)\mathcal{E} + e(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx}) \quad (1.33)$$

Ýarymgeçirijilerde diffuzion tok örän uly rol oýnaýar, sebäbi ýarymgeçirijilerde elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy uly predellerde üýtgäp biler. Metallarda elektronlaryň konsentrasiýasy praktiki taýdan mydamalykdyr.

### Eýnşteýniň gatnaşygy (formulasy)

Birmeňzeş däl ýarymgeçiride termodinamik deňagrymlykda tok nula deň, ýagny  $n\mu_n \mathcal{E}_{st} = -D_n \frac{dn}{dx}$

(1.34)

Ýarymgeçirijide statistik meýdany bolýar  $\mathcal{E}_{st}$ , onda şol meýdandaky elektronlar potensial energiýa eye bolýarlar:

$$U = -e\varphi$$

Soňky deňligi

$$A_{21} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot h\nu B_{21} \quad (13.17)$$

görnüşde ýazyp bolýar. Bu bolsa spontan geçişiň ahtimallygynyň mejbury geçiş üçin Eýnşteýniň koefisentine proporsionaldygyny görkezýär.

Deňagramlyk şerti şöhlelenme kwantlaryny göýbermek arkaly geçişleriň ahtimallygy üçin (1 bölejik üçin):

$$W^{SOHL} = W_{21}^{sp} + W_{21}^{mej};$$

$$W^{SOHL} = (A_{21} + \rho_v \cdot B_{21}) = \left( \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h \cdot \nu \cdot B_{21} + \rho_v B_{21} \right) = \left( \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h \cdot \nu \right) \quad (13.18)$$

anlatmany berýär.

Görnüşü ýaly,  $W_{21}^{SOHL} \propto B_{21}$ , diýmek, mejbury geçişleriň gadagan erinde spontan şöhlelenme bolup bilmer, we tersine.

Ýokarda alnan (13.15) we (13.18) aňlatmalar daşky şöhlelenme meýdanyndaky kwant sistemasy üçin hem dogrydyr, sebäbi tutuş sistemanyň deňagramly şöhlelenmesi her bir bölejik üçin daşky elektromagnit meýdany hökmünde çykyş edýändir.

(13.17) formuladan ýene-de bir möhüm netije

gelip çykyar. Spontan geçişiň ahtimallygy  $W_{21}^{sp} \propto \nu^3$ , sonuň üçin onuň ähmiýeti radioýgylyklarda kiçidir, optikada bolsa ýokarydyr.

şöhlelenmesi üçin Plankyň formulasy arkaly beýan edilýär:

$$\rho_v = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}; \quad (13.14)$$

C – ýagtylygyň tizligi (13.1) göz öňüne tutup, (13.13) we (13.14) aňlatmalary özara deňläp, alarys

$$\frac{g_1}{g_2} \cdot \frac{B_{12}}{B_{21}} = 1, \quad \boxed{g_1 \cdot B_{12} = g_2 \cdot B_{21}} \quad (13.15)$$

Ýönekeýlik üçin,  $g_1 = g_2$  kabul etsek,

$$\boxed{B_{12} = B_{21}} \quad (13.16)$$

Soňky gatnaşyk mejbury şöhlelenmäniň we ýuwdulmanyň deňähtimallydygyny görkezýär.

Mundan başga-da ýokardaky deňeşdirmeden

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi\nu^2 \cdot h\nu}{c^3} \text{ gelip çykýar.}$$

Elektron konsentrasiýasy köp bolmadyk ýagdaýda (geçiriji zonada) Bolsmanyň gatnaşygyny kanagatlandyrýar:

$$n = N_c e^{\frac{EcF+U}{k_0T}} = n_0 e^{\frac{e\varphi}{k_0T}} \quad (1.35)$$

$n = N_c e^{\frac{E_c-F}{k_0T}}$  - elektronlaryň deňagramlyk konsentrasiýasy,  $\varphi$  - elektrostatik potensial.

$\varepsilon_{st} = -\frac{d\varphi}{dx}$  göz öňüne tutup n- iň we  $\frac{dn}{dx}$  bahasyny (1.34) formula goýup alarys:

$$-\mu_n n_0 e^{\frac{-e\varphi}{k_0T}} \frac{dn}{dx} - D_n \frac{e}{k_0T} n_0 e^{\frac{-e\varphi}{k_0T}} \frac{d\varphi}{dx}$$

bu ýerden elektron üçin:

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{e}{k_0T} \quad (1.36)$$

Deşikli zarýadlar üçin:

$$\frac{\mu_p}{D_p} = \frac{e}{k_0T} \quad (1.37)$$

Termodinamiki deňagramlykda zarýad äkidijileriň koeffisiýent diffuziýasyny we olaryň hereketlilikini baglanyşdyrýan gatnaşyga Eýnşteýniň gatnaşygy diýilýär. Tejribäniň görkezişi ýaly Eýnşteýniň gatnaşygy deňagramlyk däl zarýad äkidijilere hem ulanyp bolar, sebäbi az wagtyň içinde deňagram däl zarýad äkidijiler özleriniň artykmaç energiýasyny gözenege berýärler.

Konsentrasiýasy köp bolmadyk ýarymgeçirijilerde deňagram däl we deňagram zarýad äkidijileriň energiýa boýunça dargamasy hiç hili tapawutlanmaýar.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{W_{12}^{mej}}{W_{21}^{sp} + W_{21}^{mej}} \quad (13.11)$$

Indi (13.2), (13.3), (13.4) we (13.5) formulalary göz önünde tutup (13.11) şeýle ýazmak bolar:

$$\frac{g_2}{g_1} \cdot l^{-\left(\frac{E_2-E_1}{kT}\right)} = \frac{B_{12} \cdot \rho_v}{A_{21} + B_{21} \cdot \rho_v} \quad (13.12)$$

Bu ýerden:

$$g_1 \cdot B_{12} \cdot \rho_v \cdot l^{\frac{E_2-E_1}{kT}} = g_2 (A_{21} + B_{21} \cdot \rho_v)$$

$$\rho_v \left( g_1 B_{12} l^{\frac{E_2-E_1}{kT}} - g_2 B_{21} \right) = g_2 A_{21}$$

$$\rho_v \cdot B_{21} \left( \frac{g_1}{g_2} \cdot \frac{B_{12}}{B_{21}} l^{\frac{E_2-E_1}{kT}} - 1 \right) = A_{21}$$

$$\rho_v = \frac{A_{21}}{B_{21}} \left( \frac{g_1}{g_2} \cdot \frac{B_{12}}{B_{21}} l^{\frac{E_2-E_1}{kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (13.13)$$

Eýnşteýniň postuliplemesine görä, seredilýän kwant sistemasynyň energetiki ýagdaýlarynyň arasyndaky deňagramly geçişlerde göýberilýän we ýuwdulýan şöhlelenme absolýut gara jisimiň genagramly

$$\frac{N_2}{g_2} = \frac{N_1}{g_1} \cdot \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right), \quad (13.4)$$

$g_2$  we  $g_1$  energetiki derejeleriň (2 we 1) statistiki agramlary,  $k$  – Bolsmanyň hemişeligi.

Bölejigiň ýokarky (2) ýagdaýdan asaky (1) ýagdaýa öz-özünden (spontan) geçmekliginiň ähtimallygy wagta proporsionaldyr, onda:

$$dW_{21}^{sp} = A_{21} dt. \quad (13.5)$$

Onda wagt birliğinde

$$W_{21}^{sp} = A_{21} \quad (13.6)$$

bolar.

$2 \rightarrow 1$  geçişleriň doly sany:

$$N_{21} = N_2 \cdot W_{21}^{sp} + N_2 \cdot W_{21}^{mej} \quad (13.7)$$

deňdir.

$1 \rightarrow 2$  geçişleriň doly sany:

$$N_{12} = N_1 \cdot W_{12}^{mej} \quad (13.8)$$

deňdir.

Deňagramlylyk şertini:

$$N_{21} = N_{12} \quad (13.9)$$

görnüşde ýazmak bolar. (13.7) we (13.8) aňlatmalary özara deňläp alarys:

$$N_2 \cdot W_{21}^{sp} + N_2 \cdot W_{21}^{mej} = N_1 \cdot W_{12}^{mej} \quad (13.10)$$

Ýa-da:

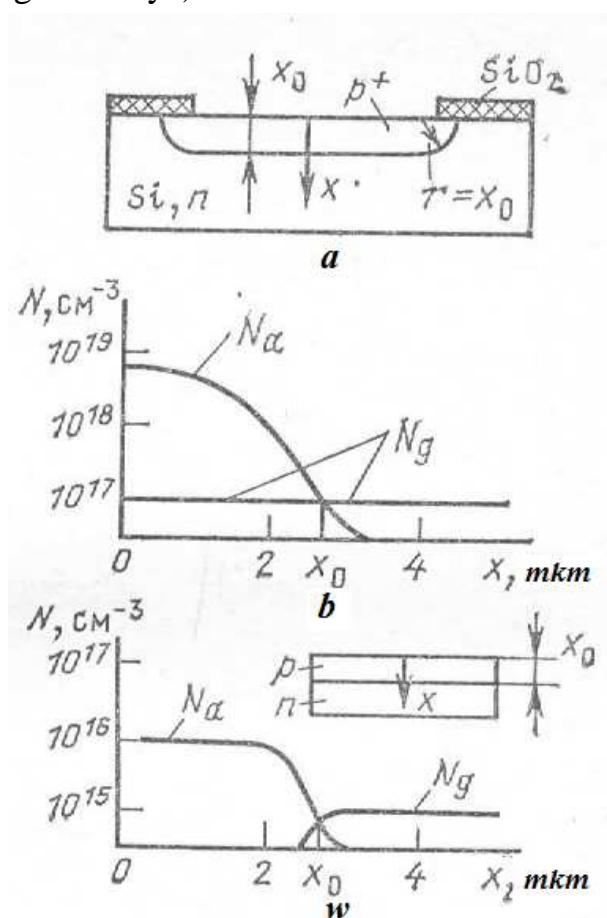
## 2. KONTAKT HADYSALAR

### 2.1 Elektriki geçişler

Elektriki geçiş diýip aýdylýar, ýagny dürli tipli geçirijilikli we dürli elektriki geçirijilikli, mysal üçin, n- we p- oblastlaryň arasyndaky gatлага aýdylýar.

Elektriki geçiş metal we ýarymgeçiriji arasynda hem emele gelýär-ýarymgeçiriji arasynda hem emele gelýär.

Ýarymgeçirijiniň n- we p- oblastlarynyň arasyndaky geçişe elektron-deşik ýa-da p-n geçiş diýilýär. Köplenç halatda bu oblastlar ýarymgeçirijiniň monokrisatlynda döredilýär. Elektron deşik geçişler döredilende dürli tehnologiýa usullar ulanylýar. Elektron geçirijilikli materiala akseptor garyntgy girizilýär (legirowaniýe)



tolkunlaryň bäs-bütinleý meňzeşligi kwant elektronasynda güýçlenmäniň we şöhlelenmäniň kogerentliligine getirýändir.

Emma mejbury şöhlelenmeden başga-da şöhlelenmäniň erkin goýberilmesi hem bardyr. Ýokarky energetiki ýagdaýda ýerleşen atomlar (molekulalar, ionlar, elektronlar) aşaky ýagdaýlara spontan geçişleri amala aşyryp bilýändir. Bu geçişler öz-özünden bolýandyr (durnüksyz ýadronyň radiativ dargamyna meňzeşlikde). Bu proses tötänleýindir. Spontan geçişleriň ähtimallygy daşky elektromagnit meýdany bilen bagly däl. Şonuň üçin ol kogerent däl, ugrukdyrylmadykdyr we polýarlanmadykdyr. Şeýle monogromatik däl tebigi şöhlelenmäni (optiki çakde) belli bolan ähli “klassyky” ýagtylyk çeşmeleri (gaz zaryadsyzlanma lampalary, adaty otag lampalary, lýmunesent lampalary we başga) goýberýändir.

Indi bolsa mejbury we spontan geçişleriň arabaglanyşygyny jikme-jigräk seredeliň. Onuň üçin Eýnşteýniň termodinamiki seretmesini ulanýň.

Özüniň hususy şöhlelenmesi bilen termodinamiki deňagramlylykda ( $T$  temperaturada) bolan kwant bölejikleriniň toplumyna seredeliň. Bu ýagdaýda toplumyň (ansamblyň) energiýasy üýtgeýän däl.

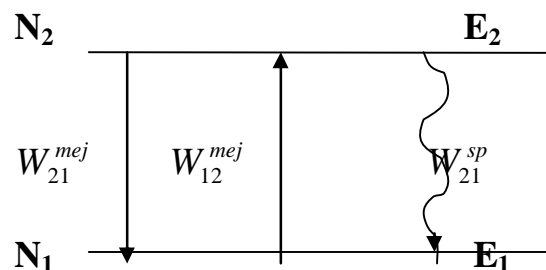
Ýylylyk deňagramlylygynda bölejikleriň derejeler boýunça paýlanylyşy Bolsmanyň formulasy boýunça tapylýar:

**Üçünjiden**, wagt birligindäki indusirlenen geçişleriň ähtimallygy daşky meýdanyň birlik spektral çagindäki energiýasynyň dykyzlygyna (energiýanyň göwrümleýin spektral dykyzlygyna)

$\rho_v \left[ \frac{T}{\text{sm}^3 \cdot \text{Gs}} \right]$  proporsionaldyr:

$$W_{12}^{ind} = B_{12} \cdot \rho_v \quad (13.2)$$

$$W_{21}^{ind} = B_{21} \cdot \rho_v \quad (13.3)$$



Çyzg. 13.1.  $E_1$  we  $E_2$  energetiki derejeleriň ( $E_2 > E_1$ ) arasyndaky mümkin bolan kwant geçişler.

$B_{12}$  we  $B_{21}$  – degişlilikde mejbury ýuwdulma we şöhlelenme üçünýnşteýniň koeffisiýentleri, **1** we **2** sanlaryň tertibi bolsa geçişleriň ugruny görkezýändir.

Şeýlelikde, mejbury şöhlelenme – bu daşky meýdan tarapyndan goldanan şöhlelenmedir. Şöhlenenen we şöhlelendiriji (daşky) elektromagnit

## 2.1-nji surat

Legirowaniýe (garyntgylaryň girizilmegine gözegçilik etmek) atomlaryň diffuziýa usuly bilen daşky sredadan ýokary temperaturada ionly girizilme-ýokary energiýaly kristal ionlaryň garyntgylary bombordirlenýär, ýagny elektrik meýdanyň kömegi bilen ionlaryň garyntgylary tizlendirilýär ýa-da ýarymgeçirijide eredilme (plawleniýe) usuly bilen gerek bolan garyntgyny ýarymgeçirijiniň üstüne eredilýär. Elektron-deşik geçişleri döretmek üçin epitaksiýa hem ulanylýar.

Epitaksiýa-kristalyň üstünde ýuka gatlakly teý (podložkany) garşylykly tip geçirijilikli ýarymgeçirijiniň ösdürmek,, ýagny bu gatlak podlažka bilen bitewi monokristal emele getirýär.

Bu usul bilen başga ýarymgeçirijiniň epotaksial gatlagyny podložkanyň kristallik strukturasy golaý (geteroepitaksiýa we geterogeçişler emele gelýär, ýagny dürli ýarymgeçirijiler arasyndaky geçişler dürli gadagan zonaly.

Garyntgylary dürli konsentrasialy bir tipli geçirijilikli elektron elektrodly diýip atlandyrylýar ( $n^+$ -n) ýaba deşik-deşikli ( $p^+$ -p) indeks “+” garyntgylaryň

ýokary konsentrasiýasyny aňladýar, ýagny n- we p-oblastlar bilen deňeşdirilende.

Metal-ýarymgeçiriji. Elektriki geçiş wakuum çöýulma bilen alynýar- örän ýokary derejede arassalanan ýarymgeçirijiniň üstüne gatlak çäýlýär.

Elektriki geçişlere metal-ýarymgeçiriji-dielaktrik (МДП). Bu strukturada metal we ýarymgeçiriji gatlagynyň arasynda ýuka gatlak dielektrik ýerleşen bolýar.

Elektriki geçişler praktiki taýdan hemme ýarymgeçiriji abzallarda ulanylýar we olaryň iň ähmiýetli struktura elementi bolup durýar. Ýarymgeçiriji abzallaryň işleýiş prinsipiniň geçişlerdäki fiziki prosesserler ýatyr.

p-n geçişiniň strukturasy. Geçişleriň parametrleri n häsiýetnamalry garyntgylaryň konsentrasiýasynyň paýlanyşyna we oblastlaryň geometriki ölçeglerine baglydyr. Suratada p-n kremniniň strukturasy görkezilen. Bu struktura akseptorlary diffuziýa usuly bilen ýarymgeçirijä (n-tipli) maska arkaly kremniniň dioksidinden alnan.

Bular ýaly strukturada diskretnýý abzallarda giňden ulanylýar we integral shemalar üçin tipikidir.

b) suratda donorlaryň  $N_g$  we akseptorlaryň  $N_a$  wertikal boýunça konsentrasialarynyň paýlanyşy getirilen; x koordinat (a) üstden ýarymgeçirijiniň çuňlugyna hasaplanylýar  $N_a = N_g$  metallurgiki araçäk

GaP:N. (ýaşyl şöhle),  $L = 50 - 100 \frac{Kd}{m^2}$ ,  $u = 3 -$

5 W.

(kiçi ölçegli hasaplaýjylarda sanlary şekillendirmekde ulanylýar).

II. GaAs (infragyzył şöhle),  $\eta_{ke} = 8 - 20\%$

GaAs:Si,  $h\nu = 0,94 \text{ eV}$ ,  $\eta_{ke} = 8\%$ ,  $m = 0,58$

$I = 100 \text{ nA}$  tokda şöhlenleme kuwwaty  $0,5 \text{ mWt}$ ,  $u = 1,7 \text{ W}$ .

#### 6.4 Lazerleriň gurluşy

Mejbury geçişleriň asakdaky wajyp häsiýetleri bardyr.

**Birinjiden**, indusirlenen geçişleriň ähtimallygy diňe daşarky rezonans ýygylkly meýdan üçin nuldan tapawutlydyr. Onuň kwantynyň  $h\nu$  ( $\hbar\omega$ ) energiýasy seredilýän izolirlenen ýagdaýlaryň  $E_2$  we  $E_1$  energiýalarynyň tapawudyna deňdir:

$$h\nu = \hbar\omega = E_2 - E_1 \quad (13.1)$$

(Boruň postulatyny aňladýan şert).

**Ikinjiden**, indusirlenen geçişlerde şöhlenenen elektromagnit meýdanynyň kwantlary şol geçişler sebäp bolan meýdanyň kwantlaryndan tapawutlanýan däl. Munuň özi daşky elektromagnit meýdanynyň we indusirlenen geçişlerde emele gelen meýdanyň birmeňzeş ýygylgy, fazasy, polýarlanmasy we ýaýraýyş ugry bardyr.



$\eta_k$  (I) baglylyk diňe orta toklarda (haçan-da  $\eta_k \approx \text{const}$ )  $\Phi$  (I) baglylygyň çyzykly bolmagyna getirýär. Aşaky toklarda  $\Phi$  we L ýagtylanyjylyk I-niň ýokarlanmagy bilen aşagyzykly, uly I-lerde bolsa subçyzykly artýandyr.

Ýagtylyk diodynyň daşky kwant çykyşy  $\eta_{ke} = \eta_k \cdot \eta_k$  içkiden mydama aşakdyr, munuň sebäbi diodan çykanda ýagtylyk ýitgisiniň bolmagydyr,  $K_0$  köpeldiji ýagtylygyň serpikmegi we ýuwdulmasy zerarly ýitgileri hasaba alýandyr.

Doly içki serpikme sebäpli, düşme burçunyň  $\theta_0$ -dan uly bahalarynda ýarymgeçirijiden depesindäki ýarymburçy  $\theta_0$  bolan konusyň çägindeki ýagtylyk çykar.  $\theta_0$  burç  $\theta_0 = \arcsin \frac{1}{n_0} (n_0 - \text{nusganyň döwürleme})$

görkezijisi) şert bilen kesgitlenýär we mysal üçin, GaP üçin  $17,7^\circ$  deň. Şeýle  $\theta_0$  burçlarda “ýarymgeçiriji - howa” araçäginden P-n geçişiniň ähli tarapa deňölçegli şöhlelendirýän ýagtylygynyň diňe  $\sim 2\%$  geçip biler.

Ýarymgeçirijä sferiki görnüşi berip ýa-da dury sferik linza arkaly ýagtylygyň ondan çykyş şertlerini kämilleşdirip bolýandyr we  $K_0 \approx 0,5$  ýetip biler.

Käbir giňden ýaýran ýagtylyk diodlarynyň häsiýetnamalary getirilen.

I. GaP:ZnO.

$h\nu = 1,8 \text{ eV}$  (gyzyl şöhle),  $K_0 = 0,5$ ,  $\eta_{ke} = 12\%$ .

diýilýär  $x_0$ . Onda garyntgylaryň effektiw konsentrasiýasy nula deň.

Real (hakyky) p-n geçişlerde erbet bolmadyk gyraky uçastoklar bar. Silindriki ýa-da sferiki görnüşli metallurgiki araçäkli, radiusy  $r = x_0$  (a-surat)

Eger gyraky uçastoklar elektriki parametrlerine gowşak täsir etse, onda geçiş tekiz diýip hasaplanylýar we zaryad äkidijileriň hereketi, elektriki meýdanyň üýtgemegi we potensialyň diňe x koordinatyň ugry boýunça seredilýär, tekiz metallurgiki araçäge perpendikulýar.

(w-surat) p-n epotaksial geçiş üçin garyntgylaryň paýlanyşyna görkezýär.  $x \geq x_0$  baha n-tipli podložka (teýa) degişli emma  $x < x_0$  – p-tipli epitaksial gatlag degişli.

Ýarymgeçiriji abzallarda simmetriki däl p-n geçişler ulanylýar, olarda, garyntgylaryň konsentrasiýasy bu oblastda – emmitterde örän köp, baza oblasti bilen deňeşdirilende. Mysal üçin  $p^+$ -n geçişde  $p^+$  oblast ýokary konsentrasiýaly akseptorlar – emitter bolup hyzmat edýär. Eger  $p^-$ -oblastda akseptorlaryň konsentrasiýasyna deň bolsa, onda geçiş simmetriki diýilýär.

## 2.2 Deňagramlyk ýagdaýda elektron-deşik geçiş

Deňagramlyk geçişde daşky naprýaženiýanyň nula deň bolan ýagdaýyna degişlidir. Elektronlaryň

konsentrasiýasy n-oblastda p-oblast bilen deňşdirilende has ýokarydyr, onda n-oblastyň elektronlarynyň bir-bölegi p-oblasta differensirlenýärler. Onda p-oblastda artykmaç elektronlar bolar, olaryň metallurgiki araçägiň golaýynda bolarlar. Elektronlar deşikler bilen rekombinasiýa geçýär. Degişlilikde, deşikleriň konsentrasiýasy azalýar we akseptor ionlaryň kompensirlenmedik otrisatel zarýady ýüze çykýar.

Başga tarapdan n-oblastda elektronlaryň gitmegi sebäpli donor ionlaryň kompensirlenmedik položitel zarýadlary ýüze çykýar. Munuň ýaly netijäni deşikler üçin hem çykarmak bolar, ýagny p-oblastdan n-oblasta differensirlenýärler. Metallurgiki araçägiň golaýynda iki tarapdan hereketli zarýad äkidijileriň pes konsentrasiýaly, garyplaşan gatlak emele gelýär. Onda emele gelen garyntgy ionlaryň göwrüm zarýatlary we olar bilen baglanşykly bolan elektriki meýdan zarýad äkidijileriň diffuziýasyna päsgelçilik berýär we deňagramlyk üpjün edýärler, tok geçiş arkaly nula deň, içki elektriki meýdanyň güýjenmesi zarýad äkidijileriň dreyf hereketi bilen ýüze çykarylan garşylykly diffuzion hereketi deňleşdirýänçä ulalýar, elektronlaryň we deşikleriň gradiýent konsentrasiýasy bilen amal aşyrylan. Elektrik meýdan içki potensiallaryň tapawudyny emele getirýär (n- we p-oblastlaryň arasynda)  $\phi_0$ , ýagny potensial barýer.

aňlatma bilen kesgitlenýär. Bu formula P-n geçişiniň wolt-amper häsiýetnamasynyň umumy aňlatmasyndan gelip çykýar.

Bir sekundyň dowamyndaky rekombinasiýalaryň umumy sany tok güýji bilen kesgitlenýär. Bu rekombinasiýalaryň bir bölegi fotonlary şöhlelendirmek arkaly bolup geçýär. F şöhlelenme akymyny 1 sek. dowamynda şöhlelendirilen fotonlaryň sany bilen aňlatsak, alarys:

$$\Phi = \eta_k \frac{I_x}{e} = \eta_k \frac{T_d}{e} \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \quad (12.2)$$

Bu ýerde  $\eta_k$  – lüminessensiýanyň içki kwant çykyşy, elektrolýuminessensiýa üçin  $\eta_k$  kristaldan geçen her bir elektronyň näçe foton döredýänligini görkezýär,  $eU$  – kristala goýlan  $U$  potensiallar tapawudyny geçen elektronyň energiýasy,  $e$  – elektronyň zarýady ( $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  kl). Injeksion elektrolýuminessensiýada  $\eta_k$  toga bagly bolýandyr.

$U$  we  $I$ -niň aşaky bahalarynda giňişlik zarýadynyň jemlenen ýerindäki rekombinasiýa agdyklyk edýär, ol ýerde gerekli spektral aralykda şöhlelenmeli geçişleriň ähtimallygy kiçidir. Şonuň üçin  $U$  we  $I$ -niň ýokarlanmagy bilen  $\eta_k$  ilki artýar, soňra bolsa takmyn üýtgemeyän baha çykýar.

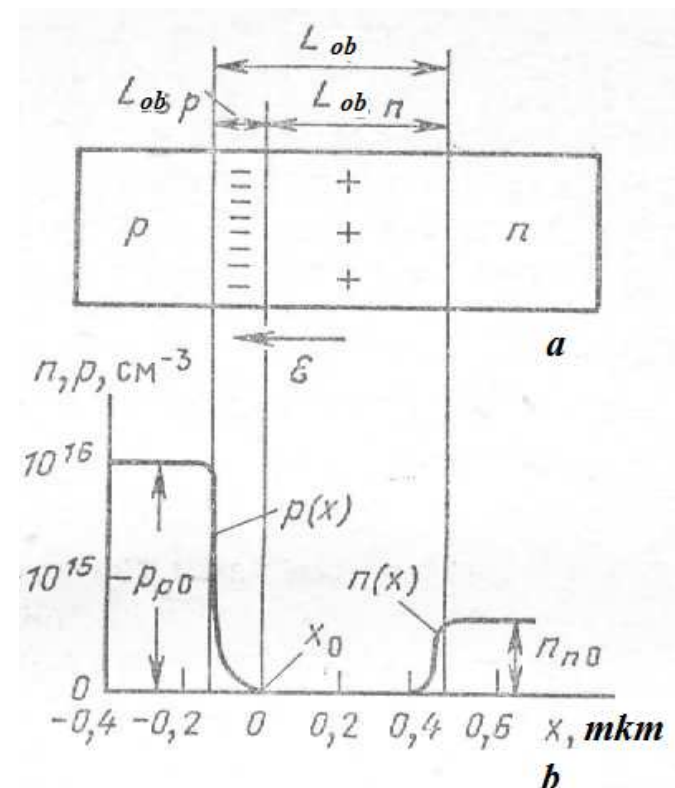
Has uly toklarda  $\eta_k$  aralmagy şöhlelenmesiz Ože – rekombinasiýanyň sanynyň köpelmegi we nusganyň temperaturasynyň ýokarlanmagy bilen düşündirilýär.

kriatalyň geçirijiligi dürli bolan bölekleriniň birikmesinde alyp bolar(biri n – geçirijilikli beýlekisi bolsa p - geçirijilikli). Deşikli (p) geçirijiligi bolsa bölekde A akseptor garyndylary bardyr, walent zolakdaky elektronlar ýylylyk arkaly ol garyndylara geçirilýär. Elektron (n) geçirijilikli bölekde D donor garyndylar bardyr, olar öz elektronlaryny geçiriji zolaga berendirler. P we n – görnüşli ýarymgeçirijileriň araçäginde bolup geýýän hadysalary gysgaça ýatlalyň.

Spontan geçişler zerarly rekombinasiýa prosesi yzygiderli geçip durar ýaly, ýagny n – bölekde elektronlaryň täze akymyny, P – bölekde bolsa deşikleri almak üçin P–n geçiş çeşmeden üznüksiz iýmitlenmelidir. Şunlukda alynýan şöhlelenme kogerent bolmaz, sebäbi rekombinasiýada emele gelýän fotonlaryň dürli energiýalary (ýygylyklary) we ýaýraýyş ugurlary bardyr. Olaryň fazalary hem sazlaşykly däldir. Kogorent däl ýagtylygy şöhlelendirijilere ýagtylyk diodlary diýilýär. Olar optoelektronikada esasy ýagtylyk çeşmeleri bolup durýar.

Göni naprýaženiýäniň U artmagy bilen geçişden akýan tok eksponensiol kanun boýunça ösýär we  $eU \gg k \cdot T$  bolanda

$$I = I_d \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \quad (12.1)$$



2.2-nji surat

Galyňlygy  $L_{obp}$  garyplaşan gatlagyň bölegi p-oblastda ýerleşen (2.2 a/ we akseptor ionlaryň otrisatel zarýady saklaýar. Beýleki bölegi  $L_{obn}$  n-oblastda ýerleşen we onda donorlaryň ionlaryň polžitel zarýatlary toplanan. Garyplaşan gatlagyň doly galyňlygy  $L_{ob} = L_{obp} + L_{obn}$ . Umuman garyplaşan oblast tutuşlaýyn neýtralnydyr: otrisatel zarýad p-oblastda  $Q_{bo} = qN_a L_{obp}$  S n-oblastdaky položitel zarýada deňdir.

$Q_{ob} = qN_g L_{obn} S$  nirede S-geçişiň zarýadlaryň deňliginden  $L_{obn}/L_{obp} = N_a/N_d$  gelip çykýar.

Simmetrik däl geçiş üçin  $N_a \gg N_d$  alarys  $L_{obn} \gg L_{obp}$  we  $L_{obn} \approx L_{ob}$ , garyplaşan gatlak esasanam garyngylaryň az konsentrasialy oblastynda bazada toplanan.

Kremniý p-n geçişe seredeliň 2.2-nji b suratda lektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasynyň paýlanyşy görkezilen. Garyplaşan gatlarda zarýad äkidijiler örän az.

Şeýlelikde, p-n geçiş oblasty erkin zarýad äkidijilerden garyplaşan we absolýut bahasy boýunça garyntgylaryň kompensirlenmedik ionlaryň deň položitel we otrisatel saklaýarlar. Olarda içki elektriki meýdan we potensial barýer bar. Garyplaşan oblastyň udel garşylygy birnäçe esse ýokary goňşy neýtral oblastlar deňeşdirile (bazanyň we emitteriň). Deňagramlyk ýagdaýa geçmeklik potensial barýeriň beýikligi  $\phi_o$ , garyplaşan gatlagyň galyňlygy  $L_{ob}$  we içki elektriki meýdanyň maksimal güýjenmesi bilen häsiýetlendirilýär  $\varepsilon_{maks}$

zolaga görä) üpjün etmeli, ýagny inwersiýaly ýagdaý döretmeli. Bu bolsa şeýle alynýar.

Ýarymgeçirijiniň gadagan zolagyna elektronlary beryän bölejikleri (donorlary) ýa-da olary alýan bölejikleri (akseptorlary) ornaşdyrylan ýagdaýy almak bolýar.  $E_c$  derejäniň golaýynda ýerleşen D garyndylar geçiriji zolagyň aşaky derejelerini ( $\mu_e$  derejä çenli) doldurmaklygy ýeňil üpjün edýärler; walent zolagyň goloýynda ýerleşen A garyndynyň bölejikleri bolsa ondan (W - zolakdan) elektronlary “arkaýyn” alýarlar, netijede  $W_0$  – zolagyň ýokarky derejeleri ( $\mu_d$  derejä çenli) diňe deşikler bilen doldurylan bolýar.

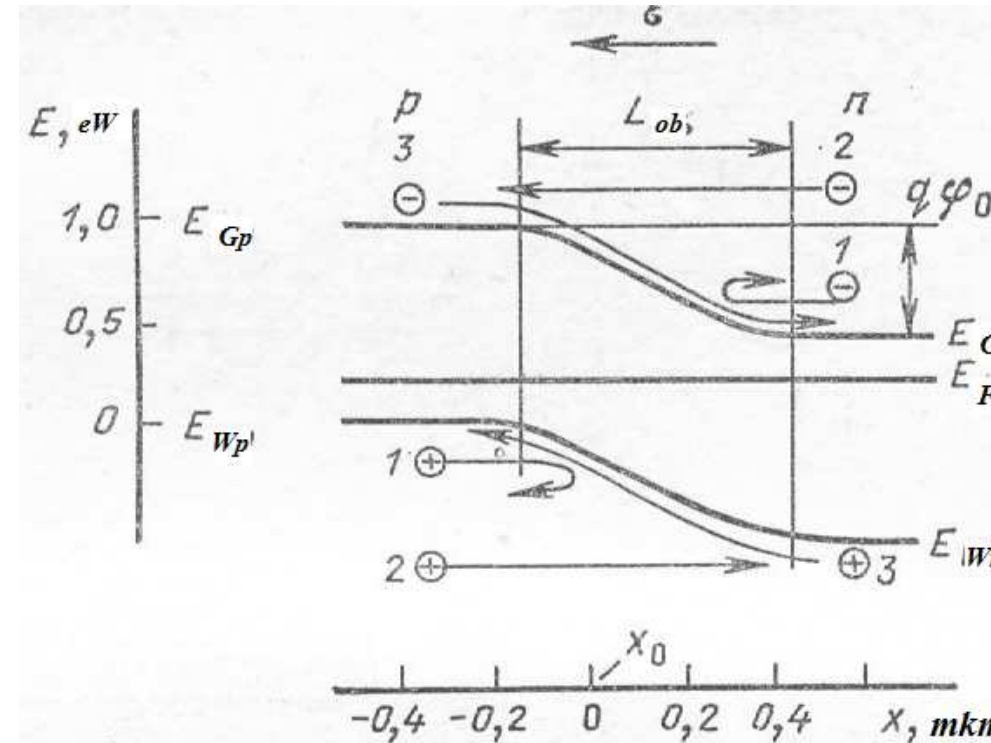
Ýarymgeçirijiniň şeýle ýagdaýyna täzedan emele getirilen ýagdaý diýilýär. Eger indi ýarymgeçirijä elektronlara  $E = \mu_e - \mu_d > \Delta E$  energiýany berip biler ýaly energiýanyň haýsy hem bolsa bir görnüşini bilen täsir etsek, onda şol elektronlary walent zolaga “itekläp” düşürerler we şol ýerde olaryň deşikler bilen rekombinasiýasyna getirip bilerler. Elektronlaryň deşikler bilen rekombinasiýa-synda ýagtylyk fotonlary şöhlelenýär, olar özgereginde täze elektronlary oýandyryýarlar we ş.m. bu ýerden şeýle ýarymgeçirijiniň ýagtylygy güýçlendirip biljekdigi görünýär, ýagny ol optiki kwant generatoryna (lazere) öwürülip biler. Görkezilen şertleri GaAs ýarymgeçiriji birikmesi oňat kanagatlandyryýandyr.

Ýarymgeçirijiniň OKG hökmünde işläp başlamagy üçin zerur bolan ýokardaky ýagdaý dürli

ýagtylygy daşyna çykarlyş optiki usuldadyr. Kogerent indusirlenen (mejbury) şöhledenmäni almak üçin işjeň bölejikleriň inwersiýaly ýagdaýyny döretmeli.

Ýarymgeçiriji materiallarda işjeň bölejikler – elektronlardyr. Islendik ýarymgeçirijide gadagan zolak bilen bölünen walent we geçiriji zolaklar (zonalar) bardyr. Walent zolagy ýokardan  $E_w$ , geçiriji zolak bolsa aşakdan  $E_c$  energiýa bilen çäklenendir. Gadagan zolagyňini  $\Delta E = E_c - E_w$ . Ýarymgeçirijilerde  $\Delta E$   $(1...2) \cdot 10^{-3} \div 3eW$  aralykda ýerleşendir (dielektriklerde  $\Delta E = 3 \div 10eW$ ). Oýandyrylmadyk ýagdaýda walent zolagy elektronlar bilen doldurylandyr, geçiriji zolak bolsa boşdur. Eger elektrona  $E \geq \Delta E$  goşmaça energiýa berilse, ol geçiriji zolaga geçip biler. Bu energiýa ýylylyk, ýagtylyk şöhledenmesi, elektrik ýa-da magnit meýdanlary arkaly berlip bilner. Iň kiçi energiýaly ýagdaýy eýelemäge ýmtylyp, oýandyrylan elektron käbir wagtdan soň öz-özünden (spontan) aşak – walent zolakdaky eýelenmedik derejä geçär. Walent zona geçende elektron boş ýeri – deşigi doldurýar.

Bu prosese rekombinasiýa diýilýär. Rekombinasiýada elektronyň ýitirýän energiýasy  $h\nu = E_c - E_d$  energiýaly foton görnüşinde şöhledenýär, bu ýerde  $E_c$ ,  $E_d$  – özara rekombinirleýän elektronyň we deşigiň energiýalary. Fotonlaryň – üznüksiz şöhledenmesini almak üçin elmydama geçiriji zolakda oýandyrylan elektronlaryň artyk mukdaryny (walent



2.3-nji surat

2.3-nji suratda dňagramlyk ýagdaýda p-n geçişiniň energetiki diagrammasdy görkezilen. Fermi derejesi hemme oblastlar üçin birmeňzeş. Bu diagrammada zonalaryň araçägininiň ýapgydy gatlakda galyňlygy  $L_{ob}$  garyplaşan b) gatlakda elektriki meýdany kesgitleýär.  $(\epsilon = (dE_n/dx)/q)$ . Elektronyň energiýasynyň tapawudy çep we sag tarapda geçiriji zonaň düýbinde diagrammanyň  $E_{np}$ - $E_{nn}$  degişlilikde

potensial barýer potensial  $\phi_0$  barýeriň beýikligine deň  $q\phi_0$ , potensial barýer geçişe tarapa hereket edýän zaryad äkidijiler üçin hem deňşlidir.

Mysal üçin, elektron 1 (2.3-nji surat) uly bolmadyk energiýaly p-tiply oblastyň içine girip bilmeýär we meýdan tarapdan p-n geçişden çykarylýar. Munuň ýaly ýagdaýda 1 deşik hakynda hem aýtman bolar.

Garşylykly tarapa geçip biler diňe energiýalary ýeterlik derejede ýokary bolan esasy zaryad äkidijiler (elektronlar 2, deşikler 2) we potensial barýeri ýeňip geçer. Mundan tapawutlylykda esasy däl zaryad äkidijiler üçin elektrik meýdan tizlendiriji bolup hyzmat edýär. Barýere golaýlaşýan esasy däl zaryad äkidijiler (3 elektron we 3 deşik) geçişin meýdany tarapyndan tutulýar we garşy oblata geçirilýär.

Fermi derejesi n- we p-oblastlar üçin birmeňzeş, onda energetiki barýeriň beýikligi Fermi derejeleriniň tapawudyna deňdir.  $E_F - E_{fp}$  biri-birinde izolirlenen n- we p-oblastlarda  $E_1$   $q\phi_0 = kT \ln(n_{no}/n_{po}) = kT \ln(p_{po}/p_{no})$

Işçi temperatura diapazony üçin, ýagny hemme garyntgy bar

Işçi temperatura diapazony üçin, ýagny hemme garyntgylyar ionlaşdyrylan

$$q\phi_0 = kT \left( N_a N_g / n_i^2 \right) = \Delta E_0 - kT \ln \left[ N_n N_W / \left( N_n N_g \right) \right]$$

Garşylykly optronlarda şöhlendiriji hökmünde has kiçi ölçegli çyrajyklary ýada ýagtylyk diodlary ulanylýarlar. Bu diodlar göze görünýan ýada infragyzyň şöhlendirmäni göýberýärler. Şöhlelenmäniň kabulediji bolup göze görünýan ýagtylyk üçin kadmiý selenidyň ýada kadmiý sulfidyň fotogarşylygy we infragyzyň şöhlelenmä üçin bolsa gurşunyň selenidyň ýada sulfidyň fotogarşylygy durýarlar. Fotogarşylyk hemişeki we üýtgeýan elektrik akymlarda işläp bilýar.

Diod optronlar köplenç kremniý fotodiody we infragyzyň arsenid-galliý ýagtylyk diodlary eýeleýärler. Fotodiod fotogenerator režimda işläp bilýar, onuň foto-EHG-sy 0,8 W ýetýär, we fotodiod režimda hem işläp bilýar. Diod optronlaryň esasy häsiýetnamalary – üzüksiz we impuls režimleri üçin giriş we çykyş akymlyary we naprýaženiýalary, akymy geçirmek koeffisiýenti.

Tranzistor optronlar köplenç şöhlendiriji hökmünde arsenid-galliý ýagtylyk diody we şöhlelenmäniň kabulediji hökmünde n-p-n görnüşdäki bipolar kremniý fototranzistory eýeleýärler. Şeýle optronlaryň giriş zynjyrynyň esasy görkezijileri diod optronlaryň görkezijilerine meňzeş. Goşmaça çykyş zynjyra deňşli bolýan iň uly akymlyar, naprýaženiýalar we kuwwat we fototranzistoryň garaňkylyk akymy görkezilýar.

Optron üçin niýetlenen ýagtylyk göýberiji diodyň, adaty ýagtylyk dioddan esasy uly tapawudy,

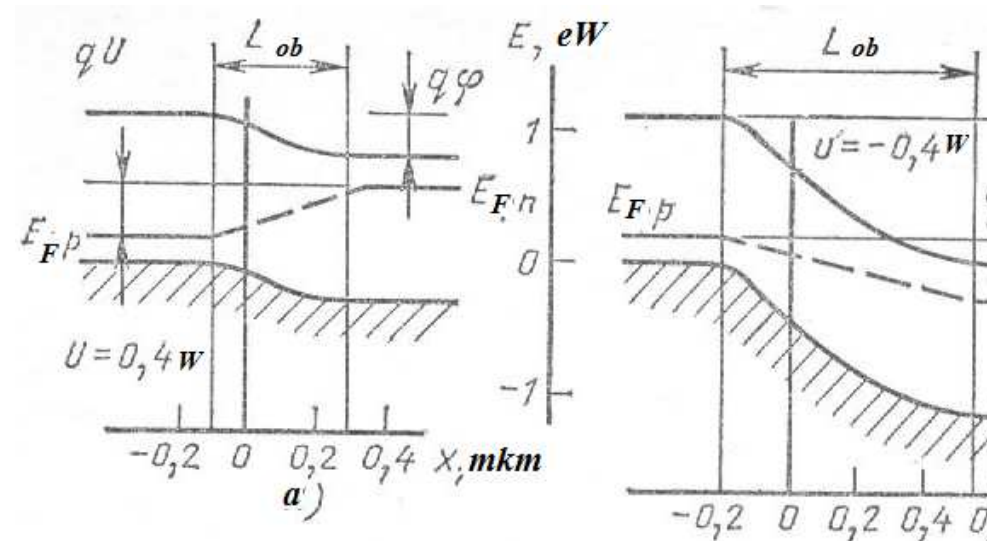


maksimal bahasynda,  $I_{gir}=1,6\text{mA}$  we  $I_{çyk}=4,8\text{mA}$  bolsa geçiş koeffisiýentiniň ululygy  $K_1=300\%$  bolýar. Emma geçiş koeffisiýenti hemişelik bolup bilenok. Sebabli ýagtylyk göýberýan diodyň we çykyş fotokabuledijiniň güýçlendirijisiniň häsiýetnamalary göniçyzykly dälär.

### 6.3 Optoelektron jübütleriň görnüşleri

Optron – bu ýarymgeçiriji enjam, onuň içinde gurluşlaýyn şöhlelenmäniň çeşmesi we kabuledijisi birleşdirilen, olar özara optiki aragatnaşyk arkaly baglanyşdyrylan. Şöhlelenmäniň çeşmesiniň içinde elektrik signallary ýagtylyk signallara özgerdirilýär, olar fotokabuledijä täsir edýärler we onda gaýtadan elektrik signallary döredýärler. Egerde optron diňe bir şöhlendirijini we bir kabuledijini eýeleýän bolsa onda oňa optojübüt ýada ýönekeý optron diýilýär. Goşmaça ylalaşdyryan we güýçlendiýän gurluşlary eýeleýän bir ýada ençeme optojübütlerden düzülen mikroçyzga optoelektron integral mikroçyzgy diýilýär. Optojübüdiň girişinde we çykyşynda hemişe elektrik signallary bar, giriş bilen çykyşyň aragatnaşygy ýagtylyk signallar arkaly ýerine ýetirilýär. Şöhlendirijiniň zynjyry dolandyryjy bolýar, fotokabuledijiniň zynjyry bolsa – dolandyryan bolýar.

Optronlaryň dürli görnüşleri biri birinden fotokabuledijileri bilen tapawutlanýarlar.



2.4-nji surat

Bu gatnaşyk diňe wyroždýonnyý däl ýarymgeçirijiler üçin dogrudyr. Bu halatda potensial barýeriň (energetiki) beýikligi gadagan zonanyň inine göni proporsionaldyr; temperaturanyň ösmegi bilen azalýar we garyntgylaryň konsentrasiýasynyň köpelmegine az ösýär, ýagny n we p ýarymgeçirijilerde Fermi derejeleriniň baglanyşygyndan gelip çykýar.

Ýokarda sanalyp geçilen baglanyşyklary şeýle düşündirmek bolar: Temperaturanyň ösmegi ýa-da gadagan zonanyň ininiň azalmagy esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy ösýär. Esasy zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy garyntgylary doly

ionlaşmagy sebäpli üýtgemän galýar. Netijede geçişde zarýad äkidijileriň konsentrasiýasynyň gradiýenti azalýar we olara proporsional bolan diffuzion toklar (diýmek) we olary kompensirleýji deňagram ýagdaýda dreýf toklar. Bu bolsa elektrik meýdanyň güýjenmesiniň peselmegine şaýatlyk edýär we potensial barýeriň maksimal temperaturada  $T_{\max}$  ýokary temperaturada zarýad äkidijileriň, konsentrasiýasy geçişni iki tarapyndan hem hususy konsentrasiýa golaýlaşýar, emma konsentrasiýalaryň gradiýenti, diffuzion tor we potensial barýeriň beýikligi nola çenli azalýar. Garyntgylaryň konsentrasiýasynyň ösmegi bilen esasy zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy proporsional ulalýar we esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy azalýar, ýagny zarýad äkidijileriň gradiýent konsentrasiýasy ulalýar, diffuzion toklar we olary kompensirleýän dreýf toklar. Diýmek, meýdanyň güýjenmesi we barýeriň beýikligi ulalýar

$$q\varphi_0 = E_{fn} - E_{fp}$$

gatnaşygy ulanyň  $\varphi_0$  formal taýdan düşündirmek bolar.

Temperaturanyň ösmegi bilen Fermi derejesi izolirlenen ýarymgeçirijilerde n we p tipli geçirijilikli gadagan zonanyň ortasyna süýşýär we olaryň

Optronyň ýagtylygy kabul ediji elementi hökmünde kremniý fotoelementleri gaty gowy bolýar. Emma köplenç, alynan signaly gerek derejä çenli ýokarlandyrmak üçin, ony güýçlendirmek gerek bolup durýar. Daşky elementler bilen baglylykdaky kynçylyklar döremezligi üçin güýçlendiriji element korpusyň içinde ýerleşdirilýär. Bu konstruksiýa iki sany usul bilen amala aşyrylýar. 1) Fotokabulediji hökmünde fototranzistor ulanylyp, onüň baza-kollektor geçiş ýagtylygy kabui ediji element hökmünde peýdalanylýar (11.2 surat). 2) ýagtylyk duýuji element hökmünde fotodiod ulanylyp alynan fotosignal goşmaça tranzistor tarapyndan güýçlendirilýär. Ikinji görnüşli ýagtylyk kabul ediji elementleri ulanmak, olary bir korpusda ýerleşdirmekde birnäçe kynçylyk döredýär. Emma birinji görnüşli ýagtylyk duýujy elementlerde işleýiş ýygylgy ýokary bolmaýar.

Analog tipli optronlarda güýçlendirme koeffisiýenti çykyşdaky toguň giriş toguna bolan gatnaşygy görnüşinde kesgetlenilýär. Bu häsiýetnama optronyň geçirijilik koeffisiýenti hökmünde  $K_1$  kabul edilip prosentlerde aňladylýar. Köplenç umumy görnüşde seredilende, optronlar sanly tehnikada (sifrowoý) ulanylyşynda  $K_1$  häsiýetnama şeýle seredilýär: haçanda giriş we çykyş toklary belli bir ululykda saklanan ýagdaýynda, çykyş naprýaženiýasy maksimal ululykda saklanylýar. Meselem  $U_{\text{чык}}=0,4\text{V}$



$$T = 4 / (2 + n_2 / n_1 + n_1 / n_2)$$

(11.2)

Haçanda optronda şöhle göýberýan diod GaAsP-dan bolsa ( $n=3,6$ ) we fotodiod kremniý esasynda bolsa ( $n=3,5$ ) onda howadan ( $n=1$ ) tapawutly islendik optiki gurşawy ulanmak bolar. (11.2) - esasynda ol şeýle hasaplanylýar.

$$T_1 = \frac{4}{2 + 3,6/n + n/3,6}$$

we

$$T_2 = \frac{4}{2 + 3,5/n + n/3,5} \quad (11.3)$$

$$\frac{\varphi_{\text{cyk}}}{\varphi_{\text{gir}}} = T = T_1 \cdot T_2 = \begin{cases} 0,470 & \text{hacanda } n=1 \\ 0,698 & \text{hacanda } n=1,5 \\ 0,9999 & \text{hacanda } n=\sqrt{3,6 \cdot 3,5} \end{cases}$$

(11.4)

arasyndaky tapawut azalýar. Garyntgylaryň konsentrasiýasynyň ulalmagy Fermi derejesi gadagan zonanyň ortasyndan daşlaşýar we olaryň tapawudy, emma  $\varphi_0$  ulalýar.

Ýokary konsentrasiýaly ýarymgeçirijileriň arasyndaky geçişde potensial barýeriň beýikligi  $\Delta E_q$  ýokary baha eýe bolýar.

### 2.3 Deňagramly däl ýagdaýdaky elektron-deşik geçiş

Eger p-n geçişe napriženiýanyň çeşmesini birikdirilse, onda ýokarda seredilen deňagram ýagdaý bozulýar, zynjyrda tok akyp geçýär. Sebäbi garyplaşan gatlagyň garşylygy neýtral oblastyň garşylygy bilen deňeşdirilende has ýokarydyr, onda az tokda daşky naprýaženiýe praktiki taýdan  $U$  doly suratda garyplaşan gatлага goýulýar. Bu naprýaženiýanyň täsiri astynda potensial barýeriň beýikligi üýtgeýär.

$$\phi = \phi_o - U$$

Eger iýmitlendiriji çeşmäniň plýusyny p oblasta birikdirilse, emma (-) n oblasta onda geçişni naprýaženiýasine göni naprýaženiýa diýilýär. ( $U \geq \partial$ ).

Göni naprýaženiýede potensial barýer peselýär, ýagny daşky meýdan geçişini içki meýdanyň ugruna garşy ugrukdyrylan. Ters naprýaženiýede geçişde (çeşmäniň (-) p- oblasta birikdirilen) potensial barýer ýokarlanýar, sebäbi daşky meýdan içki meýdan bilen goşulýar.

Potensial barýer bilen birlikde onuň galyňlygy üýtgeýär. Ters naprýaženiýede geçişde elektrik meýdanyň täsiri astynda  $L_{ob}$  ulalýar, bu bolsa esasy zarýad äkidijileriň süýşmegi bilen düşündirilýär. Bu ýagdaýda geçişniň gyrasynda garyntgylaryň goşmaça ionlary ýüze çykýar we garyplaşan oblastyň galyňlygynyň udel barýeriň beýikliginiň ulalmagyna getirýär. Bu dielektriki relaksasion wagtda bolup geçýär. Göni naprýaženiýede  $L_{ob}$  esasy zarýad äkidijileriň garyplaşan gatlag tarap süýşmegi sebäpli azalýar. Garyplaşan oblasta girip göwrüm zarýadlaryň bir bölegini kompensirleýärler we gatlagyň galyňlygynyň peselmegine getirýär. Simmetriki däl başgançakly p-n geçiş üçin  $\varphi_0$  ýerine  $q_0 - U$  ululygy goýup alarys:

$$L_{ob} = 2\varepsilon_0\varepsilon_n(q_0 - U)/qU_g$$

Geçişniň energetiki diogrammasynda göni (a) we ters (b) süýşmede Fermi dereje p we n oblastlarda deňagram diogrammadan tapawutlylykda dürli

taýýarlanylssa, onda ýagtylyk diodin şöhlelenmesi  $\lambda \approx 700\text{nm}$  tolkun uzunlygynda bolýar.

Optron üçin niýetlenen ýagtylyk göýberiji diodyň, adaty ýagtylyk diotdan esasy uly tapawudy, ýagtylygy daşyna çykarlyş optiki usuldadyr.

Ýagtylyk göýberiji we ýagtylyk kabul ediji elementleriň arasyndaky optiki gurşawyň diňe bir ýaýtylygy geçirijilik spektri esasy bolman, olariň izolirleme häsiýeti hem uly rol oýnaýar. Haçanda bu elementleriň aralygy gaty ýakyn bolmasa, onda esasy talap talap birleşdiriji, ýagtylygy geçiriji gurşawyň geçirijiligidir.

Ýagtylygyň üst serpilmesini azaltmak üçin, ýagtylygy göýberiji we kabul ediji elementleriň üsti serpilemä garşy örtük bilen örtülýär hem-de aralygynda ýuka we dury ftoroplast gatlagy ýerleşdirilýär.

Islendik dürli üstden ýagtylyk geçende frenel serpilmesi bolup ol şeýle kesgitlenilýär:

$$R = \left[ \frac{(n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)} \right]^2, \quad (11.1)$$

ýagtylygyň geçiýän bölegi şeýle tapylýar:

baglanyşdyrýan optiki dury gurşawdan durýar. Ýagtylyk şöhlesini gowy geçirýän optiki gurşaw hökmünde howa, çüýşe, dury plastmassa, süýümlü-optiki ýagtylyk geçirijiler ulanylyp biliner. Ýagtylyk şöhlesini duýuji hökmünde fotorezistorlar (fotogarşylyklar), fotodiodlar, fototransistorlar hem-de «fotodiod-güýçlendiriji» integral gurluşlar ulanylýar. şeýle optronyň dürli konstruksiýa boýunça gurluşy 11.1 suratda görkezelen.

Optron üçin ýagtylyk diodlary işläp düzmekde esasy kynçylyk onüň häsiýetnamalaryny fotokabuledijileriň häsiýetnamalary bilen gabat getirmeklik bolup durýar. Esasy gabat getirilmeli häsiýetnamalara, güýçlendiriş koeffisiýenti, şöhleleniş spektriniň giňligi, optiki äpişgäniň giňligi we elektrik häsiýetnamalary girýär. Ýagtylyk diodlar häsiýetnamalaryň biri onüň yzygider garşylygy we göni naprýaženiýanyň uly bolmazlygydyr. şeýle talaplary ödeýän ýagtylyk diodlar arsenid-galliýniň esasynda taýýarlanylýar.

Eger-de ýagtylyk diodlar, GaAs esasyda döredilen  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  gatlaklaryň esasynda taýýarlanylssa, onüň şöhle göýberiş aralygy (spektri) we çaltlygy ýarymgeçirijiniň fundamental häsiýetnamalary we düzümi bilen kesgitlenilýär. Haçanda ýagtylyk diodlar  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  epitaksial ýarymgeçiriji gatlagynyň  $x=30\%$  bolan düzüminden

beýiklikde ýerleşýär, emma olaryň arasynda tapawut  $q(U)$  deňdir.

Göni süýşmede meýdanyň güýjenmesi geçişde azalýar, diffuzion we dreýf toklaryň deňagramlyk şerti bozulýar, n-oblastdan elektronlaryň diffuziýasy we garşylykly diffuziýa deşikleriň olaryň dreýf hereketleri bilen deňeşdirilende ýokarydyr. Geçiş bilen araçäkde neýtral oblastlarda diffuziýa sebäpli esasy däl zarýad äkidijileriň konsentراسيýasy ulalýar. Bu prosese esasy däl **zarýad äkidijileriň inžeksiýasy diýilýär**. Geçişniň araçäginin golaýynda artykmaç elektronlaryň  $\Delta n_p$  – oblastda we deşikleriň  $\Delta p_n$  – oblastda konsentراسيýalary alarys, ýagny bu ululyklar esasy zarýad äkidijileriň deňagramlyk ýagdaýdaky bahalary bilen deňeşdirilende az diýip pikir edýäris (degişli oblastlarda).

Onda (2.1a) gatnaşygy ulanyp bolar.

$$q\phi_o = kT \ln \left( \frac{n_{no}}{n_{po}} \right) = kT \ln \left( \frac{p_{no}}{p_{po}} \right)$$

" $\phi_o$ "  $\phi_o - U$  çalşyryarsys, emma

$$n_{po} \cdot n_p = n_{po} + \Delta n_p, \text{ onda}$$

$$q(\phi_o - U) = kT \ln \left[ \frac{n_{no}}{(n_{po} + \Delta n_p)} \right] = kT \ln \left( \frac{n_{no}}{n_{po}} \right) - kT \ln \left( 1 + \frac{\Delta n_p}{n_{po}} \right)$$

Bu ýerden

$$\Delta n_p = n_{po} \left[ \exp\left(\frac{U}{\varphi_t}\right) - 1 \right]$$

(11)

Meñzeşlikde (2.1a) gatnaşygy ulanyp, alarys

$$\Delta p_n = p_{po} \left[ \exp\left(\frac{U}{\varphi_t}\right) - 1 \right]$$

(12)

Inžeksiýa esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasynyň has ýokary baglanyşygy napriženiýa görä mahsusdyr: naprýaženiýa ulalanda diňe  $2.3 \varphi_t$  esse (60mW) ( $T=300K$ ) konsentrasiýa bir polýada ulalýar.

Artykmaç esasy däl zarýad äkidijiler geçişiň araçäginde diňe bir daşky napriženiýede ýüze çykman, eýsem beýleki täsirleriň astynda hem ýüze çykyp biler, mysal üçin ýagtylygyň täsiri astynda.

Netijede geçişde naprýaženiýe (EDS) ýüze çykýar we esasy däl zarýad äkidijileriň belli konsentrasiýalary arkaly aňladyp bolar. Şeýlelikde, esasy däl zarýad äkidijileriň artykmaç konsentrasiýasy tarapyndan ýüze çykarylan sebäplere garamazdan olaryň naprýaženiýasy ýokarky (1) we (2) gatnaşyk bilen kesgитlenýär. (1), (2) we

( $n_w < n < n_{kr}$ ). Şeýle gurşaw nökmünde epoksid smolanyň garyndylary ulanylsa, onda  $\theta_{kr} = 25 \div 30^\circ$  çenli artýar.

3. Ýagtylyk göýberiji üstüň serpilmä garşy gatlak bilen örtülmegi. Eger-de, şöhlelenýän üst, galyňlygy  $t$  bolan birmeñzeş döwülme görkezijili  $n_1$  gatlak bilen örtülse, şu aşakdaky şert ýerine ýetende serpilme gaty kiçelýar.

$$n_{kr} \cdot n_w = n_1^2 \quad (10.10)$$

$$n_1 t = \frac{\lambda}{4} (2\ell - 1),$$

(10.11)

bu ýerde  $\ell$  - oňyn бүтін сан;

$\lambda$  - şöhlelenýän ýagtylygyň tolkun uzynlygy.

4. Optiki sepleriň meýdanyny gaty kiçeltmek esasynda, olardaky ýuwdulmany azaltmak.

## 6.2 Optoelektron jübütleriň gurluşy

Optron - ýagtylyk şöhlisini göýberiji elementden (ýagtylyk dioddan), fotokabuledijiden hem-de ýagtylyk diod bilen fotokabuledijiniň arasyny

bu ýerde  $T_{or}$  - kristalyn üstüniň, kritiki burçdan kiçi burç bilen düşen ýagtylygy göýberijilik koeffisiýenti. Kristala normal boýunça düşýän ýagtylygy göýberijilik koeffisiýenti, Freneliň formulasyndan kesgitlenilýär.

$$T = 4n(1+n)^{-2} \quad (10.9)$$

Bu koeffisiýent GaAs-howa araçağı üçin -0.69, GaP-howa üçin - 0.715.

(10.2) formuladan gelip çykyşy ýaly, F ululygynyň bahasy ýönekeý GaAs we GaP ýarymgeçiriji diodlar üçin gaty kiçidir. Takmyndan  $F=1.3 \div 1,65\%$ . Kristaldan ýagtylygy çykarmaklygynyň koeffisiýentiniň gaty kiçi bolmagy bu koeffisiýenti ulaltmagyň dürli ugrlaryny görlemäge getirdi.

1.P-n-geçişiň göýberýän ýagtylygynyň easy böleginiň üste kritiki burçdan kiçi burç bilen düşer ýaly kristalynyň geometriýasyny saýlar almak.

Ýagtylyk diodyň şeýle geometriýasynyň mysaly bolup, ýarym sfera görnüşli diod gurluşy bolup biler. Şeýle konstruksiýada p-n-geçisiň ululygi (razmeri), ýarymsferanyň diametrinden gaty kiçi bolup, üste düşýän ýagtylygynyň aglabasynyň normaldan uly bolmadyk burç bilen düşmegine getirýär.

2.Kritiki burçy artdyrmaklyk üçin kristaly aralyk döwürme görkezujile gurşawda ýerleşdirmek

$$n_i = n_{po} \left[ \exp\left(\frac{U}{\varphi_i}\right) - 1 \right]$$

aňlatmalardan gelip çykýar, ýagny

$$\frac{\Delta p_n}{\Delta n_p} = \frac{p_{no}}{n_{po}} = \frac{p_{no}}{n_p} \approx \frac{N_a}{N_g}$$

Simmetriki däl  $p^+ - n$ -geçiş üçin  $N_a \gg N_g$  bolan ýagdaýda alarys  $\Delta p_n \gg \Delta n_p$ , ýagny inžektirlenen deşikleriň konsentrasiýasy güýçli legirlenen  $p^+$  - oblastdan (emmitterden) az legirlenen  $n$  - oblata (baza) garşylykly tarapda inžektirlenen elektronlaryň konsentrasiýasyndan has ýokarydyr. Şeýlelikde, simmetriki däl geçiş üçin emmitterden baza tarap birtaraplaýyn inžeksiýa mahsusdyr. Inžeksiýanyň koeffisienti diýip zaryad äkidijileriň togunyň bazada inžektirlenen doly toga bolan gatnaşyga aýdylýar.

Mysal üçin  $p^+ - n$  geçiş üçin  $\gamma = I_n / I$  nirede  $I = I_p + I_n$  - doly tok;  $I_p, I_n$

- deşikleriň we elektronlaryň inžeksiýa togy.

Simmetriki däl geçiş üçin  $N_a / N_g$  ulalanda  $\gamma \rightarrow 1$

**Inžeksiýa derejesi.**

$\delta = \Delta p_n / n_{n0} \approx \Delta p_n / N_g$  - bu gatnaşyk esasy däl zaryad äkidijileriň inžektirlenen konsentrasiýalarynyň bazadaky esasy zaryad äkidijileriň (deňagram) konsentrasiýalaryna. Inžeksiýa pes, haçanda  $\delta \ll 1$ , ýokary inžeksiýa – haçanda  $\delta \gg 1$ .

Ters naprýaženiýada geçişň galyňlygy proporsional däl naprýaženiýa görä ulalýar, netijede geçişň elektriki meýdany köpeliýär we onda zaryad äkidijileri hereketi agdyklyk edýär. Diffuzion hereket bilen deňeşdirilende n-oblastda we elektronlar p-oblastda tertipsiz ýylylyk hereketi sebäpli geçişň araçägini kesip geçip biler, şol ýerde olar tizlendiriji meýdana düşýärler, olary goňşy oblasta geçirýär.

Netijede geçişň araçäginde esasy däl zaryad äkidijileriň konsentrasiýasy azalýar; bu hadysa esasy däl äkidijileriň ekstrasiýasy diýilýär.

(1) we (2) aňlatmalar ekstrasiýa üçin hem dogrydyr;  $U < 0$  bolanda ondan gelip çykýar  $\Delta n_p \ll 0, \Delta p_n \ll 0$ , ýagny deňagram konsentrasiýa bilen deňeşdirilende esasy däl zaryad äkidijileriň konsentrasiýasynyň azalmagyna degişlidir.

bilen ýarymgeçirijiniň üstünden geçýän ýagtylyk şöhesiniň arasynda kritiki burç:

$$\theta_{kr} = \arcsin \frac{n_h}{n_y} \quad (10.7)$$

Ýagtylyk diodlaryň köplenç taýýarlanylýan materiallary bolan GaAs we GaP ýarymgeçirijiler üçin  $\theta_{kr}$ , degişlilikde 3.54 we 3.3 deňdir. Kritiki burç öz gezeginde takmyndan 16 we 17,7° deňdir. Diodyň içinden kritiki burçdan kiçi burç bilen çykýan ýagtylyk şöhesi daşyna çykýar, kritiki burçdan uly burç bilen düşen ýagtylyk doly yzyna serpiger. Egerde ýarymgeçiriji materialynyň ýuwdulma koeffisiýenti uly bolsa onda ýagtylyk şöhesiniň serpigen bölegi kristalyň içinde ýuwdular.

Haçanda kristalyň içki serpilme koeffisienti, serpilýän ýagtylyk üçin kiçi bolsa onda söhle birnäçe gerek serpigip, daşyna çykyp bilýär.

Tekiz görnüşli ýagtylyk diodlar üçin daşyna çykyp biljek ýagtylyk şöhesiniň mukdary şeýle kesgitlenilýär.

$$F = \sin^2 \left( \frac{\theta_{kr}}{2} \right) \cdot T_{or},$$

(10.8)

$$\gamma_n = \frac{L_p N_d}{L_p N_d + \left( \frac{D_p}{D_n} \right) L_n N_a},$$

(10.6)

bu ýerde  $N_d$  we  $N_a$  diodyň  $n$  we  $p$  böleklerinde akseptorlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy. (9.6) geňlikden görnüşi ýaly,  $\gamma_n$ -iň bahasynyň bire ýakyn bolmagyny gazanmak üçin  $N_d \gg N_a$ ,  $L_p > L_n$ ,  $D_n > D_p$  şertleriň ýerine ýetmegi zerurdyr. Bu şertleriň içinde iň esasy  $N_d \gg N_a$  bolmagydyr.

Ýagtylyk diodlarda ýüze çykyan ýitgiler sebäpli,  $p$ - $n$ -geçişde generirlenýän ýagtylygyň diňe belli bir bölegini daşyna çykarmaklyk mümkin. Bu ýitgiler esasan hem şulardan ybarat:

1. Yarymgeçiriji bilen howa araçaginde içki döwülme esasynda bolýan ýitgi.

2. Üst ýitgileri.

3. Diodyň çykyş elektrodларыnyň ýerleşdirilen yerindäki ýitgi.

4. Yarymgeçiriji gatlakларыnyň içinde bolup geçýän ýitgi.

Yarymgeçiriji bilen höwanyň döwülme görkezijileriniň arasynda gaty uly tarawudyň barlygy sebäpli, ýarymgeçirijiniň üstüne geçirilen normal

## 2.4 Ideallaşdyrylan geçiş wolt-amper häsiýetnamasy.

Ideallaşdyrylan  $p$ - $n$ - geçiş, real  $p$ - $n$ - geçiş iň ýönekeýleşdirilen modelidir, bu halatda şeýle esasy dopuşeniýalar kabul edilýär.

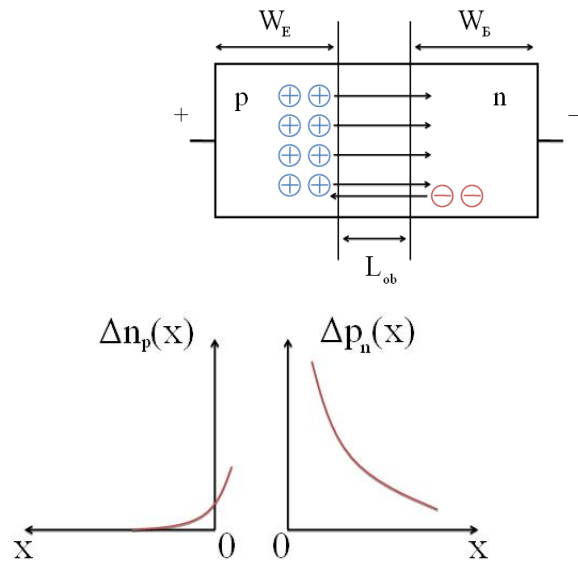
Garyplaşan gatlakda generasiýa, rekombinasiýa we zarýad äkidijileriň akyp gitmegi ýok.

a) Zarýad äkidijiler garyplaşan gatlak arkaly mgnowen (çalt) geçýärler, ýagny bir tipli geçirijilikli zarýad äkidijileriň araçägiň iki tarapynda hem birmeňzeşdir.

b) Garyplaşan gatlagyň daşynda elektrik meýdan ýok, bu ýerde zarýad äkidijiler diffuziýa sebäpli hereket edýärler; neýtral oblastyň garşylygy garyplaşan gatlagyň garşylygy bilen deňeşdirilende örän az diýip hasaplanylýar, inžeksiýa derejesi pes.

w)  $p$ - $n$  geçiş iň araçägi tekiz bolup durýar, zarýad äkidijiler diňe araçägi perpendikulýar bolan ugra hereket edýärler; gyraky effektlar göz önünde tutulmaýar. Seredilýän  $p$ - $n$  geçişde esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasynyň üýtgemegi geçiş iň araçägiň daşyndan az göni tokda we naprýaženiýe bu oblastaryň elektrik neýtrallygy bozulmaýar. Bu daşky zynjyrdan gelýän esasy zarýad äkidijiler tarapyndan inžektirlenen esasy däl zarýad äkidijileriň çalt neýrallaşmagy bilen düşündirilýär. Goý, neýtral oblastlaryň galyňlygy bu oblastlardaky esasy däl zarýad äkidijileriň diffuzion uzynlygyndan has ýokary

diýip hasap edeliň. Elektron – deşik geçişiniň göni napriženiýede fiziki prosesler suratda görkezilen; a – suratda göni togy döredýän esasy zaryad äkidijleriniň hereketiniň ugurlary görkezilen.



2.5-nji surat

Bu zaryad äkidijleriniň süýşmegi p-n geçiş arkaly artykmaç esasy däl zaryad äkidijleriniň inžeksiýasyna getirýär - elektronlaryň p neýtral oblasta, deşikleri n-oblasta tarap.

Neýtral oblastlarda p-n geçişiniň golaýynda onuň araçäginde diffuziýa sebäpli olaryň konsentrasiýalarynyň gradiýenti tarapyndan esasy däl

bu erde

$$I_{n_o} = eD_n n_p / L_n; \quad ; \quad I_{p_o} = eD_p p_n / L_p \quad (10.5)$$

Ýagtylyk diodlaryň adaty diodlara seredende konstruksiýasynyň aýratynlygy, olam diodyň bir tarapynda aktiw bölegi ýerleşdirilýär. Ýagtylyk diodlaryň konstruksiýasyna laýyklykda inžektirlenen zaryadlar aktiw gatlag tarap bir ugra hereket edip, beýleki ugra tarap zaryadlaryň inžeksiýasy basylyp ýatyrylýar. Bu bolsa içki kwant çykyş koeffisiýentiniň ýokarlanmagyna getirýär.

Eger ýagtylyk diodyň p-tarapy aktiw bolsa, onda diffuziýa togunyň elektron düzümi, deşik togundan artyk bolmalydyr, göwrüm zaryadynyň gatlagynda rekombinasiýa kiçi bolmalydyr. Inžeksiýa koeffisiýenti  $\gamma_{no}$ , ýagny togun elektron düzüjisiniň umumy toga bolan gatnaşygy şu aşakdaky formulanyň kömegi bilen keşgitlenilýär .



$$n'_p = n'_p(x_p) \exp\left[-(x-x_p)/L_n\right],$$

(10.2)

bu erde  $L_n$  - elektronlaryň diffuziýa aralygynyň uzynlygy.

(9.2) formuladan görnüşi ýaly inžektirlenen artykmaç zaryadlaryň konsentrasiýasy p-n-geçişden uzaklaşdygyça azalyp  $L_n(L_p)$  aralykda  $l=2.72$  gezek kemelýär.

Inžektirlenen elektronlaryň rekombinasiýasy esasynda emele gelýän diffuzion togy  $I_n$

$$I_n = eD_n \cdot n_p \left[ \exp(eU/kT) - 1 \right] / L_n,$$

(10.3)

bu erde  $D_n$  - elektronlaryň diffuziýa koeffisienti. Deşikleriň diffuzion togy hem ýokardaky deňlige meňzeş ýazylýar. Onda umumy tok:

$$I = \left( I_{n_0} + I_{p_0} \right) \left[ \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right]$$

(10.4)

zaryad äkidijiler hereket edýärler. Bu oblastlarda artykmaç esasy däl zaryad äkidijileriň konsentrasiýalarynyň stasionar paýlanyşy  $\Delta n_p(x)$  we  $\Delta p_n(x)$  geçişiň çäklerinde hasaplamany başlangyjy diýip hasap edilen şertlerde diffuziýanyň deňlemesinden kesgitlenilýär (1.26), (2.7) we (2.8) konsentrasiýalar kesgitlenilýär, emma neýtral oblastyň çuňlugynda rekombinasiýa sebäpli olar nola ymtylýarlar.

### Diffuziýanyň deňlemesiniň çözülişi

$$\Delta p_n(x) = \Delta p_n(0) \exp(-x/L_p);$$

$$\Delta n_p(x) = \Delta n_p(0) \exp(-x/L_n); \quad (2.10)$$

nirede  $L_n, L_p$  -degişlilikde deşikleriň n-oblastda we elektronlaryň p-oblastda diffuzion uzynlyklar. Konsentrasiýalaryň paýlanyşy

$$\Delta p_n(x) = p_n(x) - p_{n0}, \Delta n_p(x) = n_p(x) - n_{p0}$$

suratda görkezilen, degişlilikde p-n geçişe kordinatyň dürli başlangyjy we ugurlary kabul edilen: Ideallaşdyrylan p-n geçişiň wolt-amper

häsiýetnamasyny kesgitlemek üçin (1.29) aňlatmany

$$\text{ulanmak bolar } \left| j_n(0) = qD_n \frac{dn_p}{dx} \right|_{x=0} = \frac{qD_n \Delta n_p(0)}{L_n}$$

p-n geçiş arkaly tok elektronyň we deşikleriň toklaryndan ybaratdyr, araçäkde

$$I_n = qSD_n \Delta n_p(0)L_n; \quad I_p = qSD_p \Delta p_n(0)L_p; \quad \text{nirede}$$

S-geçişiň meýdany;  $D_n$ ,  $D_p$ -elektronlaryň we deşikleriň p- we n-oblastlarda diffuzion koeffisientleri.

(2.11) aňlatmada n-oblastyň çäginde artykmaç elektronlaryň konsentrasiýasyny  $\Delta n_p(0)$  (2.7) we deşikleriň  $\Delta p_n(0)$  n-oblastyň çäginde (2.8), ideallaşdyrylan p-n geçişin WAH alarys.

$$I = I_p + I_n = I_0 [\exp(u/\varphi_r) - 1]$$

nirede  $I_0$  - ýylylyk togy, bu ýylylyk ýeketäk parametrdir we ters toguň manysyna eýe bolýar, sebäbi  $U < 0$  we  $|u| \gg \varphi_r$  bolanda  $I = -I_0$  (1.3), (2.11)

we (1.28) gatnaşyklary ulanyp,  $n_0 = N_g, p_0 = N_a$

göz önünde tutup, alarys:

$$I_0 = \left( qSL_p p_{n0}^{\tau_p} \right) + \left( qSL_n n_{p0}^{\tau_p} \right)$$

(2.13)

elektrik meýdany, zarýadlaryň, Fermiň derejesi deňleşinden soň geçmegine päsgelçilik döredýär.

P-n-geçişe göni ugra elektrik meýdanynyň berilmegi, göwrüm zarýadynyň döreden potensial päsgelçiligi peseldýär, netijede p-tarapa goşmaça elektronlar geçýär, n-tarapa bolsa-goşmaça deşikler geçýär. Şeýle usul bilen esasy däl zarýadlaryň diffuziýa esasynda geçmegine, inžeksiýa diýilýär. P-n-geçişden p-tarapa geçen elektronlaryň konsentrasiýasy  $n'(x_p)$  şu aşakdaky aňlatmadan tapylýar

$$n'(x_p) = n_p \exp(eU/kT) ,$$

(10.1)

bu erde  $n_p$  - diodyň p-tarapyndaky elektronlaryň konsentrasiýasy. Bu aňlatmadan görnüşi ýaly inžektirlenen zarýadlaryň konsentrasiýasy diňe esasy däl zarýadlaryň deňagramlykdaky konsentrasiýasyna we daşdan goýulan meýdanyň ululygyna baglydyr. Inžektirlenen zarýadlar esasy zarýadlar bilen rekombinirlenýär, şol sebäpli hem, p-n-geçişden uzaklaşdygyça şeýle baglylyk boýunça üýtgeýär.

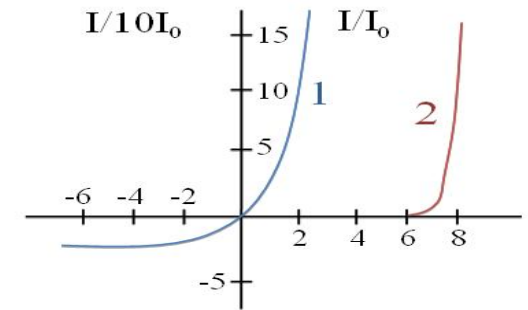
Adamyň gözünüň ýagtylyk energiýasyna duýujlygyny  $\lambda = 0,7$  mkm tolkun uzynlydyndan başlaýandygyny göz önünde tutsan, onda görünýän ýagtylygyň ýagtylyk diodlary gadagan zolagynyň ginligi  $E_g \geq 1,8$  eV kiçi bolmadyk ýarymgeçiriji materialyndan taýýarlanylmalý. Elektrolýuminessent diodlar üçin göni geçişli ýarymgeçiriji materiallary has oňat gabat gelyär. Olara  $A^3B^5$  birleşmäniň materiallary GaAs-AlAs, GaAsP girýär. Bu ýarymgeçiriji materiallarda, effektiv ýagtylyk göýberiji merkezler, gadagan zolagyň içinde, ýörite derejeleri döredýän garyndylaryň gerizilmegi esasynda gazanylýar.

### 6.1 Ýagtylyk çeşmeleri. Ýagtylyk göýberiji diodlar.

Ýagtylyk göýberiji diodlaryň aktiw bölegine (gatlagyna) esasy däl zaryadlary inžeksiýa (goçürme) bilen eltmeklik bu priborlaryň işlemeginde esasy bolup durýar. Umumy görmüşde p-n-geçişden zaryadlaryň inžeksiýasyny şeýle düşündirmek mümkin

Haçanda p-n-geçiş termodinamiki deňagramlyk ýagdaýynda bolanda, zaryatlar şeýle ýerleşýär, ýagny Fermiň derejisi n we p-tip ýarymgeçirijiler üçin bir derejede ýerleşýär. P-n-geçişiň göwrüm zaryadynyň

ýa-da



2.6-njy surat

$$I_0 = qSn^2 \left[ D_p / (L_p N_g) + D_n / (L_n N_a) \right] \quad (2.14)$$

nirede  $\tau_p$ ,  $\tau_n$  –deşikleriň n-oblastdaky we elektronlaryň p-oblastdaky ýaşayyş wagty.

Az göni naprýaženiýeler üçin  $U \leq 3\phi_r$  Wolt-Amper häsiýetnama 2.8 suratda görkezilen

(1-egriçyzyk, sag tarapyň hasap şkalasy) Göni naprýaženiýede tok çalt ösýär, toguň 1 esse köpelmegi naprýaženiýäniň  $2.3\phi_r$  (60mW, T=300K) üýtgemegi degişlidir. Modul boýunça  $(2 \div 3)\phi_r$  ýokarlanýan ters

naprýaženíyede, ideallaşdyrylan p-n geçişiniň ters togy naprýaženíýä bagly dälendir we  $I_0$  deňdir.

Ýarym geçiriji abzallarda p-n geçişleriniň işçi göni toklary birnäçe esse  $(10^3 \div 10^4)I_0$  WAH (2-nji egri çyzyk) çep tarapdaky hasaplama toguň şkalasy degişlidir, ters şaha U göni şahanyň başlangyjy çyzgyda görünmeýär. Şonuň üçin WAH göni we ters şahalary üçin, eger-de olar zerur gerek bolsa şekillendirme, onda dürli masştablar ulanylýar.

Ýylylyk tok –  $I_0$  tok onuň emele gelmeginiň mehanizmine degişlilikde güýçli temperatura baglylykda ýylylyk ters tok diýip atlandyrylýar. Deşikli–elektron geçişiniň ters süýşmede fiziki prosesleri suratda düşündirilýär.

$$I(\hbar\nu) \sim \nu^2 (\hbar\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[-(\hbar\nu - E_g)/kT\right],$$

bu ýerde  $E_g$  - gadagan zolagyň giňligi.

Köplenç ýarymgeçirijilerde donorlaryň we akseptorlaryň konsentrassyýasynyň artmagy bilen olary oýandyrmak üçin gerek bolýan energiýanyň ululygy kiçelýer. Şol sebäpli hem olaryň konsentrasiýalarynyň baglylygy peselýär.

### **Göze görünýan ýagtylygyň ýagtylyk diodlary.**

Görünýän ýagtylygyň adamyň gözüne täsiri, ýagny görünýän ýagtylygyň dürli tolkun uzynlyklarynyň göze täsiriniň effektiwligi bilen kesgitlenilýär. Bütindünýä birlikler takuklanýan we kesgitlenilýän kömissiýanyň kabul eden birligene laýyklykda, görüş burçy  $2^\circ$  bolan ýagdaýynda tolkun uzynlyga baglylykda gözüň duýgurlygy.

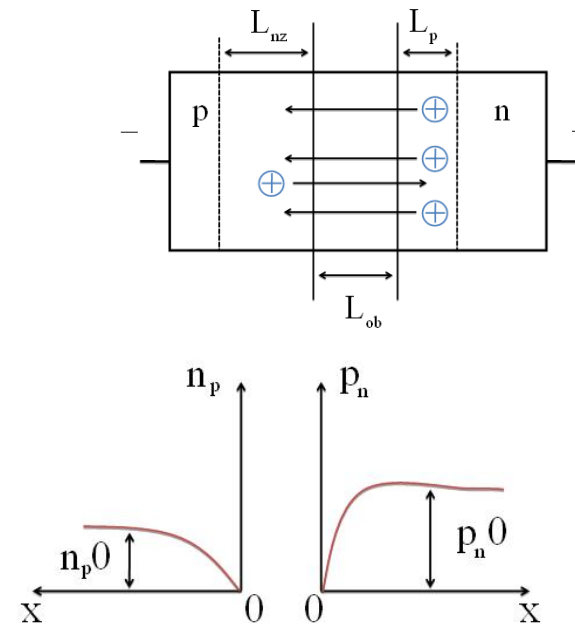
Gözüň görüş maksimumy  $\lambda = 0,555$  mkm bolup ýagtylygyň tolkun uzynlygynyň  $\lambda = 0,39$  we  $\lambda = 0,77$  mkm bahalarynda nola çenli peselýär. Ýagtylygyň göze täsiriniň effektiwligi şöhläniň ýitiligi bilen häsiýetlendirilýär. Fotometriýada 1 Wt ýagtylyk energiýasy göziň maksimal duýujylygy üçin 680 Lm (Lýumene) gabat gelýär.

Belli boluşy ýaly gaty jisimde foton bilen elektronyň arasynda üç görnüşli özara täsir ýüze çykyp bilýär. Ýagtylyk fotony elektrony walent zolakdan geçiş zolaga geçirmekde ýuwdulup bilýär. Ondan başgada ýagtylyk fotony, geçiş zolakdan walent zolaga elektronyň geçmegine ýardam edip özüne meňzeş fotonyň şöhlelenmegine getirip bilýär. Şöhlelenmäniň ýene bir görnüşü, olam oýandyrylan elektronlaryň öz-özünden geçiş zolakdan walent zolaga geçip, ýagtylyk fotonyňy göýbermegidir.

Geçiş zolakdaky oýandyrylan elektronlaryň öz-özünden walent zolaga geçende göýberýän ýagtylyk şöhlesiniň intensiwligi, geçiş zolakdaky oýandyrylan elektronlaryň dykzlygyna we walent zolakda boş ýerleriň dykzlygyna baglydyr.

$$I(\hbar\nu) \approx \nu \langle M \rangle^2 N_c \cdot N_v \cdot F_c(E) \cdot F_v(E) \quad (9.7)$$

bu ýerde  $\langle M \rangle$  - geçişin matrisa düzümi;  $N_c$  we  $N_v$  - geçiş we walent zolaklarda derejeleriň dykzlygy;  $F_c(E)$  we  $F_v(E)$  - Fermi-Dirakyň elektronlar we deşikler üçin paýlanyş funksiýasy. Öz-özünden geçişin şöhlelenmesiniň spektri şeýle görnüşde ýazylýar.



2.7-nji surat

Ýylylyk tok geçişin golaýynda esasy däl zaryad äkidijileriň neýtral n-p oblastlarda ýylylyk generasiýasynyň täsiri astynda amala aşyrylýar.

Bu zaryad äkidijiler geçişin çäginde differakdirilenýärler, meýdan tarapdan tutulýarlar we goňşy oblata geçirilýärler. Diffuziýa esasy däl zaryad äkidijileriň n- we p-geçişin araçäginde konsentrasiýalarynyň azalmagy, ýagny ters süýşmede esasy däl zaryad äkidijileriň ekstraksiýasy sebäpli ýüze çykarylýar.

Ýylylyk toguň temperatura baglylygy esasanam esasy däl zaryad äkidijleriniň konsentrasiýasynyň üýtgemeginiň netijesinde bolup geçýär.

Şonuň üçin

$$I_0 \approx n^2 i \sim \exp\left[-\Delta E_G / (KT)\right]$$

$I_0(T)$  funksiýa  $\Delta T$  temperaturanyň iki esse ulalmagyny häsiýetlendirýär, ýagny temperaturanyň toguň iki esse ulalmagyny aňladýar.

$\Delta I = \left(KT^2_0 \ln 2\right) \Delta E_G$ , niredede  $T_0$  - işçi diapazon üçin ortaça temperatura.  $T=25^\circ\text{C}$  temperaturada kremniý üçin  $\Delta T=5^\circ\text{C}$ . Eger, mysal üçin temperature – 15 - den tä  $+65^\circ\text{C}$  ýokarlanýar, ýylylyk tok  $2^{16}$  esse ulalýar. Germaniý üçin  $T=25^\circ\text{C}$  temperaturada  $\Delta T=8^\circ\text{C}$  we ýylylyk tok  $2^{10}$  esse ulalýar.

Ýylylyk togy garyntgylaryň konsentrasiýasynyň ulalmagy bilen azalýar (esasy däl zaryad äkidijleriniň konsentrasiýasynyň azalmagy sebäpli). Garyntgylaryň konsentrasiýasy näçe ýokary bolsa berlen oblastda şonça-da otnasitel goşant ýylylyk toga bu oblastda genorirlenen zaryad äkidijiler azdyr. Simmetriki däl p-n geçiş üçin esasy goşant ýylylyk toga deşikler goşýar, az garyntgy girizilen n-oblastyň (baza).

elektronlaryň konsentrasiýasynyň wagtyň geçmegi bilen kemelmegi şeýle tapylýar.

$$n = n_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

(9.4)

bu ýerde  $n_0$  - başlangyç wagtdaky ( $t=0$ ) oýandyrylan elektronlaryň sany;  $\tau$  - elektronyň oýandyrylan ýagdaýyndaky ýaşaýyş wagty.

Şeýlelikde, lýuminessensiýa şöhlelenmäniň intensiwligi, oýandyrma bes edilenden soň, ýaşaýyş wagtynyň ululygyna ( $\tau$ ) baglylykda eksponenta boýunça kiçelýar.

$$I_1 \sim e^{-t/\tau} \quad (9.5)$$

bu gatnaşykdan:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (9.6)$$

bu ýerde:  $I_0$  - wagtyň  $t=0$  ýagdaýyndaky, ýagny oýandyrma bes edilendäki lýuminessensiýanyň başlangyç intensiwligi

Ýagtylyk diodlar we lazerler lýuminessent priborlarynyň klasyna girýärler. Oňki kesgitleme berişimiz ýaly, jisimde elektron oýandymasy esasynda ýüze çykýan optiki şöhlelenmä (spektriň görünýän, ultramelewşe we infragyzyň böleklerinde) lýuminessensiýa diýilýär.

$$I(\hbar\nu) = B(\hbar\nu - E_g + E_{\text{fon}})^2$$

(9.2)

bu ýerde  $E_{\text{fon}}$  - fononyň energiýasy.

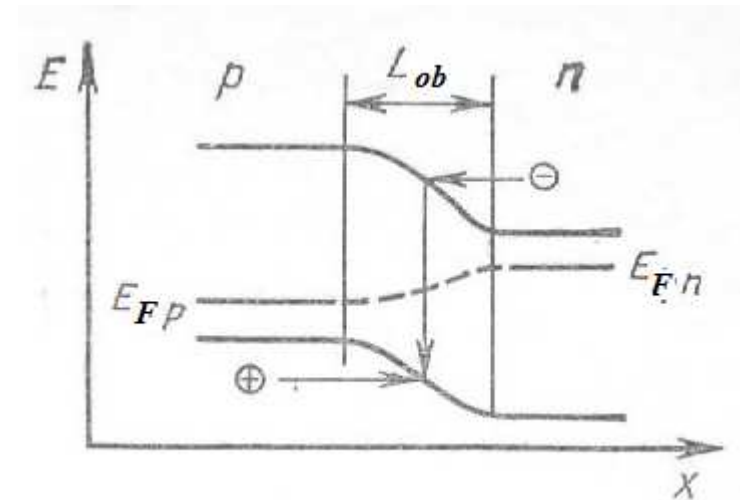
Egerde ýarymgeçirijide göni we göni däl geçişiň bolmagynyň mümkinçiligi bar bolsa onda, lýuminessensiýa iki aýratyn bölekden durýar. Lýuminessensiýa spektriniň uzyn tolkun uzynlyklýsy göni däl geçişe degişli, gysga tolkun uzynlyklýsy göni geçişe degişlidir. Göni däl geçiş germaniý kristalynyň lýuminessensiýa şöhlelenmesiniň spektri.

### Ýarymgeçirijilerde lýuminessensiýa şöhlelenmesiniň relaksasiýasy.

Ýarymgeçiriji kristallarynda oýandymaklyk bes edilmegi bilen lýuminessensiýa şöhlelenmesi birbada gutarmaýar. Sebäbi lýuminessensiýa şöhlelenmesiniň intensiwligi bir sekuntda bolup geçýän rekombinasiýanyň sanyma göni proporsionaldyr.

$$I_1 \approx \left( \frac{dn}{dt} \right) \quad (9.3)$$

Haçanda şöhlelenme monomolekulýar bolsa, ýagny fotonyň ýuwdulmasy we şöhlelenme bir merkezde bolup geçýän bolsa, onda oýandrylan



2.8-nji surat

Eger bazanyň galyňlygy esasy däl zarýad äkidijileriň diffuzion uzynlykdan köp az bolsa, onda bazany ýuka diýip atlandyrylýar. Ýylylyk tok gadagan zonanyň ininiň, ulalmagy bilen birden çalt peselýär.

Geçişe garşylykly bazanyň araçäginde ýerleşip biler: daşky metallik kontakt,  $n^- - n^+$  tipli geçiş (diodlaryň we tranzistorlaryň birnäçe görnüşleri), ikinji p-n geçiş (tranzistorlar, integral mikroshemalar), kristalyň üsti ýa-da dielektriki gatlak. Aýratynam, ýuka bazaly p-n geçişler mikroelektronikada giňden ýaýrar. Eger görkezilen araçäkde generasiýanyň we rekombinasiýanyň tizligi az bolsa (mysal üçin, eger araçäk  $n - n^+$  görnüşli geçişden ybarat bolan

ýagdaýda, onda ýylylyk tok galyň bazaly ýaly bazada esasy däl zarýad äkidijileriň ýylylyk generasiýasy bilen kesgitlenilýär. Şonuň üçin galyňlygy azalanda, ýagny göwrümde zarýad äkidijiler generirlenýärler, diýmek, tok peselýär. Eger generasiýanyň tizligi uly bolsa, mysal üçin haçanda araçäk metallik kontaktdan ybarat bolan ýagdaýda, onda esasy goşant ýylylyk toga bu araçäkde generirlenýän zarýad äkidijilerdir.

#### **Ideallaşdyrylan p-n geçişniň differensial garşylygy.**

$$r_{dif} = dU / dI = q_T (I + I_0) \quad (2.15)$$

Göni süýşmede  $r_{dif}$  toguň köpelegi bilen azalýar.

$I=300K$  we  $I=1mA$  alarys.

$$r_{dif} = 260m \text{ we } I=10mA - r_{dif} = 2,60m$$

Ters naprýaženiýede  $|U| \geq (2 \div 3)\phi$  differensiýa garşylyk  $I \rightarrow I_0 r_{dif} \rightarrow \infty$  birden çalt ulalýar.

Göni tokda  $I \gg I_0$  differensial garşylyk temperaturanyň ýokarlanmagy bilen çyzykly ulalýar.

Differensial garşylyk kiçi üýtgeýän signallarda p-n geçişni işini beýan etmek üçin ulalýar.

ýokardaky derejeleriň doldurylmagyna getirýär. Bu bolsa energiýasy gadagan zolagyň giňliginden ( $E_g$ ) uly bolan ýagtylyk fotonlarynyň şöhlemenegine we lýuminessensiýanyň spektrinde gysga tolkun uzynlykly (ýokary energiýaly) «guýrugyň» emele gelmegine getirýär. n-tipli InAs ýarymgeçiriji kristalynyň fotolýuminessensiýa şöhlemenmesiniň spektri. Garyndylaryň konsentراسiýanyň artmagy bilen spektrde ýokary energiýa tarap gyranyň we spektriň maksimumynyň uly energiýa süýşmegi Fermiň derejesiniň geçiş zolagyň düýbine süýşmegi bilen düşündirilýär.

#### Geçiş zolak we walent zolak aralykdaky göni däl geçiş.

Geçen sapakdan belli bolyşy ýaly göni däl gadagan zolakly ýarymgeçirijide, ýagtylygyň ýuwdulmasy fononyň ýuwdulmagy we göýberilmegi bilen bolup geçýär. Onda şeýle ýarymgeçirijilerde elektronyň rekombinasiýasy hem fononyň ýuwdulmagy ýada göýberilmegi bilen bolup geçýär. Bu geçişde, ýagny elektronyň rekombinasiýasynda fononyň göýberilmegi ýokary ähtimallyga eýedir. Onda göni däl geçişli ýarymgeçirijilerde fotolýuminessensiýa şöhlemenmesiniň spektrini şeýle ýazyp bolýar.



Geçiş zolak bilen walent zolagyň arsyndaky göni geçiş.

Goni geçişli gadagan zolakly ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň ýuwdulmagy erkin elektronyň we erkin deşiň emele gelmegini ýüze çykaryp, olaryň tolkun wektorlary birmeňzeşdir ( $k=k'$ ). Yagtylyk energiýasy ýuwdulandan soň, belli bir wagtdan erkin elektron geçiş zolagyň düýbýne gelýär, erkin deşik walent zolagyň depesine barýar (şeyle hadysa relaksasiýa diýülýär). Gaty jisimlerde şeyle ýagdaý köplenç  $10^{-10}$ - $10^{-12}$ c töweregi wagtda amala aşýar. Haçanda relaksasiýadan soň erkin elektronyň we deşiň birmeňzeş tolkun wektorlary bar bolan ýagdaýynda, rekombinasiýa prosessiniň ähtimallygy ýokarydyr.

Bu ýagdaýda, ýagtylygyň ýuwdulma prosessine meňzeşlikde, göýberilýän şöhläniň spektri aňlatma bilen ýazylýar.

$$I(\hbar\nu) = B(\hbar\nu - E_g)^{1/2}$$

(9.1)

bu ýerde B - hemişelik san.

Bu aňlatmadan görünişi ýaly, erkin zarýadlaryň rekombinasiýasy esasynda ýüze çykýan şöhlelenme-lýuminessensiýa, spektriň kiçi energiýasy tarapyndan, ýagny  $\hbar\nu = E_g$ , çäklidir.

Gelip düşýän ýagtylygyň energiýasynyň  $\hbar\nu \geq E_g$  bolmagy we artmagy, geçiş zolagynda

Az pes ýygýlykly signallar üçin p-n geçiş edil çyzykly rezistor bolup hyzmat edýär, garşylygy WAH-da işçi nokatlaryň ýagdaýyna, režima baglydyr.

## 2.5 Real p-n geçişiň Wolt-amper häsiýetnamasy.

Ideallaşdyrylan p-n geçişiň WAH çykarylanda diňe esasy fiziki prosesleri göz önünde tutulan: esasy däl zarýad äkidijileriň p-n geçişe golaý neýtral oblastlarda esasy däl zarýad äkidijileriň inžeksiýasyna we ekstraksiýasyna we olaryň diffuziýasyna seredildi. Real p-n geçişlerde ýokarda görkezilenlerden başgada WAH täsir edýän başga fiziki effektlere ýüze çykarylady.

### WAH göni şahasy. Rekombinasiýa togy.

Ýarymgeçirijiniň p-n geçiş oblastlarynda şonuň ýaly neýtral oblastlarda hem zarýad äkidijileriň rekombinasiýasy bolup geçýär.

Ýeterlik derejede ýokary energiýa eýe bolan n-oblastyň elektronlary garyplaşan gatlagda düşüp biler we p-oblasta gelýän deşikler bilen rekombinirlenýärler. Bu halatda elektronlar n-oblastdan, emma deşikler p-oblastdan gidýärler zarýad äkidijileriň şeyle hereketi sebäpli goşmaça göni tok ýüze çykýar, muňa rekombinasiýa togy diýip atlandyrylýar.

Doly göni tok p-n geçişiniň inžeksiýa  $I_{inz}$  we rekombinasiýa togundan ybaratdyr  $I_{rel}$

Diýmek, real p-n geçişde göni tok ideallaşdyrylan p-n geçişiniňkiden ulydyr.

Inžeksiýanyň togy  $n^2 i \sim \exp\left[-\Delta E_G / (KT)\right]$  proporsionaldyr, ol has çalt temperatura we gadagan zonanyň inine baglydyr rekombinasiýa togy bilen deňeşdirilende we  $n i \sim \exp\left[-\Delta E_G / (2KT)\right]$ .

Şeýlelikde, rekombinasiýa togy göni togyň esasy düzüminden ybaratdyr.  $(I_{inz} \gg I_{rek})$  (gadagan zonaly ýarymgeçirijilerde az göni naprýaženiýede).

Kremniý bipolýar tranzistorlaryň işinde rekombinasiýa togyň ähmiýeti uludyr, aýratynam integral shemalarda, az toklarda we aşaklandyrylan temperaturalarda.

### Bazanyň garşylygynyň täsiri.

Ideallaşdyrylan p-n-geçişiniň WAH çykarylanda bazanyň garşylygy nola deň diýip

Real p-n-geçişlerde garşylyk  $10 \div 100 \text{ Om}$  çenli baha eýe bolýar. Bu ýagdaýda daşky naprýaženiýe garyplaşan we baza oblastlaryň arasynda paýlanylýar.

ters hadysadyr. Ýarymgeçirijiniň şeýle oýandyrylan ýagdaýyny birnäçe usul bilen almak mümkin. Haçanda lýuminessensiýa daşky gelip dýşýän ýagtylygyn energiýasynyň hasabyna ýüze çykýan bolsa onda oňa fotolýuminissensiýa diýilip at berilýär.

Eger-de lýuminessensiýa kristaly ýakary tizlikli elektronlar bilen urmaklygyň hasabyna ýüze çykýan bolsa, onda oňa katodolýuminessensiýa diýilip at beilýär. Bulardan başgada lýuminessensiýa rentgen şöhesi tarapyndan oýandyrylyp bilýär, şeýle Lýuminissensiýa rentgenolýuminissensiýa diýilýär. Ýokarda aýdylanlary göz önünde tutup lýuminissensiýa şeýle kesgitleme berilýär. Lýuminissensiýa bu jisimiň ýylylyk şöhlelenmesinden artykmaç energiýanyň hasabuna ýüze çykýan şöhlelenme bolup, adaty elektromagnit şöhesi ýaly häsiýetlendirilýär. Kesgitlemä laýyklykda, jisimiň deňagramlykdaky ýylylyk şöhlelenmesinden tapawutlylykda, lýuminissensiýa deňagramlykda däl şöhlelenmedir. Islendik elektromagnit şöhlelenmesi ýaly, lýuminissensiýa özüniň intensiwlegi, kogerentligi we oýandyrmadan soňky şöhlelenmän dowamlylygy bilen tapawutlanýar. Lýuminissensiýada ýagtylygynyň ýuwdulmasy we şöhlelenmesi aralyk hadysalar bilen bir-birinden bölünendir, şol sebepli hem oýandyрма bes edilenden soň hem lýuminissent şöhlelime belli bir wagt dowan ediyär

Çyzg. 8.1 Fototranzistoryň çykyş häsiýetnamasy

Ýokarky çyzgyda (çyzg. 8.1) fototranzistoryň çykyş häsiýetnamalary getirilen. Olaryň görkezilişi ýaly naprýaženiýe ulalanda elektrik proboý peýda bolýar (ştrihli çyzyklar).

Fototranzistorlaryň esasy häsiýetnamalary – bu integral duýgurlugy, işjeň naprýaženiýasy (10-15 W), garaňkylyk akymy (ýüzlerçe mikroamperlere çenli), işjeň akymy (onlarça milliampperlere çenli), iň uly rugsat edilen dargadylýan kuwwat (onlarça milliwattlara çenli), araçäg ýylylygy (birnäçe kiligersden birnäçe megagerse çenli).

## 6. ÝARYMGEÇIRIJILERDE LÝUMINESSENSIÝA HADYSALARY.

Oýandyrylan ýagdaýyndaky ýarymgeçirijilerde, elektromagnit tolkunlarynyň şöhlelenmesiniň (göýberilmesiniň) ýüze çykmagy mümkin. Bu hadysa lýuminessensiýa diýlip at berilip, ol ýuwdulma hadysa

Onda

$$I = I_0 [\exp((U - I_{rb}) / \varphi_{\tau}) - 1]$$

ýa-da

$$U = \varphi_{\tau} \ln \left[ \left( I / I_0 \right) + 1 \right] + I_{rb}$$

Az göni toklarda ikinji çleni göz önünde tutmasaň hem bolar. Emma toguň ösmegi bilen bazada naprýaženiýäniň peselmegi p-n-geçişdäki naprýaženiýäniň peselmeginden ýokary bolup biler, WAH çyzykly bölek ýüze çykýar.

Ýokary derejede inžeksiýada bazanyň garşylygynyň modulýasiýasynyň effekti ýüze çykarylýar, bazada zarýad äkidijileriň konsentrasiýasynyň köpelmegi sebäpli  $r_b$  azalmagy toguň ulalmagy bolup geçýär. Bu

$$\text{halatda } r_b = r_{b0} \left[ 1 - \left( L_p / W_p \right) \ln(1 + \delta) \right],$$

$r_{b0}$  - modulirlenmedik garşylyk,

$$\delta = \Delta p_n(0) / W_g = - \left( n_i^2 / N_g^2 \right) \left( I / I_0 \right). \quad I = 10 \text{ mA},$$

$W = 50 \text{ mkm}$ ,  $L_p = 10 \text{ mkm}$ ,  $r_b = 180 \text{ m}$  alarys, onda

$$r_{b0} = 500 \text{ m}.$$

Praktikada real p-n geçişiň WAH göni şahasy

$$I = I_0 [\exp(U / (m\varphi)) - 1]$$

formula bilen appraksimasiýalaşdyrylýar, niredе  $I_0$

we  $m = 1 \div 2$  (ideal dälligiň faktory) –

aproximasiýanyň bu parametrleri eksperimentiň we formulanyň maglumatlaryň iň gowy gabat gelýänlerinden saýlanylýar.

### WAH ters şahasy. Doýgun tok.

Garylaşan gatlakda emele gelýän elektronlar we deşikler real p-n geçişde ters napryaženiýede termogenerasiýa sebäpli elektrik meýdanda hereket edýärler garşylykly tarapa elektronlar n-oblast tarapa, emma deşikler-p-oblast tarapa. Bu zaryad äkidijileriň dreýf hereketi tok generasiýany emele getirýär. Bir göwrüm birlikde bir wagat biriginde (generasiýanyň tizligi) generirlenen zaryad äkidijileriň sany  $n/\tau$ , niredede  $\tau$ -garylaşan gatlakda zaryad äkidijileriň ýaşayyş wagty. Bu ululygy garylaşan gatlagyň göwrümüne köpeldip  $SL_{ob}(U)$  bir wagat biriginde p-n-geçişde generirlenýän zaryad äkidijileriň doly sanyny alarys. Olaryň hemmesi elektriki meýdan tarapdan garylaşan gatlakdan zyňylýar, şonuň üçin generasiýany tapyp:

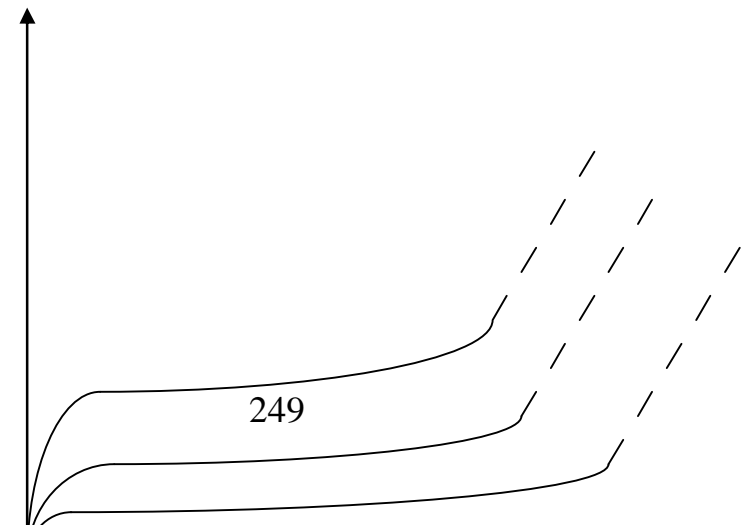
$$I_r = qSL_{ob}(U)n_t / \tau \quad (2.18)$$

Diýmek, real p-n-geçişiň ters togy ideal geçişiňki bilen deňeşdirilende köpdür, ýagny ýylylyk tokdan başga  $I_0$  generasiýa togy hem akýar. Soňky

taýýarlama mümkinçilik berýär. Emma şeýle fotoelementleriň giňden peýdalanylmagyny gazanmaklyk üçin diňe olaryň effektiwligini ýokarlandyrmak, olaryň häsiýetnamalarynyň durnukly bolmagyny gazanmaklyk zerurdyr.

Amorf kremniý esasyndaky ýarymgeçiriji fotoelementleriň häsiýetnamalary ýagtylyk şöhlesiniň intensiwliginiň ululygyna hem-de temperatura baglylykda üýtgäp durýar. Ondan basgada amorf gatlag kislorodyň diffuziýasy bolup, gün elementleriniň esasy energetiki häsiýetnamalarynyň erbetleşmegine getirýar.

Fototranzistorlarda fotodiodlara görä integral duýgurlugy has uly, onlarça esse uly we bir lýmene ýüzlerçe milliamper bahalary kabul edip bilýärler. Ýöne erkin bazaly fototranzistorlar pes temperatura durgunlygy eýeleýärler. Bu ýetmezçiligi aýyrmak üçin dürli stabilizasiýa usullary ulanylýarlar.



gaty oňat geljegi bolan material hökmünde amorf kremniý seredilýär.

Emma amorf kremniniň esasynda döredilen gün elementleriniň peýdaly täsir koeffisiýenti gaty ýokary däl. Öňýň sebäbi hem bu elementlerdäki fototogyň ululygynyň teoretiki hasaplama seredende gaty kiçi bolmagydyr.

Amorf kremniý esasyndaky fotoelementleriň ýagtylygy duýuş spektri, zarýadlaryň ýygnaýan meýdany bilen kesgitlenilýär. Şol sebäpli hem fototogyň geni utgaşma bahasynyň (fototok korotkogo zamykaniýa) gelip düşýän ýagtylygyň spektrine baglylygy şeýle kesgitlenilýär.

$$I_{g.u.} = I_0 \left[ 1 - e^{-K d_{\ell}(K)} \right],$$

(8.1)

bu ýerde  $I_0$  - ýagtylyk tarapyndan generirlenen togyň dykzlygy;  $d_{\ell}$  - ýagtylyk tarapyndan generirlenen zarýadlaryň ýygnaýan aralygy.

Käbir ýerine ýetirilen barlaglara görä  $d_{\ell}$  ululygynyň san bahasy gelip düşýän ýagtylygyň energiýasyna (tolkunuzynlygyna baglylykda üýtgeýär). Ýagtylyk tarapyndan oýandyrylan zarýadlaryň ýygnaýan aralygy ortaça 0,1 - 0,2 mkm töweregidir. Kristallik ýarymgeçirijilerden tarawutlylykda, amorf kremnini ulanmagyň özi, gaty uly meýdanly gün elementlerini

garyplaşan gatlagyň giňelmegi sebäpli ters naprýaženiýanyň ösmegi bilen ulalýar. (2.6), (2.14) we (2.18) – den

$$I_r / I_0 \sim n_t^{-1} \sim \exp[\Delta E_a / (2KT)]$$

ýagny generasiýa toguň paýy doly ters tokda has ýokarydyr. Gadagan zonanyň ini bilen deňeşdirilende we aşak temperaturada, mysal üçin, kremniý p-n geçiş üçin  $T=25^{\circ}\text{C}$  emma  $U' = -1\text{W}$ ,  $I_r = 10^{-9}\text{A}$ , emma

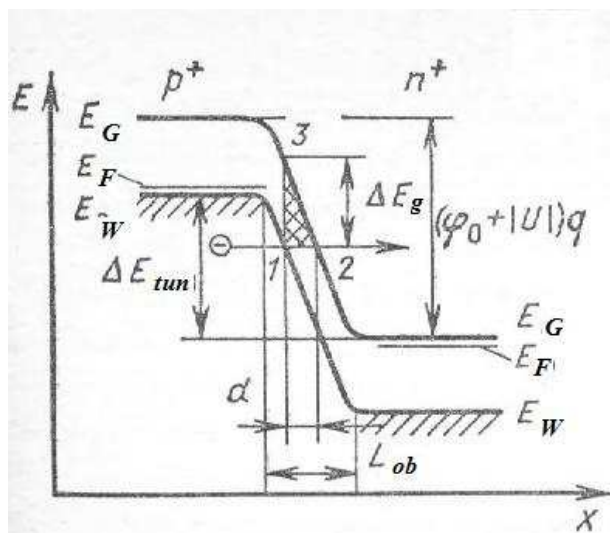
$I_0 = 10^{-IX}\text{A}$  alarys.

**Tok ýitgisi.** Real p-n geçişler ýarymgeçiriji kristalyň üstüne çykýan bölejige eýe bolýarlar.

2.1a suratda daşyna çykýan bölekler gyraky böleklerden ybaratdyr we oksidiň ýuka gatlagynyň aşagynda ýerleşýär. Üstde hasaplanmanyň we üst zarýadyň täsiri netijesinde p we n oblastlaryň arasynda geçiriji ýuka gatlagyň kanallaryň emele gelmegi mümkin, olardan tok ýitgisi geçýär. Ol naprýaženiýe proporsional ulalýar we ýeterlik derejede ýokary ters naprýaženiýede ýylylyk taýdan we generasiýa toklardan ýokarydyr. Ýitgi togy üçin temperatura baglylygy örän az. Kremniýden ýasalan abzallarda we integral shemalarda kristalyň üsti goraýjy oksid gatlagy bilen ýapylýar we ýitgi togy, düzgün boýunça ujypsyzdyr.

**Deşik – elektron geçişde deşilme.** Ters naprýaženiýanyň oblastlarynda geçiş arkaly toguň çalt

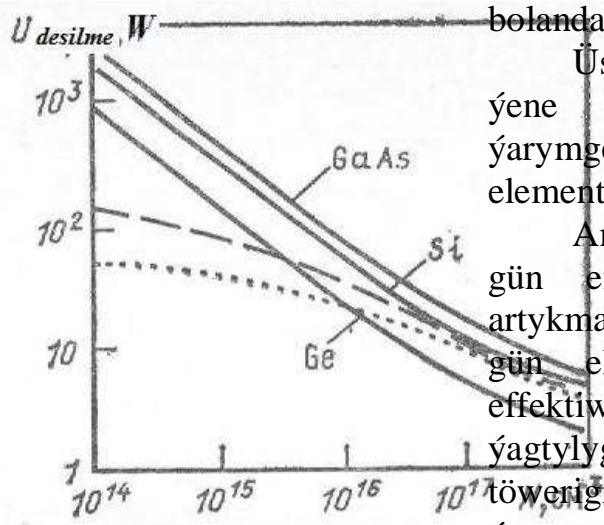
ulalmagy deşilme naprýaženiýe diýip atlandyrylýan  $U_{des}$  ýokary naprýaženiýede deşilme ýüze çykýar. Üç görnüşli deşilme mehanizmler bar: **tunnel, lawin we ýylylyk.**



2.9-njy surat

njy surat

Tunnel deşilme tunnel effekti bilen baglydyr – elektronlaryň potensial (energetiki) barýer arkaly energiýalary üýtgemesiz geçişlere aýdylýar. Tunnel effekti örän az galyňlykly barýerde – 10nm, güýçli garyntgy goşulan  $p^+$  we  $n^+$  oblastlaryň arasyndaky



2.10-njy surat

kwant effektiwligi bar. Bu fotodiodaýň ýagtylyk duýujylygy  $1\div 6\text{eV}$  aralykda dowam edip, energiýanyň artmagy bilen  $h\nu \approx 3,1\text{eV}$  çenli bir derejede galýar. Gelip düşýän fotonyň energiýanyň ultramelewşe bölegi üçin, haçanda  $h\nu > 3,1\text{eV}$  bolanda, fotodiodaýň effektiwligi peselýär.

Üst päsgelçilikli ýarymgeçiriji fotodiodlaryň ýene bir uly topary, olam metal-amorf ýarymgeçirijisepiniň esasynda döredilen gün elementleridir.

Amorf ýarymgeçirijileriniň esasynda döredilen gün energiýasyny owrújileri ulanmagyň esasy artykmaçlygy olaryň arzanlygy bilen baglydyr. Şeýle gün elementleriniň şu günke ýeten maksimal effektiwligi, ýagny ýeriň üstüne gelip güşýän ýagtylygy öwürjilik peýdaly täsir koeffisiýenti 10% töwerigidir. Amorf ýarymgeçirijileri monokristallik ýarymgeçirijilerden şeýle häsiýetleri bilen tapawutlanýarlar:

- Elektronlaryň we deşikleriň ýaşaýyş wagty amorf ýarymgeçirijilerinde kristallik ýarymgeçirijilere çeredeniňde gaty kiçidir.
- Bu ýarymgeçirijilerde dreýf hereket ükypçylygy (çaltlygy) kristallik ýarymgeçirijilere çeredeniňde pesdir.

Amorf ýarymgeçirijimateriallarynyň içende dürli fotoelementler üçin, has hem gün fotoelementleri üçin

( $1/\alpha \approx 0,1 \text{ mkm}$ ). Sol sebäpli hem üst päsgelçilikli diodlara, haçanda ýuka metal gatly gowy saýlanylyp alynanda, gelip düşýän fotonyň aglabasy üste golaýda ýawdulýar. Ederde ýuka metal gatlagy we serpilmä garşy gatlak ýörite saýlanylyp alynsa, onda fotonyň aglabasy bu gatlaklardan geçip üste golaýda ýarymgeçirijiniň içinde ýuwdulýar we fotoakyma goşant goşýar.

### Fototranzistorlaryň esasy häsiýetnamalary

Fototranzistorlar geterogurluşlaryň hasabyna taýýarlanylyp bilinýär. Onuň üçin n-AlGaAs-p-GaAs-n-AlGaAs geterotranzistoryň energetiki zolagynyň diagrammasy ulanylýar. Şeýle geterotranzistor ýapylma naprýaženiýanyň ýokary bahasy, iki ugur boýunça hem güýçlendirme koeffisiýentiniň ýokary bahasy bilen hem-de koordinatlar başlangyjyndan geçýän tok-naprýaženiýa baglylygyň göniçyzyklylygy bilen tapawutlanýar. Şeýle tranzistorlaryň ýokary effektivligi emitter we kollektor gatlaklaryň gadagan zolaglarynyň giňliginiň bazanyňka seredeniňde giňliginden gelip çykýar. Şeýlelikde ýönekeý fototranzistorlardaky baza pes garyndy girizmeklik zerurlygy ýitýär, sebäbi emitterden baza tarap ýokary inžeksiýa gadagan zolaklaryň giňliginiň tapawudy esasynda ýüze çykýar.

Au-n-Si fotodiodyň gurluş shemasy we gelip düşýän ýagtylygyň tolkun uzynlygyna baglylykda

geçişlerde ýüze çykýar.  $\left(N_g, N_a \geq 10^{18} \text{ sm}^{-3}\right)$  2.9-

njy suratda  $p^+ - n^+$  geçişiň energetiki diagrammasy görkezilen ters naprýaženiýede strelka bilen elektronyň tunnel geçişiniň ugry p - oblastyň walent zonadan n – oblastyň geçiriji zonasyna belgilenen.

Elektrotron 1-nji nokatdan 2-nji nokada tunnelirlenýär, ol energetiki barýeriň aşagyndan geçýär. Üçburçlyk görnüşde (ştrihlenen üçburçlyk 1-3 nokatlarda derejeleri bilen), elektronyň bu halatda üýtgemeyär.

Elektron üçin, ýagny energiýalary tunnerlirlenmegiň interwalyna laýyk gelyän  $\Delta E_{\text{tun}}$ , olarda iki tarapdan ygtyýar edilen energiýa derejeler ýerleşen tunnel geçişler mümkindir. Barýeriň beýikligi  $\Delta E_a$  deň, ol

düzgün boýunça  $p^+ - n^+$  geçişiň barýeriniň beýikliginden azdyr,  $q(\varphi_0 + |U|)$  deň. Barýeriň ini “d”

garyplaşan gatlagyň galyňlygyndan kiçidir, ters naprýaženiýanyň ulalmagy bilen barýeriň galyňlygy azalýar, tunnerlirlenmegiň ähtimallygyny ýokarlandyrýar. Tunnelirlenmegiň iterwalynyň ulalmagy bilen tunnel togy çalt - birden ösýär we onda elektronlaryň sany köpeliýär. **Tunnel deşilme** arassa görnüşde diňe garyntgylaryň konsentrasiýasy ( $5 \cdot 10^{-18} \text{ sm}^{-3}$  ýokary), emma deşilme naprýaženiýe

0 - 5W bolan halda ýüze çykarylýar. Temperaturanyň ýokarlanmagy gadagan zonanyň ini ýeterlik derejede azalýar we deşilme naprýaženiýa peselýär. Şeýlelikde, temperatura koeffisient tunnel deşilmäniň naprýaženiýasy otrisateldir.

**Lawin deşilme.** Güýçli elektriki meýdanyň täsiri astynda zarýad äkidijileriň lawinleriniň emele gelmegi bilen baglydyr. Güýçli elektriki meýdanda elektronlar erkin ylgawyň uzynlygynda ýokary energiýa eýe bolýarlar we ýarymgeçirijiniň atomlarynyň udar ionlaşmagy usuly bilen elektron – deşik jübütleriň emele gelmegini amala aşyrylýar.

**Lawin köpeldijiniň koeffisiýenti** "M" garyplaşan ýuka gatlagyň bir tarapyna girýän "zarýad äkidijileriň togunyň şol bir belgili zarýad äkidijileriň garyplaşan gatlagyň beýleki tarapyndan çykýan toga bolan gatnaşyga deňdir. ( $M \geq 1$ ) Ters naprýaženiýanyň ulalmagy "M" bahasy ulalýar. Baha bermek üçin approksimasiýany "M" ulanylýar.

$$M = \left[ 1 - \left( U_{obr} / U_{prob} \right)^m \right]^{-1}, \quad \text{niredede } m -$$

ýarymgeçirijiligi materialyna we n-geçişiň bazanyň tip geçirijiligine bagly parametrdir. Kremniý n - tipli we germaniý p - tipli geçirijilikli üçin  $m=5$ , kremniý

p - tipli we germaniý n - tipli geçirijilikli üçin  $m=3$ . Deşilme  $U_{ters} = U_{prob}$  bolan ýagdaýda ýüze çykýar

2. Haçanda  $\hbar\nu > E_g$  we  $U_b > U$  (15.1b surat), gelip duşýan ýagtylyk şöhlesi elektron-deşik jübütleriniň generirlenmegine getirýär we üst päsgelçilikli fotodiodyň esasy häsiýetnamalary p-i-n-fotodioda meňzeş bolýar. Fotodiodyň kwant effektiwligi şeýle formula bilen kesgitlenilip bilinýär:

$$\eta = \frac{I_{fu}/e}{P_s/S \cdot \hbar\nu} = (1-R) \left( 1 - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha L_p} \right), \quad (7.3)$$

bu ýerde  $I_{fu}$ - umumy fotoakym,  $P_s$ - gelip düşýän şöhläniň kuwwaty,  $S$ -fotodiodyň ýagtylandyrylýan meýdany,  $R$ -serpilme koeffisiýenti,

$$L_p = \sqrt{D_p \tau}, \quad \alpha - \text{ýuwdulma koeffisiýenti.}$$

3. Haçanda  $\hbar\nu > E_g$  we  $U \approx U_b$  bolan ýagdaýda lawina fotodiodaý hökmünde seredilip biliner.

Üst päsgelçilikli fotodiodlaryň effektiwligi görünýän we ultramelewşe ýagtylyk üçin ulydyr. Ýagtylygyň tolkun uzynlygynyň şeýle diapozonyna gabat gelýän ýarymgeçirijiler üçin ýuwdulma koeffisiýenti gaty uly bolanlygy sebäpli ( $\sim 10^5 \text{sm}^{-1}$  we köp) ýuwdulmanyň effektiw uzynlygy has kiçidir



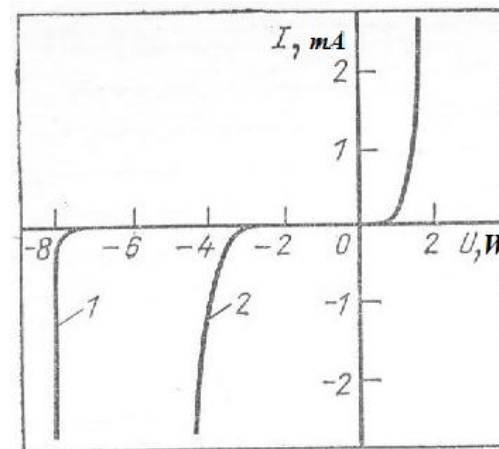
zonalarynyň giňliginiň bazanyňka seredeniňde giňliginden gelip çykýar. Şeýlelikde ýönekeý fototranzistorlardaky baza pes garyndy girizmeklik zerurlygy ýitýär, sebäbi emitterden baza tarap ýokary inžeksiýa gadagan zonalaryň giňliginiň tapawudy esasynda ýüze çykýar.

Haçanda pes garyndyly baza bolan ýagdaýynda, göwrüm zaryadynyň esasy giňligi bazada ýerleşýär, emma geterogeçişli fototranzistorda göwrüm zaryadynyň esasy giňligi we geçişdäki päsgelçilik kollektor böleginde ýerleşýär.

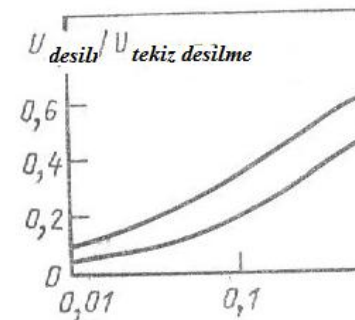
Şottki üst päsgelçilikli fotodiodlar ýokary effektivlikli fotodetektor hökmünde peýdalanylyp bilinýär. Şottki üst päsgelçilikli fotodiodlaryň adaty shematiki görnüşi we energetiki diagrammasy ulanylýar. Ýgtylyk duýujy üst päsgelçilikli diodlarda ýokary metal gatlakda ýagtylygyň ýitgisini azaltmak üçin, bu metal gatlagy gaty ýuka ( $\sim 100 \text{ \AA}$ ) çökdürilýär. Üst päsgelçilikli diodlar ulanylýan maksadyna laýyklykda, gelip düşýän ýagtylyga we daşdan berilýän elektrik meýdanyna baglylykda dürli režimde işläp bilýär:

1. Haçanda  $E_g > \hbar\nu > \varphi_{py}$  we  $U_b > U$  (bu ýerde  $U_b$  - lawina boýunça böwsülme naprýaženiýa) bolanda ýagtylygyň täsiri esasynda metalda oýandyrylan elektronlar, potensial päsgelçilikden geçen ýagdaýynda, ýarymgeçirijä girýär.

we  $M \rightarrow \infty$  toguň tükeniksiz ulalmagyna laýyk gelýär. Lawin (syrgyn) köpelmäni göz önünde tutup, wolt-amper häsiýetnama deşilme naprýaženiýäniň golaýynda  $I = I_0 M(U)$  görnüşde ýazmak bolar.



2.11-nji surat  
surat



2.12-nji

2.11-nji suratda lawin deşilmäniň naprýaženiýasynyň p-n geçişler üçin bazada garyntgylaryň konsentrasiýasyna baglanyşyklary germaniýde, kremniýde we arsenid gallide garyntgylaryň basgançakly paýlanylyp getirilen (tutuşlaýyn egri çyzyklar). Gadagan zonanyň ini näçe uly bolsa p-n geçişiň elektrik meýdanyna zaryad äkidijiler şonça-da köp energiýany almalydyr we udar ionlaşmasy

bolup geçmelidir. Şol sebäpli uly bahaly  $\Delta E_a$  (GaAs) deşilmäniň uly naprýaženiýasy degişlidir. Temperaturanyň yokarlanmagy bilen Lawin (syrgyn) deşilmäniň naprýaženiýesi ulalýar, bu bolsa zarýad äkidijileriň erkin ylgawynyň azalmagy bilen düşündirilýär. Ylgawyň az uzynlykda elektrik meýdanyň uly güýjenmesi talap edilýär, ýagny zarýad äkidijiler ýeterlik derejede energiýa eýe bolup udar ionlaşmany üpjün edýär. Şeýlelikde, lawin (syrgyn) deşilmäniň naprýaženiýesiniň temperatura koeffisiýenti položitelidir. Garyntgylaryň ýokary bolmadyk konsentrasiýalarynda ( $10^{18} \text{ sm}^{-3}$  az) lawin deşilmäniň naprýaženiýesi tunnel bilen deňeşdirilende pes, ýagny lawin deşilme ýüze çykýar. Bu ýagdaýda  $U_{\text{prob}} \geq 6\Delta E_a / q$  (G.G.W Si üçin).

Garyntgylaryň ýokary konsentrasiýalarynda ( $10^{19} \text{ sm}^{-3}$  ýokary) lawin (syrgyn) deşilmäniň naprýaženiýesi tunnel bilen deňeşdirilende ýokarydyr we tunnel deşilme bolup geçýär.  $U_{\text{prob}} \leq 4\Delta E_a / q$ .

Garyntgylaryň aralyk konsentrasiýalarynda ( $10^{18} \text{ sm}^{-3} \leftarrow N_{\text{npr}} \leftarrow 10^{19} \text{ sm}^{-2}$ ) deşilme iki mehanizm tarapdan amala aşyrylýar. Praktikada deşilmäniň mehanizmlerini deşilme naprýaženiýäniň temperatura koeffisiýentiniň belgisi boýunça kesgitlenilýär. 2.14 suratda kremniý p-n geçişleriň

Başga tarapdan seredeniňde, fototranzistoryň duýujlygyndaky utuş, çaltlykdaky utuluşa getirýär. Hakykatdanda, fototranzistorda fotoakymyň ytgaşma wagty deňagramlykda bolmadyk zarýadlaryň bazadan diffuziýa wagty bilen kesgitlenilýär. Emma fotodiodda ýagtylygyň täsiri bilen göwrüm zarýadynyň ýakynynda dörän zarýad p-n-geçişe girýär, bu wagt bolsa, bazadan zarýadyň geçiş wagtyndan gaty kiçidir.

Bipolýar fototranzistorlar başga ýarymgeçiriji esbaplar bilen bilelikde, bir goşuk mikroschemada döredilip bilenýär. Meselem, fototranzistor goşmaça tranzistor bilen bilende döredilende onuň güýçlendirme koeffisiýentiniň yokarlanýar. Oň belläp geçişimiz ýaly şeýle fototranzistor toplymynyň çaltlygy gaty peselýär. Eger ýönekeý fotodiodyň utgaşma wagty  $\sim 0,01 \text{ mks}$  bolsa bipolýar fototranzistoryňky  $\sim 5 \text{ mks}$  töweregidir, emma goşmaça tranzistorly fototranzistoryň utgaşma wagty  $\sim 50 \text{ mks}$ .

Fototranzistorlar geterogurluşlaryň hasabyna taýýarlanylýp bilinýär. n-AlGaAs-p-GaAs-n-AlGaAs geterotranzistoryň energetiki zonasynyň diagrammasy görkezilen. Şeýle geterotranzistor ýapylma naprýaženiýanyň ýokary bahasy, iki ugur boýunça hem güýçlendirme koeffisiýentiniň ýokary bahasy bilen hem-de koordinatlar başlangyjyndan geçýän akym-naprýaženiýa baglylygyň göniçyzyklylygy bilen tapawutlanýar. Şeýle tranzistorlaryň ýokary effektivligi emitter we kollektor gatlaklaryň gadagan

$$I_k = I_{yg} + I_f + \alpha I_\ell \quad (7.1)$$

Eger-de  $I_k = I_f = I$  bolýanlygyny göz önünde tutsaň, onda:

$$I = I_{yg} + I_f + \alpha I \quad (7.1)$$

Bu ýerde

$$I = \frac{I_{yg} + I_f}{1 - \alpha} = \frac{I_{yg}}{1 - \alpha} + \frac{I_f}{1 - \alpha}; \quad (7.2)$$

(13.2) deňlikden görnüşi ýaly, deňlikdäki aňlatmalar

iki bölekden durýar.  $\frac{I_{yg}}{1 - \alpha}$  garaňky ýagdaýdaky akym

we  $\frac{I_f}{1 - \alpha}$  ilkinji fotoakym,  $\frac{1}{1 - \alpha}$  gezek

güýçlendirilen ýagdaýynda. Eger  $\alpha = 0.995$  bolsa, onda  $1/(1 - \alpha) = 200$  bolýar. Şeýlelikde fototranzistoryň duýujlygy fotodiodyňka seredeniňde gaty köp ýokarydyr.

syrgynly (1) we tunnel deşilmeli (2) WAH ters şahasy getiriler. Eksperimentiň görkezişi ýaly, häsiýetnamanyň krutiznasy ( $dI/dU$ ) lawin deşilme tunnel bilen deňeşdirilende ýokarydyr.

### Tekiz däl p-n geçişň deşilmesi.

Real p-n geçişler tekiz däl gyraky böleklere eýe bolup bilerler, ýarymgeçiriji abzallarda tekiz meýdanlary bolmadyk p-n geçişler tekiz bolmadyk üçüstoklar ulanylýarlar. Bular ýaly geçişleriň analizi garyntgylaryň mydamalyk konsentrasiýalarynda geçişde meýdanyň güýjenmesi ulalýar we deşilmäniň naprýaženiýesi radius krewizne azalanda peselýändigini (r) görkezdi. 2.13 suratda ştrihlenen çyzyklar sferiki geçişň  $r = 1 \text{ mkm}$  görkezilen. Kriwiznanyň radiusy az bolanda  $r < 0.1 \text{ mkm}$  bolanda deşilme naprýaženiýesi garyntgylaryň konsentrasiýasyna bagly däl, emma “r” azalanda peselýär. Lawin naprýaženiýany hasaplamak üçin garyntgylaryň basgançakly paýlanylanda 2.15 suratdaky grafikleri ulanyp bolar. Üstüň golaýynda deşilme naprýaženiýe üst zaryadlara güýçli baglydyr. Üst položitel zaryad elektronlaryň konsentrasiýasyny ýokarlandyrýar, n - tipli bazada üstde, garyplaşan gatlagyň galyňlygynyň üstde we deşilme naprýaženiýanyň azalmagyna getirýär. Şonuň üçin

planar  $p^+ - n$  geçişleriň kemniýde (Si) deşilme üstde bolup geçýär.

### Ýylylyk deşilme.

Ters tok  $I_{ters}$  geçende ýylylyk bölünip çykýanlygy sebäpli  $p - n$  geçişde gyzdyrylma bilen ýylylyk deşilme amala aşyrylýar. Deşikli-elektron geçişde çykarylýan kuwwat  $I_{ters} / U_{ters}$  deň bolan  $p - n$  geçişde we oňa golaý bolan ýarymgeçirijide temperaturanyň ýokarlanmagyna getirýär.

Esasy däl zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy we ýylylyk tok ulalýar. (1.4), (2.13) we mundan beýläk kuwwatyň we temperaturanyň ösmegine alyp barýar. Eger geçişde bölünip çykýan ýylylygyň mukdary berlen ýylylyk mukdardan ýokary bolsa, onda deşilme naprýaženiýede temperaturanyň üznüksiz ulalmagy, şonuň ýaly hem toguň prosesi ösýär. Diýmek, ýylylyk deşilmäniň naprýaženiýesi ýylylyk äkidijiligiň şertlerine baglydyr we daşky sredanyň temperaturasy ýokarlananda peselýär.

Ýylylyk ters togy näçe uly bolsa, şonça-da ýylylyk deşilmäniň naprýaženiýesi pesdir. Uly ters tokly  $p - n$  geçişlerde, mysal üçin, germaniý abzallarda iň bolmanda otag temperaturada ýylylyk deşilme lawin deşilmeden ir düşer. Kremniý  $p - n$  geçişlerde ters toklar örän az we ýylylyk deşilme lawin bilen

güýçlendirmäge mümkinçiligi bolan fotopriýomnikler hökmünde ulanmak mümkin.

Haçanda daşdan ýagtylyk düşmeýän ýagdaýynda  $W_0=0$  tranzistordan garaňkylyk (temnowoý) akym geçýär. Tranzistoryň baza bölegi  $\hbar\nu \geq E_g$  ýagtylyk energiýasy bilen

ýagtylandyrylanda, bazada elektron-deşik jübütleri emele gelýär. Diffuziýa esasynda bu jübütler kollektor geçişine ýetip onuň göwrüm zarýady tarapyndan bölünýär. Şeýlelikde elektronlar kollektor tarapa zyňlyp, ilkinji fotoakymy emele getirýär, deşikler bazada galyp oňyn göwrüm zarýadyny emele getirýär. Ýönekeý bipolar tranzistoryň işleýşine meňzeş, bazadaky oňyn zarýadyň hasabyna emitter  $p-n$  geçişdäki potensial päsgelçilik peselýär. Şol sebäpli emitterden baza tarap elektronlaryň akymymy ýüze çykyp, bu emele gelen elektronlaryň esasy bölegi kollektora geçýär. Bu hadysa bazada emele gelen deşikler elektronlar bilen kompensirlenýänçä dowam edip bilýär. Deşigiň emele geleninden başlap, rekombinirlenýänçä elektronlaryň geçmegi dowam edip, ilkinji fotoakymyň güýçlenmesi dowam eder.

Kollektor akymy  $I_k$ , ýylylyk generasiýasy esasyndaky akymdan  $I_{yg}$ , ilkinji fotoakymdan hem-de emitter geçişden inžektirlenen elektronlaryň akymdan  $\alpha I_i$  durýar. Haçanda zynjyr açyk bolsa  $I_k = I_i = I$ . Şeýlelikde,

$$U_m = \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{\frac{I_f}{I_s} + 1}{1 + \beta U_m} \right) \approx U_{hh} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m)$$

(6.6)

bu ýerde  $\beta = e/kT$ ; Gykyşdaky kuwwatyň maksimal bahasy şeýle tapylýar:

$$P_m = I_m U_m \approx I_f \left[ U_{hh} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m) - \frac{1}{\beta} \right] = I_f (E_m / e),$$

(6.7)

bu ýerde 
$$E_m = e \left[ U_{hh} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m) - \frac{1}{\beta} \right].$$

$E_m$  - ululyk, haçanda biz foton ýuwdulandaky zynjyrdaky emele gelýän maksimal energiýa.

## 5.6 Fototranzistorlaryň görnüşleri

Fototranzistor bu baza bölegini ýagtylyk şöhesi bilen ýagtylandyrmaga mümkinçiligi bolan adaty tranzistordyr. Şeýle tranzistorlary, fotoakymy içki

deňeşdirilende öň bolup geçýär. Ýylylyk deşilmäniň naprýaženiýesi şeýle bir ulalýar, ýagny lawin proboý (deşilme) öň düşýär. Emma gurşap alýan sredanyň ýokary temperaturalarynda ýylylyk deşilme kremniý p - n geçişlerde hem ýüze çykarylýar. Deşilme edil lawin ýaly hem başlanyp biliner, ondan soňra ters toguň ulalmagy ýylylyga, soňra ters tok ulalanda ýylylyga geçmeklige başlanyp biliner.

## 2.6 p-n geçişiň sygymy

**Ters naprýaženiýede sygym.** Öň görkezilişi ýaly p - n geçişiň garyplaşan gatlagynda metallurgiki çägiň iki tarapyndan bahalary boýunça deň we belgileri boýunça garşylykly garyntgylaryň ionlary tarapyndan amala aşyrylýan göwrüm zarýadlary bar. Goýulan naprýaženiýa baglylykda garyplaşan gatlagyň galyňlygy üýtgeýär, diýmek, zarýadlaryň bahasy  $Q_{gow}$ . Bu ýagdaý p - n geçiş elektrik sygymyna eýe bolýandygyna ýardam berýär. Onuň elektriki shemalarda täsiri şol bir ýagdaýlarda, haçanda p-n geçişiň naprýaženiýesi wagt boýunça üýtgände ýüze çykýar. Onda statistiki WAH-dan kesgitlenilýän tokdan başga goşmaça  $C(dU/dt)$  deň

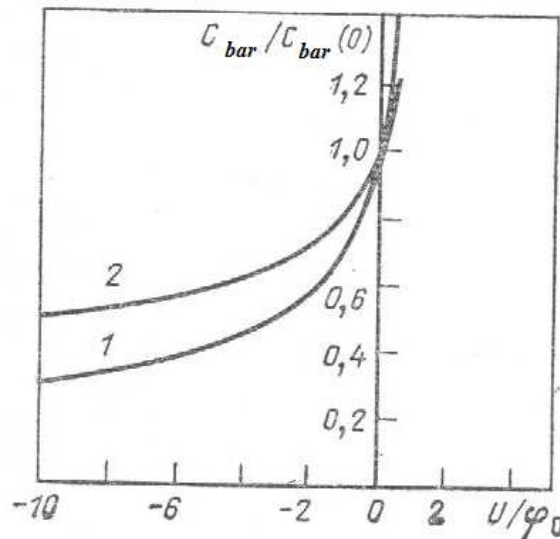
bolan sygym togy akýar. Ol wagat boýunça göwrüm zarýadlaryň üýtgemegi bilen baglydyr;

$$I(t) = dQ_{gow} / dt = \left( dQ_{gow} / dU \right) (dU / dt)$$

şonuň barýer sygymy  $C = C_{bar} = dQ_{gow} / dU$ .

Adaty kondensatordan tapawutlylykda p - n geçişde zarýadyň doly naprýaženiýesine gatnaşygy  $Q_{gow} / (\varphi_0 - U)$  onuň sygymyna deň däl, sebäbi  $\left( Q_{gow} / (\varphi_0 - U) \right) (dU / dt)$  sygym togyny bermeýär. Bu  $Q_{gow}(U)$  çyzykly däl baglanyşygy bilen düşündirilýär; şoňa görä-de barýer sygym naprýaženiýe bagly.

Simmetrik däl p-n geçişde garyntgylaryň basgançakly paýlanyşly  $Q_{gow} = qSNL_{ob}(U)$  we (2.6) göz önünde tutup:



$$C_{bar} = S \sqrt{qN_g \epsilon_0 \epsilon_n / [2(\varphi_0 - U)]} \quad (2.19)$$

(2.19)  
formulanyň  
ikinci ýazgysy  
p-n geçişin

$U_m$  - çykyşdaky maksimal kuwwata  $P_m$  degişli akym we naprýaženiýe.

6.1 - deňlikden çykyşdaky zynjyr açyk bolan ýagdaýyndaky naprýaženiýany  $U_{hh}$  tapylyş formulasyny alýarys ( $I = 0$ ).

$$U_{hh} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_f}{I_s} + 1 \right) \cong \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_f}{I_s} \right)$$

(6.3)

Bu ýerde,  $I_f$  berilen bahasynda  $U_{hh}$  logarifmiki baglylyk boýunça artýar, haçanda  $I_s$  kiçelen ýagdaýynda. Gün fotoelementiniň çykyş kuwwaty:

$$P = I \cdot U = I_s U (e^{eU/kT} - 1) - UI_f \quad (6.4)$$

Bu ýerde kuwwatyň maksimumi üçin  $dP/dU = 0$  şert boýunça alarys

$$I_m = I_s \beta U_m e^{\beta U_m} \cong I_f \left( 1 - \frac{1}{\beta U_m} \right) \quad (6.5)$$

$$I = I_s \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_f$$

(6.1)

we

$$i_s = \frac{I_s}{S} = e N_c N_v \left( \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \right)$$

(6.2)

bu ýerde  $S$  - fotoelementiň meýdany. Bu formula boýunça hasaplanylýan wolt-amper häsiýetnamasy getirilen. Hasaplamalar üçin şeýle ululyklar kabul edildi:

$$I_f = 100 \text{ mA}; \quad I_s = 1 \text{ nA}; \quad S = 4 \text{ sm}^2; \\ T = 300 \text{ K}.$$

Wolt-amper häsiýetnamanyň tok boýunça otrisatel bölege geçmegi, bu pribory energiýa çeşmesi görnüşinde ulanyp bolýandygyny görkezýär. Koplenc gün elementleriniň çykyş häsiýetnamasy çyzgy görnüşinde berilýär. Bu ýerde  $I_{kz}$  we  $U_{hh}$  - göni çatylma togy we açyk zynjyrdaky naprýaženiýe.  $I_m$  we

garyntgylaryň konsentrasiýalarynyň islendik paýlanyşyna dogrudyr. Ondan barýer sygymyň tekiz kondensatoryň sygymy bilen gabat gelýär (obkladkalaryň aralygy garyplaşan gatlagyň galyňlygyna deňdir). Tekiz kondensator bilen meñzeşlik barýer sygymyň häsiýetlerini aýdyň düşündirmäge mümkinçilik berýär. Mysal üçin ters naprýaženiýanyň modulynyň ösmegi bilen barýer sygym  $L_{ob}$  ulalmagy sebäpli azalýar, ýagny obkladkalaryň arasyndaky

**2.13-nji surat**

aralyklar.

Garyntgylaryň

konsentrasiýasynyň ýokarlanmagy sygymy köpeldýär, sebäbi obkladkalaryň aralygy azalýar.

Sygymyň naprýaženiýa baglylygyna wolt-farad häsiýetnama diýilýär. Basgançakly paýlanylýan garyntgylaryň  $p^+ - n$  geçişi üçin ölçegsiz koordinatlarda 2.13-nji suratda görkezilen (1-nji egri çyzyk); bu ýerde  $C_{bar}(0) - U = 0$  deň bolanda sygymyň bahasy. Umumy ýagdaýda wolt-farad häsiýetnamanyň görnüşi  $p-n$  geçişde garyntgylaryň konsentrasiýasynyň paýlanyşyna baglydyr we çylşyrymly funksiýalar bilen aňladýar, şonuň üçin approksimasiýa ulanýarlar.

$$C_{bar}(U) = C_{bar}(0) / (1 - U / \varphi_0)^m. \quad \text{Tipiki bahalar}$$

$m = 0,3 \div 0,5$ . Endigan p-n geçiş üçin garyntgylaryň konsentrasiýasynyň çyzykly paýlanyşy bilen  $m = 0,3$  (2-nji egri çyzyk). Ýörite paýlanylan garyntgyly geçiş üçin  $m \geq 1$  Wolt-farad häsiýetnama boýunça geçişiň tipini kesgitlemek bolar.

Napryáženiýanyň üýtgemegi sebäpli garyplaşan gatlakda zarýadlaryň üýtgemegi we esasy zarýad äkidijileriň süýşmegi dielektriki relaksasiýa wagtda bolup geçýär.

Eger p-n geçişe ýokary ýygyllykly signal berilse  $I \gg \tau_{rel}$  periodly, onda zarýad fazada napryáženiýeli üýtgeýär, emma sygym signalyň ýygyllygyna bagly däl. Mysal üçin  $\rho = 0,5 Om \cdot sm$  ( $N_g = 10^{15} sm^{-3}$  Si üçin)  $\tau_{rel} = 0,5 ps$

we barýer sygym  $10^{11} - 10^{12} Gs$  ýygyllyga çenli mydamalykdyr. Temperaturanyň ösmegi bilen barýer sygym (2.19) haýal ulalýar  $\varphi_0$  peselmegi sebäpli (2.1). ters süýşme näçe uly bolsa, şonçada sygymyň temperatura koeffisienti azdyr. Uly signallarda geçiş proseslere analiz berilende barýer sygymyň  $C_{bar}$  ortaça bahasyny ulanýarlar.

### Göni napryáženiýede sygym

Günüň şöhlesiniň elektrik akymyna öwürilmeginiň ideal effektiwligi.

Adaty gün elementleri köplenç esasy bir sany häsiýeti boýunça, olam onuň gadagan zonasynyň giňligi boýunça häsiýetlendirilýär. Haçanda fotoelement gadagan zonanyň giňliginden kiçi energiýaly foton bilen ýagtylandyrylsa ol ýuwdulmaýar we elementiň çykyş kuwwatyna goşant goşmaýar. Energiýasy  $\hbar\nu$  ýarymgeçirijiniň gadagan zonasyndan giň bolan fotonlaryň diňe  $\hbar\nu = E_g$  energiýasy, fotoelementiň çykyş kuwwatyna goşant goşýar, galan artykmaç bölegi ýylylyk energiýasyna, fonona öwürülýär. Ýagtylyk energiýasyny öwürmekligiň effektiwligini kesgitlemek üçin ýagtylandyrylan p-n-geçişiň energetiki diagrammasyna seredeliň. Goý gün fotoelementi ideal ýagdaýa ýakyn wolt-amper häsiýetnama eýe bolsun. Gün elementiniň işleýşine gabat gelýän ekwiwalent shemasy getirilen. Bu ýerde  $I_f$ , hemişelik togyň çeşnusi, ol günüň şöhlesi tarapyndan deňagramlykda däl zarýadlaryň oýandyrylyşyny görkezýär. Bu ýerde  $I_s$  - doýgun tok,  $R_\phi$  - çykyş garşylygy. Şeýle priboryň wolt-amper häsiýetnamasy şeýle kesgitlemilýär.

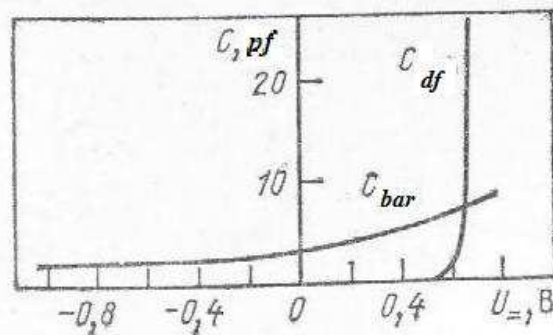


ultramelewşe şöhläniň ozon gatlagy tarapyndan ýuwdulmagy esasynda bolup geçýär. Ýere gelip düşýän gününň şöhlesiniň ýitiligine atmosfera gatlagynyň täsiri, howa massasy diýen ululyk bilen häsiýetlendirilýär (HM). Gününň şöhlesiniň ýitiliginiň tolkun uzynlygy boýunça paýlanyşynyň grafigi, atmosfera gatlagyndan ýokardaky we atmosfera gatlagynyň dürli howa massalary üçin berilen. In uly ýitilik atmosferadan ýokardaky şert üçin bolup oňa ýagny howa massasynyň (HMO) nol ýagdaýy diýilýär. Gününň şöhlesiniň HMO ýagdaýyndaky energiýa boýunça paýlanyşyny, absolýut gara jisimiň şöhlenemesiniň ýitiligi we energiýa boýunça paýlanyşy bilen deňeşdirip bolýar. Absolýut gara jisimiň temperaturasy  $T = 5800 \text{ K}$  diýip alynýar. Gününň şöhlesiniň atmosferadan ýokardaky spektr boýunça paýlanyşy kosmiki apparatlardaky we sputniklerdäki gün elementleriniň işleýşini kesgitleýär.

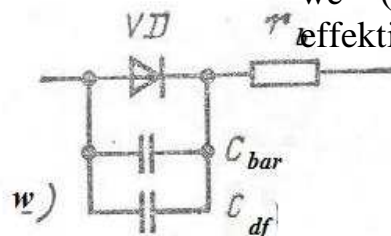
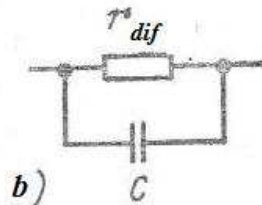
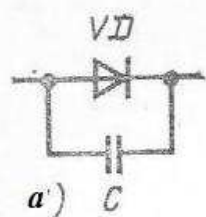
Haçanda howa massasy bire den bolsa (HM1), ol gününň şöhlesiniň ýeriň üstündäki ýitiligine, haçanda Gün zenitde bolan ýagdaýyna degişlidir. Bu ýagdaýda gününň şöhlesiniň doly kuwwaty  $P = 925 \text{ Wt/m}^2$ .

Haçanda HM2 bolan ýagdaýynda gününň şöhlesiniň umumy kuwwaty  $P = 691 \text{ Wt/m}^2$  diýilip alynýar. Ýeriň üstüne gelip düşýän gününň şöhlesiniň ortaça kuwwaty HM1,5 deňdir, ýa-da Günün gorizonta  $45^\circ$  burç boýnça ýerleşmesine gabat gelýär.

Bu ýagdaýda p-n geçişniň sygymyny amala aşyrýan iki fiziki sebäpler bar. Olardan biri – ters naprýaženiýe üçin, bu garyplaşan oblastda zaryadlaryň üýtgemesi. Ikinjisi p-n geçişe goýulan naprýaženiýa baglylykda neýtral oblastda geçiş çägiň golaýynda inžektirlenen zaryad äkidijileriň , konsentrasýalarynyň üýtgeýänliginden we zaryad äkidijiler tarapyndan toplanan zaryadlaryň bahasyndan ybaratdyr. Doly sygym jem görnüşde ýazylýar;  $C = C_{bar} + C_{df}$ , nirede  $C_{df}$  – diffuzion sygym. Beýle atlandyrmak esasy däl zaryad äkidijileriň, zaryadlaryň üýtgemegi diffuziýa netijesinde bolup geçýär. Mysal üçin geçişniň çäginde zaryad äkidijileriň diffuziýasy deşikleriň doly zaryadyny  $Q_p$  n – oblastda we elektronlaryň p – oblastda ulalýar. Simmetrikde  $p^+ - n$  geçiş üçin  $Q_p \gg Q_n$  (2.7) surada seret egriçyzyklaryň aşagyndaky meýdanlar inžektirlenen zaryadlara proporsionaldyr. Bu halatda diffuzion sygym barada toplanan esasy däl zaryad äkidijileriň zaryadlary  $Q_p$  bilen kesgitlenilýär. “Galyň” bazaly p-n geçiş



2.14-nji surat



2.15-nji surat

üçin  $W_b \gg L_p$  (2.7) göz önünde tutup  $\Delta p_n(x)$  (2.10)

paylanyşygy integrirläp, alarys:

$$Q_p(U) = I_0 \tau_p [\exp(U / \phi_t) - 1]$$

Ýuka bazaly p-n geçişler üçin  $(W_b \ll L_p) \tau_p$  ýerine bu formulada bazada esasy däl zaryad äkidijileriň effektiv ýaşayyş wagtyny goýmaly  $\tau_{ef}$ , ýagny bazanyň çäginde geçişe garşylykly tarapda

$$\eta = \frac{I_f / e}{P_{opt} / \hbar \nu},$$

(5.17)

bu ýerde  $I_f$  - gelip düşýän kuwwaty  $P_{opt}$  bolan optiki şöhläniň dereden fotoakymy (haçanda ýagtylyk kwantynyň energiýasy  $\hbar \nu$  bolanda). Getirilen (5.16) we (5.17) deňlikler esasynda p-i-n fotodiodyň effektivligini tapyp bolýar.

$$\eta = \frac{I_{umumy} / e}{P_{opt} / S \cdot \hbar \nu},$$

(5.18)

bu ýerde  $S$  - fotodiodyň ýagtylandyrylýan meýdany.

## 5.5 Fotoelementler

Ýeriň atmosfera gatlagyndan ýokarda günün şöhlesiniň ýitiligi, gün şöhlesiniň hemişeligi hökmünde kabul edilýär. Gün şöhlesiniň ýitiliginiň hemişeligi  $P=1350 \text{ Wt/m}^2$ . Emma günün şöhlesi ýeriň atmocfera gatlagyndan geçende onuň ýitligi peselýär. Bu hadysa esasan hem infrogyzyl şöhläniň, suwuň buglary tarapyndan ýuwdulmagy hem-de

$$I_{\text{diff}} = e\Phi_0 \cdot \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha w} + eP_n \frac{D_p}{L_p}, \quad (5.15)$$

Bu ýerde  $L_p$  -deşiň diffuziýa aralygynyň uzynlygy,  $D_p$  - deşiň diffuziýa koeffisiýenti.

Onda, (5.14) we (5.15) deňlikleriň esasynda umumy akymyň dyklyzlygy şeýle aňlatmanyň üsti bilen hasaplanylýar:

$$I_{\text{umumy}} = e\Phi_0 \left( 1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} \right) + eP_n \cdot \frac{D_p}{L_p}. \quad (5.16)$$

Fotodiodyň adaty işleýiş şertinde, (5.16) deňligiň ikinji bölegi birinjiden gaty kiçidir.

Islendik fotoelementiň kwant effektiwligi, gelip düşýän fotonyň sanynyň (optiki kuwwatynyň) emele gelen fototoga gatnaşygy hökmünde kesgitlenilýär.

rekombinasiýanyň tizligine bagly. Rekombinasiýanyň tizligi pes bolanda  $\tau_{ef} = \tau_p$ , emma ýokary tizlikde

$\tau_{ef} = W_b^2 / (2D_p)$  [1.32seret], ýagny soňky ýagdaýda  $\tau_{ef}$  diffuziýanyň ortaça wagty bilen kesgitlenilýär we ýeterlik derejede azdyr  $\tau_0$ .

Şeýlelikde, zarýad naprýaženiýa çyzykly bagly däl, onda diffuzion sygym naprýaženiýanyň funksiýasy bolýar. Haçanda naprýaženiýe az predellerde üýtgeşe ( $\varphi_q$  az) ol mydamalykdyr. Kiçi **sinusoidal** signal üçin

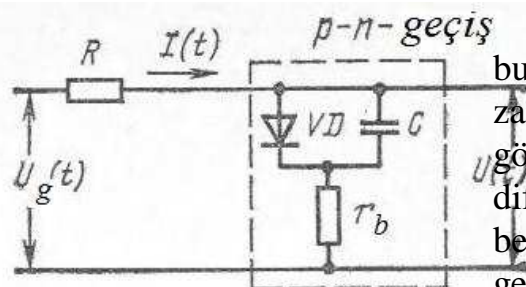
pes ýyglyklarda  $\left[ f \ll 2 / (\pi \tau_{ef}) \right]$  diffuzion sygym

$$C_{dif} = \left( kdQ_p / dU \right) = kI_0 \tau_{ef} \exp(U = (\varphi_\tau) / \varphi_\tau) \quad (2.20)$$

nirede  $k = 0.5 \div 1$  bazanyň galyňlyga bagly koeffisient  $k = 0.5W_b \gg L_p$  üçin :  $k = 1$

$W \ll (L_p)$ ;  $U$  – naprýaženiýanyň mydamalyk düzümi.

2.16-njy surat



bu ýerde  $I_d$  - göwrüm zarýadlarynda generirlenen zarýadlaryň diffuzion togunyň dykzlygy;  $I_{dif}$  - göwrüm zarýadyndan daşda gnerirlenýän zarýadlaryň diffuzion togunyň dykzlygy. Ters ugra naprýaženiýe berilen p-n-fotodiod üçin, haçanda ýylylyk generassiýasy esasyndaky akymy hasaba alypmadyk ýagdaýynda, umumy toguň deňlemesini çykaralyň. Goý üstki p-gatlak gaty ýuka bolup ondan, gelip düşýän fotonlaryň aglabasy ýuwdulman geçýär  $d_p < 1/\alpha$ , bu ýerde  $d_p$  - üstki p-tipli gatlagyň galyňlygy,  $\alpha$  - ýagtylyk şöhlesiniň ýuwdulma koeffisiýenti. Onda elektron - deşik jübütleriniň generirlenmesiniň tizligi:

$$G(x) = \Phi_0 \alpha \cdot e^{-\alpha x},$$

(5.13)

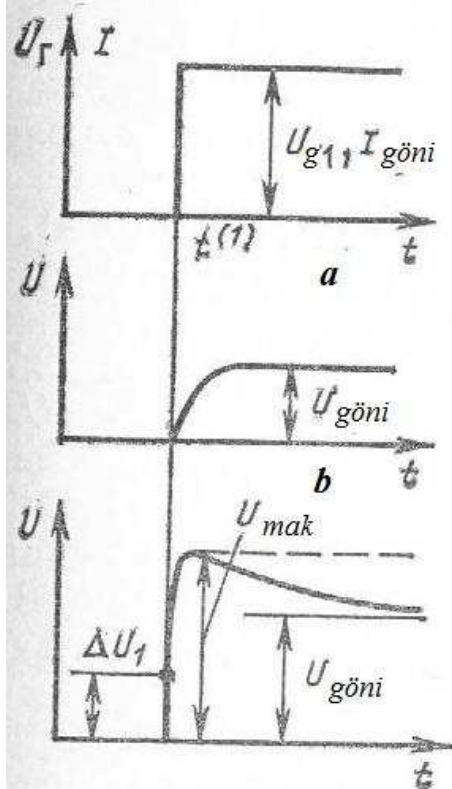
bu erde  $\Phi_0$  - gelip düşýän fotonlaryň akymy, meýdan birliginde. Onda dreýf togunyň dykzlygy:

$$I_{dr} = -e \int_0^w G(x) dx = e \Phi_0 (1 - e^{-\alpha w}),$$

(5.14)

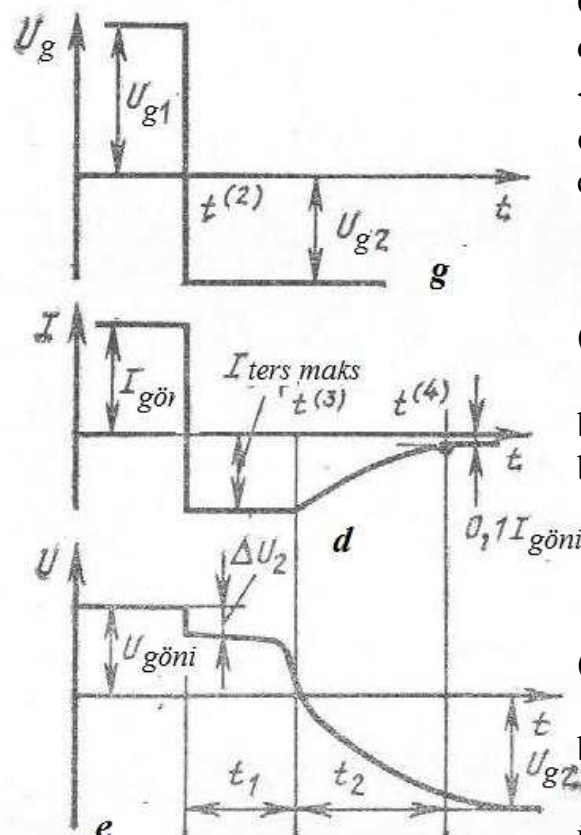
bu erde  $w$  - gowrüm zarýadynyň giňligi.

Diffuzion toguň dykzlygy, seredilýän ýagdaý üçin şeýle tapylýar:



w

2.17-nji surat



hili meýdan täsir etmän, çykyş garşylyga birikdirilýär. Emma içki konstruksiýasy boýunça fotodiodlar gün elementlerinden tapawutlanýarlar. Meselem, fotodiod ýagtylyk şöhlesiniň belli bir diapazonyny duýýan bolsa, gün elementi ýagtylyk şöhlesiniň gaty giň aralygyny duýup elektrik toguna öwürmeli; adaty fotodiodlar, geçiş sygymyny kiçeltmek üçin, gaty kiçi ölçegli bolsalar, gün elementleriniň ýagtylyk duýujy meýdany gaty ulydyr.

Umuman alanda fotodiodlar köpdürli bolup, olaryň sanyna p-n-diodlardan başgada p-i-n diodlar we metal - ýarymgeçiriji diodlar hem girýär.

p-i-n fotodiodlar giňden ýaýran fotodetektorlar bolup, olaryň göwrüm zaryadynyň giňligi gaty kiçi bolup, kwant effektiwligi we utgaşma çaltlygy gaty ýokarydyr. p-i-n fotodiodlar işleýşine seredip geçeliň. Bu analiz adaty fotodiodlarda degişlidir. Belli boluşy ýaly ýarymgeçirijide ýagtylygyň ýuwdulmagy elektron-deşik jübütleriniň generirlenmegine getirýär. P-n-geçişiň göwrüm zaryadynyň içinde we ondan diffuziýa aralygynda generirlenen zaryadlar, p-n-geçiň göwrüm zaryady tarapyndan bölünýär we çykyşda tok emele gelýär. Deňagramlyk ýagdaýda ters tarapa elektrik meýdany berlende, göwrüm zaryadynyň üstünden geçýän akymyň ululygy.

$$I_u = I_d + I_{dif} \quad , \quad (5.12)$$

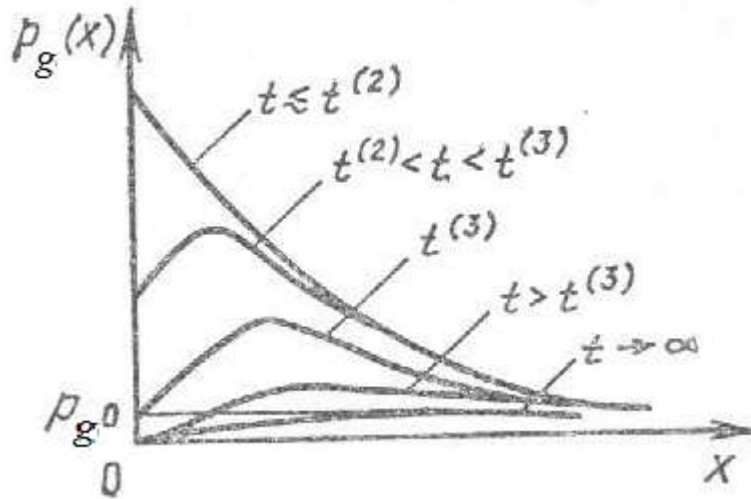
Ýokary ýyglyklarda  $f \ll 2/(\pi\tau_{ef})$  ýyglygyň ösmegi bilen diffuzion sygym nola çenli azalýar, ýagny baza arkaly esasy däl zaryad äkidijiler üçin  $\tau_{ef}$  wagt zerurdyr, emma az period wagtda  $\tau \ll \tau_{ef}$  zaryad üýtgemäge ýetişmeýär. (2.20) aňlatma sinusoidal amplitudaly signallar üçin hem peýdalydyr, naprýaženiýe wagt boýunça haýal üýtgeýär. Köpelmegi ýa-da peselmegi  $\tau_{ef}/4$  köp ulydyr. Onda U ýerine U(t) goýmaly, emma sygym wagt boýunça üýtgeýär. Çalt üýtgeýän impuls signallar üçin (2.20) peýdaly dälidir.

$U \Rightarrow \varphi_t$  (2.20) formuladan

$$C_{dif} = kI_{inz}\tau_{of}(\varphi_t \approx k)\tau_{ef}/\varphi\tau \quad (2.20)$$

nirede  $I_{inz}$  - inžeksiýa togy. Ýeterlik derejede ýokary göni naprýaženiýede takmynan ýazgy  $I \approx I_{inz}$  laýyk gelýär we dogrudyr, haçanda tok rekombinasiýasy göz önünde tutulmasa. Bu halatda diffuzion sygym eksponensial ulalýan naprýaženiýanyň ulalmagy bilen, adaty barýerden has ýokarydyr. Haçanda rekombinasion tokda az göni naprýaženiýalarda  $C_{dif}$  hasaplamak üçin (2.20) formulany ulanmak hökmanydyr. Bu halatda diffuzion

sygym barýerden azdyr we ony göz önünde tutulmaýar.



2.18-nji surat

2.18a suratda ideallaşdyrylan  $p=n$  geçişini uly siganllary üçin ( $U_m \gg \varphi_t$ ) kondensatorly  $C = C_{bar} + C_{dif}$  we inersionsyz diodlar, ýagny WAH (2.12) laýyk gelyän ekwiwolent shemesy (mode) görkezilen. Kiçi signallar üçin (surat 2.18b) ekwiwolent shema kondensatordan rezistordan ybaratdyr, olaryň garşylyklary (2.15) formuladan kesgitlenilýär.

$$I_p = I_f - I_s \left[ \exp\left(\frac{eU_p}{kT}\right) - 1 \right]$$

(5.9)

Diodlarda oýandyrmanyň bolup geçişi üçin Şokliniň modeline laýyklykda, ýazyp bolýar:

$$I_s = e \left( \frac{D_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{n_i^2}{N_A} \right) + e \left( \frac{D_p}{\tau_p} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{n_i^2}{N_D} \right)$$

(5.10)

bu ýerde

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right)$$

(5.11)

bu ýerde  $I_f$  berilen bahasynda  $I_p$  we  $U_p$  doýgun toguň dykyrlygyna  $I_s$  baglydyr.  $I_s$  öz gezeginde gadagan zonanyň giňligi bilen kesgitlenýär.

Öňki mowzuklarda bellenenip geçilişi ýaly, fotodiodlar fotowoltaik režimde işläp bilýär. Şeýle iş režimi gün elementleri üçin adaty bolup, daşdan hiç

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{y}{b} = \eta_1 Z \quad (5.6)$$

Bu ýerde  $Z$  – meýdanyň güýjenmesine bagly bolan güýçlendiriji koeffisiýenti. Bu ýagdaýda  $Z$  görkezýär, näçe gezek ýaşaýyş wagtyň  $\tau$  dowamynda  $b$  uzynlykly nusganyň içindeň elektron geçip biler.

Fotoelementiň çykyş kuwwaty şu aşakdaky formula bilen tapylýar.

$$P = I \cdot U = \left[ I_f - I_s \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \right] \cdot U$$

(5.7)

$$\frac{dP}{dU} = 0 \quad \text{bolýan ýerinde, fotodiod düşýän}$$

ýagtylyk üçin özüniň maksimal bahasyna ýetýär.

$$\left( \frac{eU_p}{kT} + 1 \right) \exp\left(\frac{eU_p}{kT}\right) = \frac{I_f}{I_s} + 1$$

(5.8)

we

Real p-n geçişniň ekwiwolent shemasyna bazanyň garşylygyny göz önünde tutulýar, 2.18 W görkezilişi ýaly (uly signallar üçin).

## 2.7. p-n geçişde geçiriş prosesler.

Elektron – deşik geçişde naprýaženiýanyň (ýa-da toguň) emele gelmek proseslerine impuls toguň täsiri astynda (ýa-da naprýaženiýanyň) geçiriş prosesleri diýip atlandyrylýar. Ekwiwolent shema görnüşde görkezilen p-n geçişe seredeliň, daşky rezistor impulslaryň generatorynda wagt boýunça üýtgeýär  $U_t$  naprýaženiýe berilýär.

## Göni naprýaženiýanyň kadalaşmagy.

Goý,  $t^{(1)}$  wagt pursatynda generatoryň naprýaženiýesi noldan tä  $U_u$  (surat 2.200) birden ýokary galmagy ýa-da peselmegi bilen üýtgeýär. Elektron – deşik geçişde göni naprýaženiýe ýüze çykýar we ýuwaş-ýuwaşdan kadalaşan baha  $U_g$  ymtylýar. Wolt-amper häsiýetnama laýyklykda geçiş arkaly akýan tok

$$I = (U_r - U(t)) / R.$$

Goý,  $U_u \gg U_g > U(t)$ , onda p-n geçiş tok güýjüne täsir etmeýär we tok hem birden ýokary galmak we peselmek bilen üýtgeýär.

Noldan tä  $I_g = U_{ri} / R$  (2.20a surat).

$U(t)$  baglanyşygyň görnüşi göni tok  $I_g$ , inžeksiýa derejesi, geçiş sygymy we bazanyň garşylygy bilen kesgitlenilýär. Bazanyň garşylygyna az göni tokda naprýaženiýanyň peselmegini göz önünde tutmasak hem bolar. Mysal üçin, kremniý geçiş  $r_b = 50 \text{ Om}, I_g = 0.1 \text{ mA}$  bahada alarys

$$I_g r_b = 5 \text{ mW} \ll U_g = 0.6 \div 0.7 \text{ W}$$

Naprýaženiýe  $U$  ýuwaş-ýuwaşdan we monotok ulalýar, barýer sygymyň zarýady boýunça  $U_g$  – tarapa ymtylýar (2.20, b-surat).

Diffuzion sygym azdyr, sebäbi praktiki taýdan hemme wagt geçiş prosesiň häzirlikçe  $U \leq 0.9 U_g < 0.6 \text{ W}$ , ol ýeterlik derejede barýer sygymdan azdyr.

Uly göni tokda we inžeksiýanyň ýokary derejesinde bazanyň garşylygyna naprýaženiýanyň peselmegini we bu garşylygyň modulýasiýasyny hasaba almalydyr. Pursat  $t^{(1)}$ -da naprýaženiýanyň birden ýokarlanmagy we peselmegi  $\Delta U_1 = I_g r_b$  (surat 2.20w) bolup

$$n_f = G\tau \quad (5.2)$$

Ýagtylanýan üstüň golaýynda generirleme tizligi

$$G(0) = \eta_1 \frac{\alpha \Phi_1(0)}{h\nu}, \quad (5.3)$$

bu ýerde  $\Phi_1(0)$  – düşýan ýagtyltk akymyň dykzlygy. Goý, ýönekeýleşdirmek üçin, ýarymgeçirijiň  $x^*$  ýoginlikly gatlagynda generasiýa birmeňzeş gidýän bolsun. Onda,

$$I_f = \eta_1 \alpha \frac{\Phi_1(0)}{h\nu} \tau v_d \alpha x^* \quad (5.4)$$

$\alpha = 1/x^*$  bolany üçin umumy ýagtylyk akym  $\Phi = \Phi_1 ab$ ,  $\tau v_d$  köpeltme hasyly bolsa  $y$  aralygy aňladýar. Bu aralygy elektron  $\tau$  wagtyň dowamynda geçýar. Onda,

$$I_\phi = q \eta_1 \frac{\Phi}{h\nu} \frac{y}{b}, \quad (5.5)$$

bu ýerde  $y = \tau v_d = \tau \mu E$ . Fotoakym  $\Phi$ -nyň we meýdanyň güýjenmesiniň  $E$  köpelmegi bilen ösýär.

Fotogarşylygyň *kwant* çykyşy  $\eta_2$  nusganyň üstüne düşýan her fotona hasaplaňda nusgadan 1 s geçýan elektronlaryň sanyna deň.



tarapdan hem zonalaryň gönülenmegi netijesinde Ferminiň derejeleri bir-birinden maksimal uzaklaşmaly.

#### 5.4 Fotogarşylyklar we fotodiodlar

Birmeňzeş ýarymgeçiriji ýagtylandyrylanda onuň elektrik geçirijiligi ulolýar. Bu hadysa fotogeçirijilik diýilýar, degişli enjama bolsa fotogarşylyk diýilýar. Egerde ýagtylygyň täsiriniň astynda geçirijilik zolakda diňe elektronlar peýda bolýan bolsa, onda goşmaça akym (fotoakym)

$$I_f = qn_f v_d s, \quad (5.1)$$

Bu ýerde  $q$  – elektronyň zaryady;  $n_f$  – deňagramsyz (artykmaç) elektronlaryň konsentrasiýasy;  $v_d = \mu E$  – dreýf tizligi;  $\mu$  – elektronlaryň hereketlilik;  $E$  – meýdanyň güýjenmesi;  $s$  – nusganyň kesimi. Egerde elektron-deşik jüwütler peýda bolýan bolsalar, onda fotoakymyň deşik düzüjisi hem ýüze çykýar. Emma köplenç deşikleriň (ýada elektronlaryň) goşmaça konsentrasiýasy olaryň garaňkylyk konsentrasiýasyna görä kiçi bolýar.

Fotoelektronlaryň konsentrasiýasy olaryň generirleme tizligi we olaryň geçirijilik zolakdaky  $\tau$  ýaşayyş wagty bilen kesgitlenýär:

geçýär. Mysal üçin  $I_g = 10 \text{ mA}$ ,  $r_b = 50 \text{ Ohm}$ ,  $\Delta U_1 = 0.5 \text{ W}$ . Soňra barýer sygymyň zaryady boýunça geçişniň garyplaşan gatlagynda naprýaženiýe ulalýar (tä  $U_g = 0.6 \div 0.7 \text{ W}$ ) we umumy naprýaženiýe  $U_{\max} = U_g + I_g r_b$  baha ýetýär. Toguň uly bolmagy sebäpli  $I_g$  bu proses örän az wagtyň içinde bolup geçýär.  $C_{bar} = 5 \text{ pF}$  üçin we  $I_g = 10 \text{ mA}$   $C_{bar} U_g / I_g = 0.3 \text{ ns}$  zaryadyň wagtyny alarys. Naprýaženiýe noldan tä  $U_{\max}$  çenli birden ýokarlanýar we peselýär. Naprýaženiýanyň we toguň çalt üýtgemeginde diffuzion sygymy hasaba almasak hem bolar.

Eger-de bazanyň garşylygynyň modulýasiýasyny hasaba almasak (2.5), onda  $U(t)$  baglanyşyk ştrihlenen çyzyk bilen görkezilen bolýar. Geçiş proseslere dogry beýan etmek üçin bazanyň garşylygynyň ýuwaş-ýuwaşdan azalmagyny göz önünde tutmaly, netijede naprýaženiýe maksimuma ýetip,  $U_{\max} \leq U_g + I_g r_b$ , mundan beýläk azalýar. Tä 333 kadalaşan bahasyna çenli, bazanyň az garşylygyna 333 gabat gelýänçä:  $U_g$  kadalaşan bahasyna çenli, bazanyň az garşylygyna  $r_b$  gabat gelýänçä:

$U_g = U_{gec} + I_g r_b$ . Bazanyň garşylygynyň modulýasiýa prosesleri, şonuň bilen birlikde, göni narýaženiýanyň kadalaşmagy bazadaky esasy däl zarýad äkidijileriň effektiw ýaşayş wagtyna deň bolan wagtda amala aşyrylýarlar.

### Ters garşylygyň dikeldilmegi.

Goý,  $t^{(2)}$  wagt pursatda (2.20g) generatoryň naprýaženiýasy göniden terse üýtgeýär, toguň birden ýokarlanmagy we peselmegi  $\Delta I = \left( U_{r_1} + U_{r_2} \right) R$  ýüze çykýar, nireden  $U_{r_2}$  ters naprýaženiýanyň moduly. Indi p-n geçiş arkaly ters tok akýar  $I_{ters \max} = U_{r_2} / R$  (2.20d surat) ýagny ýylylyk tokdan birnäçe esse ýokarydyr (2.13). Ters tok  $I_{ters}$  artykmaç esasy däl zarýad äkidijileriň hereketi bilen baglydyr. Bu tok göni tok akanda bazada toplanýar.  $t \geq t^{(2)}$  halatda ön inžektirlenen zarýad äkidijiler tersine emmitere äkidijiler bazany taşlamankalar geçýärler. Olar tarapdan döredilen tok uly bolýar. Toguň peselmesine we ýokarlanmasyna  $\Delta I$  bazanyň garşylygynda naprýaženiýanyň ýokarlanmasyna we peselmesine degişlidir:  $\Delta U_2 = \Delta I r_b$  ;

$$I = I_f - I_s \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

(4.12)

bu ýerde  $I_s$  - dioda ýagtylyk düşmeýän ýagdaýyndaky doýgun tok;  $I_f$  - ýagtylygyň täsiri esasynda ýüze çykyýan maksimal tok. Ýagtylygyň täsiri esasynda dörän (oýandyrylan) elektron p-tipli ýarymgeçirijiden n-tipli garşy geçer, şol bir wagtyň özünde oýandyrylan deşik tersine p-tarapa geçer.

Diodyň esasy häsiýetnamasy wolt-amper häsiýetnama bolyp, ol häsiýetnama diod ýagtylandyrylmadyk we ýagtylandyrylan ýagdaýynda bir-birinden uly tapawutlanýar. Ýagtylandyrylan ýagdaýyndaky diodyň elektrodларыndaky naprýaženiýany (naprýaženiýe holostogo hoda) deňlikden tapalyň.

$$U_{h.h} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_f}{I_s} + 1 \right)$$

(4.13)

Bu ýönekeý modele laýyklykda, üzük zynjyrdaky naprýaženiýanyň maksimal bahasyna diňe gaty uly ýagtylyk konsentrasiýasynda ýetmek mümkin. Sebäbi ýagtylygyň täsiri bilen, p- we n-

$$(4.9) \quad I_f - I = I_s (e^{U/kT} - 1).$$

Bu ýerden gelip çykýar:

$$(4.10) \quad U = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_f - I}{I_s}\right)$$

Alynan (4.10) deňlemä islendik režim üçin fotodiodyň deňlemesi dilýilýär. Bu eňlemeden diodyň wentel foto e.h.g. ýagny  $U_{\text{wen}}$ , tapmak üçin fotodiodyň çykyşyny üzük diýip seredeliň,. Bu ýagdaýda  $I=0$  bolýar. Onda

$$(4.11) \quad U_{\text{wen}} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_s}\right).$$

Öňki temalardan belli boluşy ýaly birmeňzeş ýarymgeçiriji materialyndan taýýarlan p-n-geçişli fotoelementlerde ýagtylyk şöhlesiniň täsiri esasynda ýüze çykýan togyň dykzlygy şeýle formula bilen kesgitlenilýär:

Mundan beýläk geçiş prosese ýokary ters geçirijilikli stadiýa (interwal  $t^{(2)} < t < t^{(3)}$  dowamlylygy  $t_1$ ) we ters garşylygy dikeltmek (interwal  $t^{(3)} < t < t^{(4)}$  dowamlylygy  $t_2$ ) stadiýalara bölünýärler.

Birinji stadiýada naprýaženiýe göni bolup galýar, sebäbi geçişiň çäginde bazada esasy däl zarýad äkidijileriň artykmaç konsentrasiýasy emele gelýär, (2.7, 2.8 seret), eger bu formulalar naprýaženiýa otnositellikde çözülenide.

$U_{r_2} \gg U_g$  halatda ters tok mydamalyk we  $I_{\text{ters max}} = U_{r_2} / R$  uly baha eýe bolýar, degişlilikde ters geçirijilik hem uludyr. Bazada toplanan esasy däl zarýad äkidijileriň olaryň emmitere geçmegi we rekombinasiýa sebäpli aýrylmagy (sorulmagy) bolup geçýär.

2.21-nji suratda bazada ( $W_b \gg L_p$ ) dürli wagt pursatlarda (göni tokdan tä ters toga ugurlaryny üýtgedýänçä) deşikleriň konsentrasiýasynyň paýlanyşy görkezilen.

Başlangyç paýlanyş ( $t \text{ moment } \leq t^{(2)}$ ) mydamalyk tok akanda (2.7b seret) statistiki režime degişlidir. Indiki wagt pursatlarda toguň ugrunyň üýtgemegi netijesinde (2.20 surat, d)  $\left(dp_n / dx\right)_{x=0} < 0$ . Wag

pursatda  $t^{(3)}$ , bazanyň çäginde  $p_n(0) = p_{m0}$  (2.21 surat) we  $U = 0$  (2.20 surat w) birinji stadiýa gutarýar. Birinji stadiýa wagtda bazadan esasy däl zarýad äkidijileriň artykmaç zarýadlaryň uly bölegi aýrylýar. Bu proses zarýadyň deňlemesi bilen beýän edilýär. (1.20) nirede çep tarapyna  $Q_b$  zarýad we effektiv ýaşayyş wagty  $(\tau_b)$  bazadaky esasy däl zarýad äkidijileriň (elektronlaryň ýa-da deşileriň deňşililikde p ýa-da n tip baza üçin) goýmaly, emma sag tarapa – otrisetel tok -  $I_{tersmax} \cdot t^{(2)}$  wagta çenli toplanan zarýad (1.31) laýyklykda hasaba alyp  $I_g r_b$  deňdir we  $Q_b(t^{(3)}) \approx 0$  deň diýip hasap edip zarýadyň deňlemesiniň çözülişinden (§ 1.7 seret) birinji stadiýanyň takmynan dowamlylygyny alarys (sorulma wagty)  $t_1 = t_{sor} = \tau_b \ln\left(1 + I_g / I_{tersmax}\right)$ . Toguň ulalmagy bilen  $I_{tersmax}$  we bazada esasy däl zarýad äkidijileriň effektiv ýaşayyş wagtyňyň azalmagy dowamlylygyň peselmegine getirýär. Bir tarapdan  $I_g / I_{tersmax} = 1.7$  üçin  $t_1 = \tau_b$  alarys.

Birinji stadiýanyň dowamynda naprýaženiýanyň haýal peselmegi uly ululykly diffuzion sygymyň zarýadsyzlanmagy ýaly proses hökmünde traktowka

$$I = I_f - I_n^{(n)} + I_n^{(p)} - I_p^{(p)} + I_p^{(n)} \quad (4.4).$$

Bu deňlikde esasy däl zarýatlaryň toklarynyň ululygy ýagtylygyň täsiri bilen üýtgemän galýar

$$I_n^{(p)} = I_{sn}; I_p^{(n)} = I_{sp} \quad (4.5).$$

Esasy zarýatlaryň togy potensial barýeriň peselmegi bilen, ýagny ýarymgeçiriniň ýagtylandyrylmagy bilen artýar we şeýle kesgitlenilýär:

$$I_n^{(n)} = I_{sn} e^{eU/kT}; \quad (4.6)$$

$$I_p^{(p)} = I_{sp} e^{eU/kT}. \quad (4.7)$$

Bu deňlikleri jemläp alarys.

$$I_f - I_{sn}(e^{eU/kT} - 1) - I_{sp}(e^{eU/kT} - 1) = I \quad (4.8)$$

ýa-da

akymy wolt-amper häsiýetnamanyň doýgun tokuny düzýär. Onda p-n-geçişden umumy doýgun tok:

$$I_s = I_{ns} + I_{ps} = \frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \quad (4.3)$$

Indi p-n-geçişe, gadagan zonanyň giňliginden uly energiýaly fotonuň düşen ýagdaýyna seredeliň.

Fotonyň ýuwdulmagy esasynda erkin elektron - deşik jübüdi emele gelýär. P-n geçişiň göwrüm zaryadynyň elektrik meýdanynyň täsiri esasynda elektronlar n-tarapa, deşikler p-tarapa hereket edýärler. Bu zaryatlar p-n-geçişden geçip artykmaç togy emele getirýär  $I_f$ .

Şeýlelikde emele gelen artykmaç zaryatlar potensial päsgelçiligiň peselmegine getirýär. Öz gezeginde elektronlar (n) we deşikler (p) peselen potensial päsgelçilikden  $e(U_k - U)$ , degişlilikde p we n-tarapa geçýärler. P-n-geçişde emele gelen fotoelektrigi hereketlendiriji güýje (foto e.h.g.) «wentel» elektrigi hereklendiriji güýç diýilýär. Şeýlelikde ýagtylandyrylan p-n-geçiş fotoelement häsiýetine eýe bolýar.

Onda p-n-geçişden akýan umumy toguň ululygy şeýle tapylýar

(düşündirmek) edip bolar. Göni naprýaženiýe birnäçe  $\varphi_t$  peselenden soň diffuzion sygym birden azalýar we naprýaženiýe bu stadiýanyň soňunda nula çenli çalt peselýär.

Ters garşylygyň dikeldilmek stadiýasynda ters tok azalýar, p-n geçişiň garşylygy ulalýar, emma naprýaženiýa otrisatel bolýar we  $U_{r2}$  ymtylýar. Şol

wagtyň özünde tok diňe artykmaç esasy däl zaryad äkidijileriň bazadan emmitere geçişi bilen amala aşyrylmak, eýsem barýer sygymyň täzedan zaryadlanmagy hem bolýar. Uly ters tokda (R kiçi) sygym çalt täzedan zaryadlanýar, az ters tokda (uly R) geçiş prosesi uzaga çekilýär, soňky ýagdaýda onuň dowamlylygy  $RC_{bar}$  proporsionaldyr. Ters garşylygyň dikeldilmeginiň stadiýasy, haçanda tok  $0.1I_g$  çenli azalanda (moment  $t^{(4)}$ ) gutarýar diýip kabul edilýär.

Geçiş prosesleriň dowamlylygy azaltmak üçin barýer we diffuzion sygymlyry azaltmak zerurdyr (bazada esasy däl zaryad äkidijileriň ýaşaýyş wagty).

## 2.8 Kontakt metal ýarymgeçiriji

Metal we ýarymgeçiriji kontaktlar daşky birikdiriji simler abzalyň ýarymgeçiriji oblastlaryndan

emele getirmek üçin we çalt işleýän diodlary döretmeklik üçin giňden ulanylýar.

Metal- ýarymgeçiriji kontaktyň tipini metalda we ýarymgeçirijiden elektronlaryň çykyş işi, bölüniş çäkde üst zaryadyň dykzlygy, mundan başgada ýarymgeçirijiniň tip geçirijiligi we onda garyntgylaryň konsentrasiýasy bilen kesgitlenilýär.

### Deňagramlyk ýagdaýda göneldiji kontakt.

Göneldiji kontakt diýip aýdylýar, ýagny kontakt WAH göni çyzykly däl tipinde (2.12), göni garşylyk tersden azdyr. Metal we n-tipli ýarymgeçirijiniň arasynda göneldiji kontakt almak üçin ýarymgeçirijiniň elektronlarynyň çykyş işi hökman az bolmalydyr. Metallaryňky bilen deňeşdirilende ýa-da üst otrisatel zaryadlaryň dykzlygy örän uly bolmalydyr. Eger ýarymgeçirijiden elektronlaryň çykyş işi metalyňkydan az bolsa, onda kontakt emele gelende elektronlaryň bir bölegi ýarymgeçirijiden metala geçýär, ýarymgeçirijide garyplaşan gatlak emele gelýär, bu gatlak donorlaryň položitel zaryadly ionlaryndan ybaratdyr.

### 5.3 Geçişdäki fotoelektrik hadysalary.

Bir tipli kristallardan tapawutlylykda diodlarda p-n-geçişiň ýerleşen tekizliginde potensial päsgelçilik ýüze çykýar. Bu päsgelçilik, esasy zaryatlaryň p-n-geçişden diffuziýasy esasynda emele gelýän elektrik meýdany tarapyndan ýüze çykarylýar. Haçanda termodinamiki deňagramlyk bolanda p-n-geçişiň iki tarapynda Fermiň derejesiniň ýerleşşi birmeňzeş derejede bolup bir-birine gabat gelýär. Bu termodinamiki deňagramlyk ýagdaýynda toklaryň jemi nola deňdir.

$$-I_n^{(n)} + I_n^{(p)} - I_p^{(p)} + I_p^{(n)} = 0 \quad (4.1)$$

Öz gezeginde bu deňlikde elektronlaryň we deşikleriň toklarynyň aýratynlykdaky jemleri hem nola deňdir.

$$-I_n^{(n)} + I_n^{(p)} = 0; \quad -I_p^{(p)} + I_p^{(n)} = 0 \quad (4.2)$$

sebäbli termodinamiki deňagramlykda göni ugra we ters ugra geçän zaryatlaryň sany deňdir. Emma esasy däl zaryatlaryň n-tarapdan p-ýarymgeçirijä we tersine

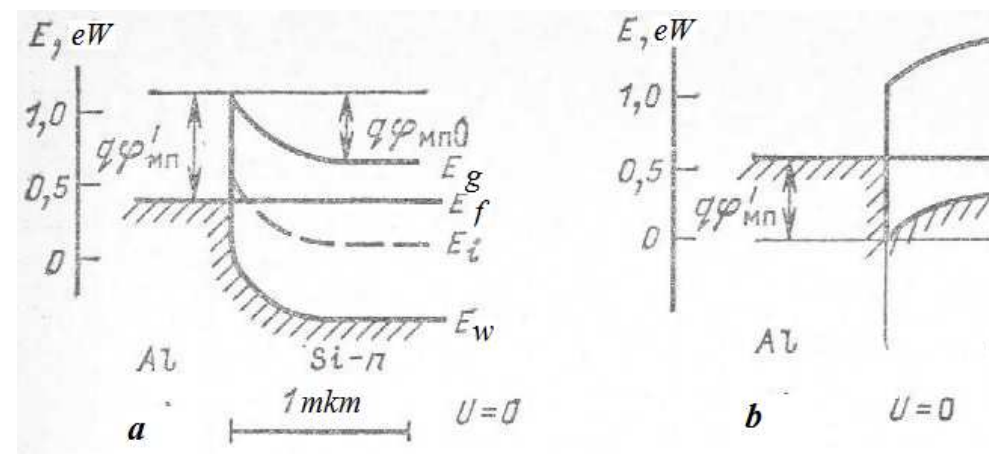
Çyz. 3.1. Fotogarşylygy ölçemek üçin tejribäniň çyzgysy.

Iki gapdalyna omiki kontaktlar goýlan a uzynlykly, b giňlikli we d ýoginlikly tekizparallel nusga U elektrik naprýäženiýanyň çeşmesine çatylan. Nusganyň üsti gowy ýagtylandyrylýar. Şöhlelenmäniň täsiri astynda nusganyň garşylygynyň üýtgemesi ampermetr arkaly kesgitlenýär.

Fotoişjeň ýuwdulmasynyň netijesinde ýylylyk konsentrasiýasyna görä elektronlaryň  $\delta n$  we deşikleriň  $\delta p$  artykmaç konsentrasiýasy peýda bolýar. Maddanyň ýagtylykda we garaňkylykdaky geçirijilikleriň tapawudyna deň bolan  $\Delta\sigma$  ululyk arkaly beýan edip bolýar:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma &= \sigma_y - \sigma_g = [e\mu_n(n_0 + \delta_n) + e\mu_p(p_0 + \delta p)] - [e\mu_n n_0 + e\mu_p p_0] = \\ &= e\mu_n \delta n + e\mu_p \delta p\end{aligned}\quad (3.14)$$

Köplenç zaryadlaryň hereketlilikini üýtgemeýan hasap edip bolýar. Ýagtylygyň hususy ýuwdulmasy elektronlaryň we deşikleriň bir wagtda generasiýasyna getirýär.



2.19-njy surat

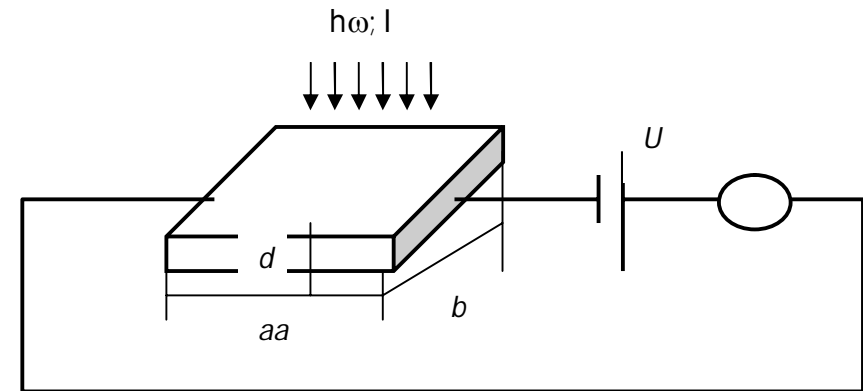
Ýarymgeçi riji	Ti p	Dürli metallar üçin baryeriň beýikligi $\phi_{Mg}$ (W)							
		Al	Au	Pt	W	Ag	In	PtS i	Ws i
Si	n	0,7 2	0,8	0,9	0,4 5	0,7 8		0,8 5	0,6 5
	p	0,5 8	0,3 4			0,5 4			
GaAs	n	0,8	0,9	0,8 4	0,8	0,8 8			
	p		0,4 2			0,6 3			
Ge	n	0,4 8	0,5 9	0,6 7	0,6 7	0,5 4	0,6 4		
	p		0,3			0,5	0,5 5		

Garyplaşan gatlakda elektriki meýdan emele gelýär, bu meýdan elektronlaryň kontakta tarap diffuziýasyna päsgeçilik berýär. Edil p-n geçiş üçin deňagramlylyk ýagdaý ( $U=0$ ) meýdanyň güýjenmesiniň kesgitli bahasy, potensial barýeriň beýikligi (ýa-da energetiki) bilen häsiýetlendirilýär we garyplaşan gatlagyň galyňlygy, ýagny tutuşlaýyn ýarymgeçirijide ýerleşer. Munuň beýle bolmagy metallarda erkin zarýad äkidijileriň konsentrasiýasynyň örän ýokary bolmagy bilen baglydyr. Üst zarýadyň bolmadyk ýagdaýynda energetiki barýeriň deňagramlyk beýikligi metallaryň we ýarymgeçirijiniň çykyş işleriniň tapawudyna deň bolardy.

Emma real ýagdaýda n-tipli ýarymgeçirijide otrisatel üst zarýad bar, onuň dykzlygy elektronyň zarýadyna getirilen  $10^{10} - 10^{11} \text{ sm}^{-2}$  (Si üçin) tä  $10^{13} \text{ sm}^{-2}$  (arsenid galiý üçin). Bu zarýadyň täsiri astynda elektronlar üst gatlakdan gysylp çykarylýar, bu hem garyplaşan gatlagyň emele gelmegine ýardam berýär.

Şonuň üçin potensial barýeriň beýikligi diňe bir çykyş işleriň tapawudy däl, eýsem üst zarýadyň dykzlygy bilen kesgitlenilýär, örän ýokary üst zarýadyň dykzlygy bolanda (Ga As) praktiki taýdan metalyň görnüşine bagly däl. Emma metal p-tip geçirijilikli ýarymgeçiriji kontaktda otrisatel üst zarýad ýarymgeçirijiniň üst oblastynyň gatlagyny

Fotogarşylyk hadysa optiki şöhledenmäniň täsiriniň astynda ýarymgeçirijiniň elektrik garşylygynyň üýtgemesinden ybarat. Fotonlaryň fotoişjeň ýuwdulmasynyň netijesinde peýda bolýan goşmaça geçirijilige fotogeçirijilik diýilýar. Fotogeçirijilik ölçemek üçin tejribäniň çyzgysy aşakda görkezilen





köpeldijiler, elektron-optiki özgerdijiler we başgalar ýaly esbaplaryň işleýşi şu hadysa esaslanan.

Içki fotohadysalarda zaryad äkidiji (elektron ýada deşik) ýagtylygyň kwantynyň täsiriniň astynda maddadan çykanok, ol diňe ýokary energetiki ýagdaýa geçýär (mysal üçin walent zolakdan geçiriji zolaga). Fotonyň ýuwdulmagy başlangyç hadysa bolup durýar. Emma ýuwdulmanyň hemme görnüşleri kristallyň elektrik häsiýetleriniň birmeňzeş üýtgemegine getirenoklar. Udel elektrik geçirijilik

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (3.13)$$

erkin äkidijileriň konsentrasiýasyna we hereketlilige bagly. Ýuwdulma hadysalaryň arasynda diňe hususy we garyndy ýuwdulmalar zaryadyň erkin äkidijileriň konsentrasiýasynyň üýtgemegine getirýärler, sebäbi bu ýuwdulma hadysalar ýagtylygyň kwantlarynyň täsiri astynda elektronlaryň (deşikleriň) baglanyşykly ýagdaýdan erkin ýagdaýa geçişleri bilen esaslandyrylan. Edil şu hadysalar fotoelektrik hadysa iň uly goşandy goşýalar.

Şol bir zolagyň elektronlaryň bir bölüminden beýlekä geçişleri bilen baglanyşykly ýuwdulma we zaryadyň erkin äkidijileriň ýuwdulmasy zaryadyň äkidijileriň konsentrasiýasyna we hereketliligine täsir edenoklar. Ýarymgeçirijilerde fotoelektrik hadysalaryň arasynda esasy we möhüm bolup fotogarşylyk hadysa durýar.

deşikler bilen baglaşdyrmaga ýardam berýär. Şonuň üçin otrisatel üst zaryadlar garyplaşan gatlak (we göneldiji kontakt) p-tip geçirijilikli ýarymgeçiriji üçin diňe bir ýagdaýda almak bolar, haçan-da metalyň çykyş işi ýarymgeçirijiniňkiden az bolanda. Bu halatda elektronlar metaldan ýarymgeçirijiniň walent zonasyna geçýärler we deşikleriň konsentrasiýasynyň üst oblastlarynda azalmagyna getirýär.

Alýuminiý-kremniý n-tipe (2.22a surat) we alýuminiý-kremniý p-tipe, ýagny  $U=0$  bolanda kontraktlaryň energetiki diagrammalaryna seredeliň.

Çep tarapda bölekleyin rugsat edilen doldurylan metalyň zonasy şekillendirilen. Fermi derejesi  $E_f$

elektronlar tarapdan eýelenen ýagdaýlary (suratda ştrihlenen) erkin zaryada aýyrýar. Deňagram ýagdaýda Fermi derejesi mydamalykdyr (2.22 we 2.3 suratlary deňeşdiriň). Ýarymgeçirijide n-tipli zonanyň egrelmesi ýokary we ýarymgeçiriji p-tipli zonanyň egrelmesi aşak esasy zaryad äkidijileriň zaryadlarynyň azalmagyna laýyk gelyän garyplaşan gatlaklaryň we  $q\phi$  beýikli energetiki barýeriň emele gelmegine getirýär. Ululyk  $q\phi_{my}$  (2.22 a-surat)-bu elektronlar

tarapdan metaldan (Fermi derejesinden) ýeňip geçen ýarymgeçirijiniň geçiriji zonasyna geçen barýeriň beýikligi,  $\phi_{my0}$  – ters ugra geçen elektronlar üçin barýeriň beýikligi.

Nazaryýet nukdaýnazardan  $p_g$  barýeriň beýikligine baha bermek çylşyrymly, praktikada eksperimental ululyklary ulanylýarlar (2.1 tablisada getirilen). Barýeriň beýikligi  $\varphi_{my}$  temperatura we garyntgylaryň konsentrasiýasyna bagly dälir we metalyň, ýarymgeçirijiniň görnüşi we üst zaryadyň dykzlygy bilen kesgitlenilýär. Barýeriň beýikligi  $\varphi_{my0}$  (2.22a). donorlaryň konsentrasiýasynyň ösmegi ýa-da temperaturanyň peselmegi bilen ulalýar, sebäbi Fermi derejesi ýarymgeçirijide geçiriji zona tarapa süýşýär.

Metal – ýarymgeçiriji n – tipli kontaktyň garyplaşan gatlagyň deňagram galyňlygy şonuň ýaly-da simmetriki däl  $p^+ - n$  geçişiniň  $\varphi_0$  ululygy  $\varphi_{my0}$  bilen çalşyryp (2.3) formula boýunça hasaplamak bolar. Barýeriň beýikligi näçe uly bolsa, şonça-da garyplaşan gatlagyň galyňlygy uly bolýar, donorlaryň konsentrasiýasynyň ulalmagy bilen azalýar.

San taýdan 2.22a suratda maglumatlar  $\varphi_{my} = 0.72W$  (tabl.2.1)  $N_g = 10^{15} sm^{-3}$   $T=300K$  bu ýagdaýda  $\varphi_{my0} = 0.5W$  we  $L_{ob} = 0.7mkm$  bolanlygy üçin alýuminiýden we n-tip kremniýden çykyş işi

$$\Delta p_d = G_p \cdot \tau_n = \frac{\beta \alpha I \tau_p}{\hbar \nu} \quad (3.10)$$

Onda durnukly fotogeçirijilik şeýle tapylýar.

$$\sigma_{fd} = e \beta \alpha (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) \cdot \frac{I}{\hbar \nu} \quad (3.11)$$

Fotogeçirijilik  $\sigma_f$  bilen ýagtylygyň intensiwliginiň ( $I$ ) gatnaşygyna ýarymgeçirijiniň udel ýagtylyk duýujylygy diýilip at berilýär.

$$S_f = \frac{\sigma_f}{I} \quad (3.12)$$

Fotoelektrik hadysalar (fotohadysalar) elektromagnit şöhlemenäniň täsiriniň astynda maddanyň elektrik häsiýetleriniň üýtgemesi bilen baglanyşykly. Gaty jisimlerde daşky we içki fotohadysalar seredilip bilýär. Daşky fotohadysa ýagtylygyň kwantlarynyň täsiri astynda maddadan wakuuma elektronlaryň emissiýasy bilen kesgitlenýär. Emitirlenen elektronlary soňra anod bilen ýygnap bolýar. Wakuum fotoelementler, fotoelektron

$$\frac{dI}{dx} = \alpha I \quad (3.7)$$

Haçanda birlik göwrümde  $\hbar\nu$  energiýaly ýagtylyk kwanty ýuwdulsa, onda  $G$  mukdardaky artykmaç elektronlar we deşikler emele gelýär.

$$G = \frac{\beta \alpha I}{\hbar\nu} \quad (3.8)$$

Bu ýerde  $\beta$ , proporsionallyk koeffisiýenti bolup, oňa köplenç fotoionlaşmanyň kwant çykyşy diýilip at berilýär.

Emma ýagtylyk oýandyrylmasy başlan badyna artykmaç zarýatlar öz maksimumyna ýetmeýär, sebäbi generirleme bilen deňine rekombinirlenme prosessi başlanýar. Şol sebäpli hem belli bir wagtdan soň artykmaç zarýatlar özleriniň durnukly bahalaryna ýetýär, generirlenýän we rekombinirlenýän zarýatlaryň sany deňleşýär.

Artykmaç elektronlaryň we deşikleriň durnukly ýagdaýdaky bahalary:

$$\Delta n_d = G_n \cdot \tau_n = \frac{\beta \alpha I \tau_n}{\hbar\nu} \quad (3.9)$$

$(N_g = 10^{15} \text{ sm}^{-3})$  takmynan deňdir (4.3eW), onda barýeriň we garyplaşan gatlagyň emele gelmegi diňe otrisatel üst zarýadlar tarapdan amala aşyrylýar. Kremniý p-tip geçirijilik üçin (2.22b, surat)  $(N_e = 3 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3})$  we alýuminiý çykyş işiniň tapawudy 0.6 eW, onda  $\varphi_{my0} = 0.3W$ , emma bu ýagdaýda otrisatel üst zarýad barýeriň beýikligini azaltýar.

### Deňagramdäl ýagdaýda göneldiji kontakt.

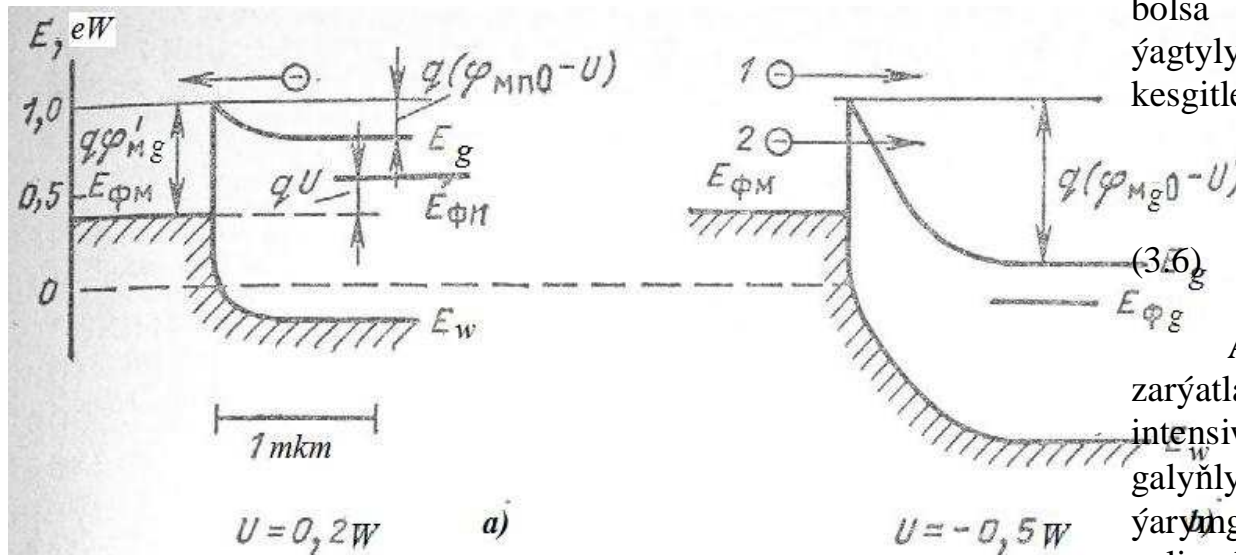
2.23 suratda getirilen alýuminiý – kremniý n-tip  $(N_g = 10^{15} \text{ sm}^{-3} \text{ } T=300K)$  kontaktyň deňagramdäl energetiki diagrammasyna seredeliň.

Göni naprýaženiýede (plýus - metala), potensial barýer ýarymgeçirijiden elektronlaryň metala geçmegine päsgel berýär.

U potensial peselýär (2.23a surat), emma Fermi derejesi  $E_{fy}$  ýarymgeçirijide  $qU$  ululyga ýokary süýşýär. Göni tok kontakt arkaly ýarymgeçirijiniň elektronlaryny emele getirýär, olaryň energiýasy peseldilen barýeri  $(q\varphi_{my0} - U)$  ýeňip geçmek üçin

ýeterlikdir. Ters naprýaženiýede (minus - metala) potensial barýer ýokarlanýar  $|U|$  proporsional (2.23b surat). Ters tok  $I_0$  ýarymgeçirijä metaldan geçen elektronlar tarapdan emele getirýär, olaryň energiýasy barýeri  $q\varphi_{my}$  ýeňip geçmek üçin ýeterlikdir (1-nji elektronda 2.23b, suratda):

$I_0 = SAT^2 \exp(-\varphi_{my}' / \varphi_\tau)$  (2.21), nirede  $S$  – kontaktyň meýdany;  $A$  – kremniýniň n-tip geçirijiligi üçin  $110A / (sm^2 \cdot Kl^2)$  deň.



2.20-nji surat

ýarymgeçirijilerde doly geçirijilik, deňagramlykdaky zarýatlaryň konsentrasiýalary  $n_0$ ,  $p_0$  we deňagramlykda däl zarýatlaryň konsentrasiýalary bilen kesgitlenýär:

$$\sigma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p] \quad (3.5)$$

Egerde ýarymgeçirijiniň ýagtylyk düşmeýän ýagdaýyndaky geçirijiligini

$$\sigma_g = \sigma_0 = e(n_0\mu_0 + p_0\mu_0),$$

bolsa onda geçirijiniň fotogeçirijiligi, ýagny ýagtylygyň täsiri esasyndaky geçirijilek şeýle kesgitlenilýär

$$\sigma_f = \sigma - \sigma_0 = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (3.6)$$

Artykmaç, ýagtylyk tarapyndan oýandyrylan, zarýatlaryň konsentrasiýasy ýagtylyk şöhlesiniň intensiwligine we energiýasyna baglydyr. Goý galyňlygy  $dx$ , ýuwdulma koeffisiýenti  $\alpha$  bolan ýarymgeçiriji gatlagyna intensiwligi  $I$  bolan ýagtylyk gelip düşsün. Onda bu gatlagyň birlik göwrümünde ýuwdulýan energiýanyň mukdary

$$\hbar\nu = E_g + \xi_p$$

(3.4)

Edil ýuwdulma hadysasynda boluşy ýaly fotogeçirijilegiň uzyn tolkuň araçägi ýaly gysga tolkun araçägi hem bolup bilýär. Emma köplenç halda geçiş zona ýokarky zonalar bilen bir-birine mingeşip bilýär, şol sebäpli hem tutuş zona emele getirmegi mümkin. Fotoduýjylyk spektri gysga tolkun tarapyndan köplenç has uly energiýalara tarap dowam edip bilýär. Köplenç düşýän fotonyň energiýasynyň artmagy bilen ýuwdulma koeffisiýenti artýar we güşýän fotonlar gaty gysga aralykda ýuwdulyp bilýärler. Ondan başgada fotoduýjylyk spektriniň gysga tolkun uzynlyk tarapyndan çäklendirilmegine kristalyň üst rekombinasiýanyň tizliginiň hem täsiri uludyr.

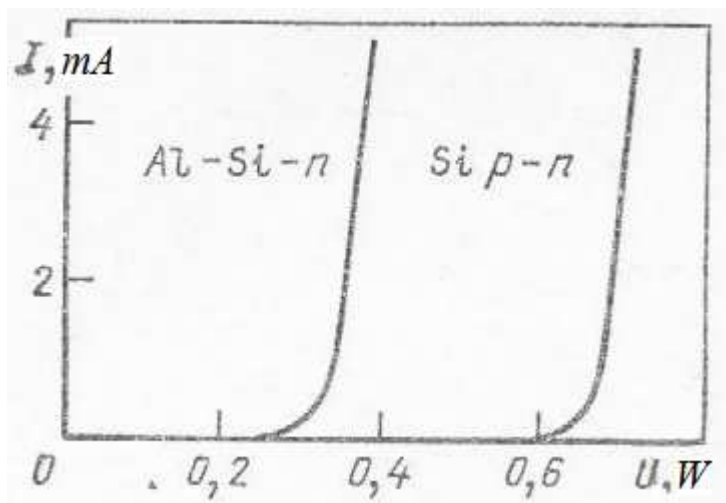
#### Fotogeçirijilik.

Optiki oýandyрма esasynda döredilen artykmaç elektronlar  $\Delta n$  we deşikler  $\Delta p$ , deňagramlykdaky zarýatlaryň ortaça energiýasyndan gaty köp energiýa eýýe bolmagy mümkin. Emma bu oýandyrylan elektronlar we deşikler gaty gysga wagtyň içinde  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  s, deňagramlykdaky zarýatlaryňka meňzeş, energiýa boýunça paýlanýar. Şol sebäpli hem deňagramlykdaky däl zarýatlar, deňagramlykdaky zarýatlara meňzeş hereket çaltlygyna (podwižnost) eýýedir. Şeýlelikde ýagtylyk oýandyrylmasy bolan

Potensial baryeriň  $\varphi_{my}$  ösmegi bilen ters tok birden azalýar. Emma birmeňzeş temperaturada meýdanda we ýarymgeçiriji n-tipinde garyntgylaryň konsentrasiýasynda kontaktyň ters togy (2.21)  $p^+ - n$  geçişiň (2.13) ýylylyk togundan has ýokarydyr.

Mysal üçin  $T=300K$ ,  $S=10^{-4} sm^{-2}$  we  $N_g=10^{15} sm^{-3}$ ,  $p^+ - n$  geçiş üçin, emma alýuminiý – kremniý kontakt üçin  $I_0=2 \cdot 10^{-9} A$ . Ters tok (2.21) temperaturanyň ýokarlanmagy bilen eksponensial ulalýar.

Ideallaşdyrylan metal-ýarymgeçiriji kontaktyň WAH (2.12) formula bilen kesgitlenilýär,  $I_0$  tok (2.21) laýyk gelýär. WAH göni şahalary kremniý  $p^+ - n$  geçişiň we alýuminiý – kremniý kontaktyň 2.24 suratda getirilen ( $t=25^\circ C$ ) . Uly ters tok göni az naprýaženiýe metal-ýarymgeçiriji kontakt üçin birmeňzeş göni tokda amala aşyrylýar.



2.21-nji surat

Wolt – amper häsiýetnamalar üçin göni naprýaženiýalaryň tapawudy (2.24 surat)  $I = 2\text{mA}$  bolanda 350mW-dan ybaratdyr. Real kontakt metal-ýarymgeçiriji üçin WAH (2.12) formula we göni toguň az bahalarynda garyplaşan gatlakda rekombinasiýa togy ujypsyz bolanlygy sebäpli laýyk gelýär. Uly göni toklarda WAH (2.12) görnüşden ýarymgeçirijiniň neýtral oblastynda naprýaženiýanyň peselmegi zerarly tapawutlanyp biliner (2.17).

Kontakt arkaly göni tok esasy zaryad äkidijileriň hereketi bilen amala aşyrylýar, emma esasy däl zaryad äkidijileriň inžeksiýasy, ýagny p-n geçiş üçin mahsus, bu ýerde praktikki taýdan ýok. Şonuň üçin, p-n geçişden tapawutlylykda kontakt metal – ýarymgeçiriji diňe barýer sygyma eýe bolýar:

$$\hbar\nu \geq E_g \quad (3.1)$$

Öňden belli boluşy ýaly eger göni däl geçiş bolan ýagdaýynda, kwaziimpulssyň saklanmak kanuny fononyň emissiýasynyň hasabyna ýerine ýetip, fotogeçijiligiň uzyn tolkun araçägi şeýle tapylýar.

$$\hbar\nu = E_g + E_{\text{fon}} \quad (3.2)$$

Egerde n-tipli ýarymgeçirijide garyndynyň konsentrasiýasy gaty ýokary bolsa, ýagny Fermiň derejesi geçiş zonanyň düýbinden  $\xi_n$  ýokarda bolsa, onda fotogeçirijeligiň uzyn tolkun araçägi, şeýle tapylýar.

$$\hbar\nu = E_g + \xi_n \quad (3.3)$$

Egerde p-tipli ýarymgeçirijide garyndynyň konsentrasiýasynyň ýokarylygy sebäpli, Fermiň derejesi walent zonanyň depesinden aşakda bolsa, onda fotogeçirijiligiň uzyn tolkun araçägi aşakdaky aňlatma bilen tapylýar.

Şonuň üçin ýagtylygyň ýuwdulma hadysasy doly beýan edilýär, egerde energiýanyň  $E$  we impulsyň  $p$  üýtgemesi göz önüne getirilse.

Eger ýarymgeçirijide elektronyň we deşigiň energiýasynyň minimumlary impulsyň birmeňzeş bahasyna düşýan bolsalar, onda onda olara göni zolaklar diýilýär. Mukdar tarapyn ýagtylygyň ýuwdulmasy aşadaky formula arkaly beýan edilýär:

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (2.13)$$

## 5.2 Ýarymgeçirijilerde fotoelektrik hadysalary.

Ýarymgeçirijiniň ýagtylyk şöhlesiniň täsiri esasynda elektrik garşylygynyň üýtgemekligine fotorezistiw effekt diýilip at berilýär. Ýagtylygyň täsiri esasynda optiki generirleme sebäpli, emele gelýän zaryadlar tarapyndan ýuze çykarylan artykmaç geçirijilige, fotigeçirijilik diýlip at berilýär.

Içki fotoeffektde ilkinji bolup fotonyň ýuwdulma hadysasy durýar. Şol sebäpli hem erkin, oýandyrylan elektronlaryň emele gelme hadysasy, ýagtylyk fotonynyň ýuwdulma aýratynlyklaryna baglylykda, dürli-dürli bolup geçýär. Zolak ara geçişde (walent zolak - geçiriji zolak) hususy fotogeçirijilik ýuze çykýar. Göni geçişli zonaly ýarymgeçirijilerde, wertikal geçişde, oýandyryjy fotonyň energiýasy gadagan zonanyň giňliginden kiçi bolmaly däl.

ony (2.19) formula boýunça  $\varphi_0 \varphi_{my0}$  çalşyryp hasaplamak bolar. Diffuzion sygymyň bolmazlygy (§2.26) metal – ýarymgeçiriji esasynda kontaktda impuls diodlary döretmek üçin mümkinçilik bolýar. Impuls diodlar p-n geçiş diodlary bilen deňeşdirilende çalt işleýji häsiýete mahsusdyr. Real geçişniň ters togy (2.21) formula boýunça kesgitlenýän tokdan uly tok generasiýanyň akmagy we potensial barýeriň  $\varphi_{my}$  güýçli elektrik meýdanda azalmagy sebäpli (Şottkiniň effekti). Generasiýa toga baha bermek üçin (2.18) formulalary soňky formulada  $\varphi_0 \varphi_{my0}$  çalşyryp ulanmak gerek.

Potensial barýeriň peselmagi

$$\varphi_{my} \sigma \varphi_{my} = \sqrt{q \varepsilon_{\max} / (4 \pi \varepsilon_0 \varepsilon_y)} \quad \text{formula boýunça}$$

baha bermek bolar, nirede  $\varepsilon_{\max}$  - bölünme çäkde elektrik meýdanyň güýjenmesi, ony (2.3) formula boýunça  $\varphi_0 \varphi_{my0} + U_t$  çalşyryp hasaplanylýar.

Mysal üçin,  $N_g = 3 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ,  $U_t = 5W$ ,

$\varepsilon_{\max} = 7 \cdot 10^4 W / \text{sm}$ ,  $\sigma \varphi_{my} = 0.03W$ , bu ters toguň bahasy üç esse uly Şottkiniň effektini hasaba alynmazdan berýär.

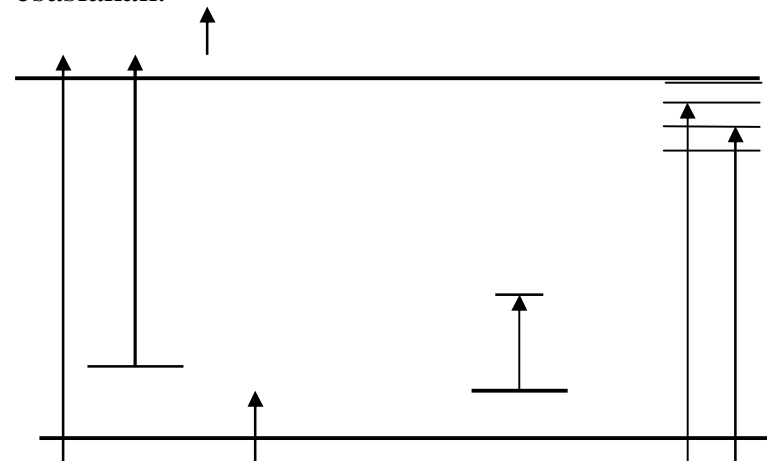
Garyntgylaryň konsentrasiýasy  $(N_g \geq 10^{19} \text{ sm}^{-3})$  uly bolanda garyplaşan gatlagyň galyňlygy örän az bolýar, elektronlar metalda ýarymgeçirijä tunnel effektiň hasabyna geçýärler. Ters tok edil p-n geçişdäki tunnel deşilme ýaly birden ulalýar.

**Omiki kontakt.** Ýarymgeçiriji oblastdan daşky birikdirijä zynjrlary döretmek üçin hemme ýarymgeçiriji abzallarda praktiki taýdan giňden ulanylýar; olar üçin ýakyn çyzykyly WAH we az garşylyk mahsusdyr. Metal – ýarymgeçiriji omiki kontaktlarda ýarymgeçirijiniň kontakt oblastynda degişli metallaryň ulanylmagynyň hasabyna esasy zaryad äkidijiler baýlaşdyrylan gatlak emele gelýär we az garşylyga eýe bolýar.

Mundan başga-da ýokarda seredilen kontaktlar üçin (2.22 surat) garyntgylaryň uly konsentrasiýalarynda garyplaşan gatlagyň galyňlygy şeýle derejede azalýar, ýagny **tunnel togy** ýüze çykýar (oňa degişli elektronlaryň geçişleri 2 san bilen belgilenen, surat 2.23b ). Bu kontakt togy iki ugurda gowy geçýär, omiki kontaktdan ybaratdyr.

Şeýlelikde, diňe az konsentrasiýaly garyntgylý ýarymgeçirijiler üçin göneldiji kontakt almak bolar  $(N < 10^{17} \text{ sm}^{-3})$ .

peýda bolup bilýärler. Şonuň bilen birlikde energiýanyň rugsat edilen zolaklarda zaryadyň diňe bir äkidijisi peýda bolup bilýär. 1, 2, 3 geçişler gaty jisimleriň elektrik geçirijiligini üýtgetýärler. Şu içki fotoelektrik hadysa fotokabuledijileriň köpüsiniň işi esaslanan.



Çyz. 2.1. Kristallarda ýagtylyk ýuwdulanda esasy elektron geçişleri

Içkimerkez geçişlerde 4 elektron boşanok we ýagtylyk ýuwdulma hadysasy kristallyň elektrogeçirijiliginiň üýtgemegine getirenok. Bu eksiton ýuwdulma (5 geçiş) we zaryadyň erkin äkidijileri arkaly ýuwdulma (6 geçiş) hem degişli.

Foton elektron arkaly ýuwdylanda energiýanyň we impulsyň saklanma kanunlary ýerine ýetirilmeli.



Makswelliň deňlemeleri:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, & \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Madda deňlemeleri:

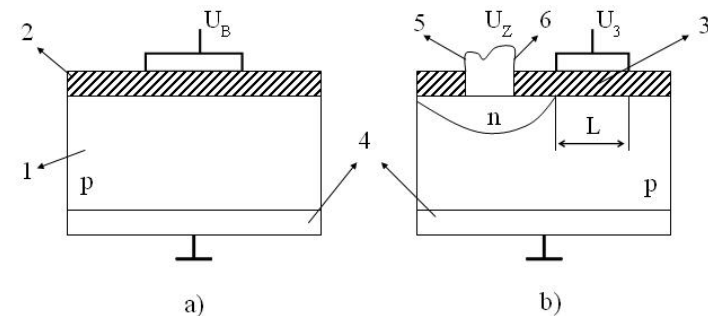
$$\mathbf{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.12)$$

Ýagtylyk maddanyň içinden geçende onuň intensiwligi peselýär. Şölenenmäniň energiýasynyň bir bölegi ýuwdulýar we elektronlaryň ýada atomlaryň ýylylyk hereketiniň energiýasyny ulaltmaga sarp edilýär. Çyzg. 2.1 ýagtylygyň täsiri astynda kristallardaky elektronlaryň mümkin bolýan geçişleri görkezilen ( $E_c$  – geçiriji zolagyň aşakdaky gyrasyna degişli energiýa,  $E_v$  – walent zolagyň ýokarky gyrasyna degişli energiýa). 1 geçiş geçiriji zolakda elektronlaryň we walent zolakda deşigiň ýüze çykmagyna getirýär, ol fotonlaryň energiýasy  $h\nu \geq \Delta E = E_c - E_v$  bolanda mümkin, başgaça, gadagan zolagyň  $\Delta E$  uly giňligi bolanda. Fotonlaryň energiýasy kiçi bolanda garyndalaryň ýada kristallaryň defektleriň ýerli derejelerden geçiriji zolaga (2 geçiş) ýada walent zolakdan şu derejelere (3 geçiş) elektronlaryň geçişleri

## 2.9 Metal – dielektrik – ýarymgeçiriji struktura (gurluş).

Metal – dielektrik – ýarymgeçiriji (MDÝ) strukturalar meýdan MDÝ tranzistorlaryň, fotoelektriki abzallaryň, kondensatorlaryň, ýagny naprýaženiýe bilen dolandyrylýan hem giňden ulanylýan integral shemalarda we ýarymgeçirijiniň üst häsiýetlerini öwrenilende, hususanda esasy elektrofiziki parametrleri kesgitlemek üçin üst zaryadyň, üst rekombinasiýanyň tizligini, garyntgylaryň konsentrasiýasyny, ýaşaaýyş wagty we ş.m. esasy bolup durýar.

Iň ýönekeý MDÝ struktura (2.25a surat) ýarymgeçiriji kristal - podložkany (teý) 1, dielektrigiň gatlagy 2, metallik elektrod – zatwor 3, omiki kontakt podložka (teý) 4 düzümden ybaratdyr.



2.22-nji surat

Struktura iki çykyşa eýe bolýar, ýagny birikdiriji simler (zatwor we podložka kontakt) we MDÝ kondensator bolup, sygymy  $U_z$  zatwor bilen podložkanyň birikdiriji simleriniň arasyndaky naprýaženiýa baglydyr. Has çylşyrymly MDÝ struktura (2.25b) 6 istogyň güýçli garyntgy goşulan oblasta eýe bolýar, tip geçirijiligi podložka görä garşylykly. Istoga omiki kontakt döredilen. Podložka p-tip geçirijilikli we istok  $n^+$  tipli struktura sedredeliň.

### **MDÝ strukturada fiziki prosesler we onuň esasy parametrleri.**

Zatworyň naprýaženiýasy ýuka dielektrigiň (galyňlygy  $d = 0.3 \div 0.1 \mu\text{m}$ ) gatlagy arkaly ýarymgeçirijiniň üste golaý gatlagynda elektriki meýdany döredýär we zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy üýtgeýär. Naprýaženiýanyň bahalaryna baglylykda baýlaşma, garyplaşma ýa-da inwersiýa režimler ýüze çykarylýar.  $U_0$  naprýaženiýede ýarymgeçirijide maýdanyň güýjenmesi nola deň, üst potensial we göwrüm zarýad neýtrallaşmagyň naprýaženiýesi diýip atlandyrylýar. Bu naprýaženiýe baýlaşmanyň we garyplaşmanyň režimlerine araçägine laýyk gelýär. Üst potensialyň

geçişden başgada göni däl geçiş ýüze çykyp bilýär, gyşyk strelka bilen görkezilen. Bu geçiş üçünji kwaziçastisanyň - fononyň gatnaşmagy bilen amala aşýar. Göni däl geçişde energiýanyň saklanmak kanuny hem-de impulsyň saklanmak kanuny şeýle görnüşe eýe bolýar.

$$E_n = E_p + \hbar v \pm E_{\text{fon}} ; \quad (2.9)$$

$$P_n = P_p + P_{\text{fot}} \pm P_{\text{fon}} ; \quad (2.10)$$

Deňlikde plýus alamat, haçanda hadysada fononyň ýuwdulmasy bolup geçse, minus haçanda hadysa fononyň göýberilmegi bilen bolup geçse. Ýarymgeçirijilerde fononyň energiýasynyň 0.01 eV-dan geçmeýänligini göz önünde tutsan, haçanda fotonyň energiýasy  $\hbar v \approx 1 \text{ eV}$  töweregi bolanda, onda fononyň energiýasyny hasaba almasaň hem bolýar. Fononyň impulsy  $\hbar k_{\text{fon}}$  elektronyň impulsy ýaly Brillýuen birinji zonasynda ýatýar.

Maddada elektromagnit tolkunlaryň ýaýramagy makroskopik elektromagnit nazaryýetinde Makswellyň deňlemeleri arkaly we madda deňlemeler arkaly doly beýan edilýar.

bu ýerde,  $\bar{n}$  - ýarymgeçirijide ýagtylygyň döwürleme koeffisiýenti. Haçanda  $\bar{n} = 4$  diýip,  $m_n$  we  $m_p$  - elektronyň we deşigiň effektiw massalaryny, erkin elektronyň massasyna deň diýip alsaň onda  $\alpha_s$ -niň bahasyny ýönekeý deňlikden tapyp bolýar.

$$\alpha_s \cong 2.7 \cdot 10^5 (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}$$

Hakykatdanam, hususy ýuwdulmada,  $\alpha_s \approx 10^4 \div 10^5 \text{ sm}^{-1}$  baha ýetip bilýär. Ýagtylyk kwanty ýarymgeçirijide ýagtylygyň düşýän üstünde  $\sim 1.0 \div 0.1$  mkm aralykda ýuwdulýar.

Haçanda ýarymgeçirijide geçiş zonanyň düýbi  $E_c$  walent zonanyň depesi  $E_v$  bilen,  $k$  wektoryň dürli bahalarynda ýerleşen bolsa, onda wertikal boýunça  $E_{g0}$  aralyk gadagan zonanyň giňliginden uludyr  $E_g = E_c - E_v$ . Bu ýagdaýda optiki göni geçiş boýunça elektronlaryň oýandyrylmagy üçin, ýagtylyk kwantynyň energiýasy  $E_{g0}$ -dan artyk ýada deň bolmalydyr:

$$h\nu \geq E_{g0} \quad (2.8)$$

$E_{g0}$  ululyga optiki gadagan zonanyň ginligi diýilip at berilýär. Şeýle ýarymgeçirijilerde göni

$\varphi_{por}$  deň bahasynda (1.37) naprýaženiýe  $U_{por}$  **porogowoý naprýaženiýe** diýip atlandyrylýar.  $U_z = U_{por}$  bolanda üstde elektronlaryň konsentrasiýasy podložkadaky (teýdäki) akseptorlaryň konsentrasiýasyna deňdir, bu araçäkde garyplaşma we inwersiýa režimlere degişlidir. Şeýlelikde,  $U_z < U_0$  bolanda ýarymgeçirijisiniň üst gatlakda baýlaşma režime, ýagny  $U_0 < U_z < U_{por}$  bolanda - garyplaşma,  $U_z \geq U_{por}$  - režim inwersiýa eýe bolýar.

Zatworyň naprýaženiýasy dielektrigiň naprýaženiýesi  $U_d$ , ýarymgeçirijiniň üst golaýyndaky  $\varphi_{ust}$ , metal – ýarymgeçiriji  $\varphi_{my0}$  geçişiň kontakt potensiallarynyň tapawudynyň summasyndan (jeminden) ybaratdyr.

$$U_z = U_d + \varphi_{ust} + \varphi_{my0} \quad (2.22)$$

MDÝ gurluşy (strukturasy) analiz üçin neýtrallyk deňlemäni ulanýarlar.

$$Q_z + Q_{ust} + Q_y = 0 \quad (2.23)$$

nirede  $Q_z$  – zatworda zarýadyň dykzlygy,  $Q_{ust}$  – üst zarýadyň dykzlygy,  $Q_y$  – ýarymgeçirijide hereketlendiriji zarýad äkidijileriň we garyntgylaryň kompensirlenmedik ionlaryň zarýadlarynyň dykzlygy  $(Kl/sm^2)$ .

Eger dielektrigiň udel sygymyny kesgitlesek

$$C_{d.u.s} = \varepsilon_0 \varepsilon_y / d$$

(2.24)

onda  $Q_z = C_{d.u.s} u_d$ , nirede  $\varepsilon_0 \varepsilon_d$  – dielektrigiň syzyjylygy.

$U_z = U_0$  bolanda kesgitleme boýunça  $\varphi_{ust} = 0$  we  $Q_y = 0$  we (2.23) deňlemenden gelip çykýar:

$$U_0 = -\left(Q_{ust} / C_{d.u.s}\right) + \varphi_{my0}$$

(2.25)

MDÝ struktura has giňden ulanylýar kremniýde, dielektrik bolup kremniýniň dioksidi zatwor – alýuminiň gatlagy hyzmat edýär. Bu halatda  $\varepsilon_0 \varepsilon_d = 0.3 pF/sm$ ,  $\varphi_{my0} = -0.5W$  we

$Q_{ust}/q = 10^{11} sm^{-2}$ ,  $d = 0.04 mkm$  bolanda (2.25) – den alarys :

$$U_0 = -0.22 - .05 = 0.72W$$

Bu ýerde  $P_n = \hbar \cdot k_n$  – elektronyň impusy;  $P_p$  – walent zonadaky emele gelen deşigiň impulsy;  $P_{fot}$  – elektrony oýandyran fotonyň impulsy. Egerde fotonyň impulsynyň elektronyň impulsyndan  $10^3$  esse kiçiligini göz önünde tutsaň onda elektronyň geçiş zona geçmegi bilen onuň impulsy deşigiňkä seredende üýtgemän galýar:

$$\hbar k_n \approx \hbar k_p \quad (2.6)$$

Energetiki diagrammada şeýle geçişi göni geçiş diýilip atlandyrylyp, wertikal strelka bilen görkezilýär.

Haçanda ýarymgeçirijide geçiş zonanyň minimumy we walent zonanyň maksimumy k tolkun wektorynyň birmeňzeş bahasynda ýerleşen bolsa, onda hususy ýuwdulma koeffisiýenti teoretiki hasaplamalar esasynde şu aşakdaky aňlatmadan tapylýar

$$\alpha_s = \frac{e^2 \left[ 2m_n m_p / (m_n + m_p) \right]^{\frac{3}{2}}}{4\pi \cdot \bar{n} \cdot c \cdot \hbar^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot m_e} \cdot (\hbar v - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

$$h\nu \geq E_g$$

Bu şertden hususy ýuwdulmanyň ýerine ýetýan ýagdaýynyň maksimal tolkun uzynlygyny tapýarys:

$$\lambda_{\max} = 2\pi \cdot \frac{c}{\nu} = 2\pi c \cdot \frac{\hbar}{E_g} \quad (2.3)$$

bu ýerde  $c$  - ýagtylygyň tizligi.

Mysal üçin kremniý ýarymgeçiriji materialynyň gadagan zonasynyň giňligi  $E_g = 1.1$  onda  $\lambda_{\max} \cong 1.13$  mkm.

$$\lambda_{\max} = \frac{1.24}{h\nu} \quad (2.4)$$

Ýuwdulma hadysasyna kwant mehanikasy nukdaý nazardan seretseň, energiýanyň saklamak kanunyndan başgada impulsyň saklanmak kanuny ýerine ýetmelidir:

$$P_n = P_p + P_{\text{fot}} \quad (2.5)$$

Neýtrallyk deňlemde (2.23) porogowoy naprýaženiýany kesgitlemek üçin  $\varphi_{ust} = \varphi_{por}$  hasap edilýär we  $Q_y = Q_{ob}$ , nirede  $Q_{ob}$  – garyplaşan gatlagyň zarýady, onda

$$U_{por} = \pm \left( d \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_y N_n \varphi_{por}} \right) \left( \varepsilon_0 \varepsilon_y \right) \pm \varphi_{por} + U_0 \quad (2.26)$$

Bu ýerde ýokary belgi p-podložkany struktura, aşaky – n –podložkaly struktura otrisateldir;  $\varphi_{por}$  (1.37) formula bilen kesgitlenilýär. N-podložkaly strukturada porogowoy naprýaženiýe modul boýunça p-podložkalydan ýokary, sebäbi položitel üst zarýad inwersiň n – gatlagyň emele gelmegine ýardam berýär, emma inwersion p-gatlagyň emele gelmegine päsgelçilik berýär. P-podložkaly struktura üst zarýadyň uly bahalarynda režim inwersiýa  $U_z = 0$  (ýagny  $U_{por} < 0$ ) bolanda ýüze çykarylýar.

$U_z \geq U_{por}$   $Q_y = Q_y + Q_{ob}$ , nirede  $Q_y$  – inwersion gatlagyň elektronlarynyň zarýady (p-podložkadaky struktura);  $Q_{ob}$  – garyplaşan gatlagyň zarýady, inwersiýa režimde praktiki taýdan mydamalykdyr we zatworyň naprýaženiýasyna bagly däl inwersion

gatlagyň ekramirleýji täsiri sebäpli. Onda (2.23d) formuladan gelip çykýar.

$$Q_y = C_{y.u.s} \left( U_z - U_{por} \right) \quad (2.27)$$

(2.27) gatnaşyk MDÝ strukturalaryň teoriýasynda fundamental gatnaşyk bolup durýar.

MDÝ gurluşly istokly üçin (2.25b surat) istogyň naprýaženiýasy  $U_{is} = 0$  bolanda porogowoy naprýaženiýe (2.26) formula boýunça kesgitlenilýär. Iki strukturanyň esasy tapawudy (2.25 surat) inwersion gatlaklaryň emele gelmeginiň wagtlaryna dürli bolmagy bilen baglydyr.

Istoksyz (çykyşsyz) strukturada inwersion gatlakda toplanan elektronlar zatworyň naprýaženiýasynyň birden ýokarlanmagy nuldan tä  $U_z \geq U_{por}$  çenli ýylylyk generasiýanyň täsiri astynda garyplaşan gatlakda elektron – deşik jübüt ýüze çykýar, bu bolsa praktiki taýdan mgnowen emele gelýär (dielektriki relaksasiýa wagt içinde).

Generirlenen deşikler elektriki meýdan tarapda podložkanyň çuň tarapyna äkidilýär, ýagny garyplaşan gatlagyň predelinden daşary, emma elektronlar – inwersion gatlagga äkidilýär.

Iň ähmiýetli roly üstde dürli defektler bilen baý – generasiýa merkezler zarýad äkidijileriň ýylylyk generasiýasy ýerine ýetirip bilerler. Elektronlaryň ýylylyk generasiýasy adatça örän az, şonuň üçin

diýilip at berilýar. Haçanda  $dx=1$  bolan ýagdaýynda  $\alpha = -dW/W$ . Şeýlelikde, ýuwdulma koeffisiýenti ýagtylygyň kuwwatynyň gurşawynyň birlik gatlylygyndan geçendäki üýtgemesine san taýdan deňdir. Ýuwdulma koeffisiýentiniň birligi uzaklyk birligine ters ululykdyr ( $m^{-1}$ ,  $sm^{-1}$ ).

Ýagtylygyň jisimiň üstünden serpilmesini hasaba alyp (2.1) deňligi integrirläp alarys.

$$W = W_0 (1-r) e^{-\alpha x} \quad (2.2)$$

bu ýerde  $r$  - ýagtylygyň şerpilme koeffisiýenti. Köplenç ýagtylyk gurşawdan geçende diňe bir ýuwdulma hadysasy bolup geçmän, ýagtylygyň ýaýrama hadysasy hem bolup geçýär. Emma biz ýönekeýlik üçin ýagtylygyň geçýän gurşawynda diňe ýuwdulma hadysasyna seredeliň.

Hususy ýuwdulmada, ýarymgeçirijilere gelip düşýän ýagtylyk energiýasy, elektronlary walent zonasynan geçiş zonasyna gesirmeklige harç bolýar (2.2 surat). Energiýanyň saklanmak kanunyna laýyklyda, walent zonadan elektronlary geçiş zona geçirmeklik (oýandymaklyk), haçanda ýagtylyk kwantynyň energiýasy  $h\nu$  ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň giňliginden  $E_g$  kiçi bolmadyk ýagdaýynda mümkindir:

## 5.1 Gaty jisimlerde ýagtylyk şöhlesiniň ýuwdulmagy.

Ýarymgeçirijilerde optiki efektler dürli fotokabuledijilerde, ýagtylyk energiýasy elektrik energiýasyna öwürjilerde, ýagtylyk şöhlesini goýberiji esbaplarda ýagtylyk göýberiji diodlarda ulanylýar. Bu mowzukda ýarymgeçirijide bolup geýýän esasy optiki hadysalara - ýagtylygyň ýuwdulma we jisimiň içinden geçiş proseslerine hem-de ýagtylygyň ýüze çykyş proseslerine seredip geçiris.

Birhilli ýarymgeçiriji plastinkasynyň üstüne kuwwaty  $W_0$  bolan ýagtylyk şöhlesi gelip düşsin. Ýagtylyk şöhlesi ýarymgeçirijiniň içine aralaşdygyça önüň kuwwaty azalýar. Ýarymgeçirijiniň göwrüminde, onuň üstünden  $x$  aralykda,  $dx$  gatlagy bölüp alalyň. Bu  $dx$  gatlakda ýuwdulýan  $dW$  ýagtylyk energiýasynyň mukdary üste gelip düşýän ýagtylygyň kuwwatyna we gatlagyň galyňlygyna göni proporsionaldyr:

$$(2.1) \quad dW = -\alpha \cdot W \cdot dx$$

Deňlikdäki minus alamat ýagtylygyň ýaýraýan ugryna, onuň kuwwatynyň kemelýändigini aňladýar. Bu ýerde  $\alpha$  koeffisiýente, ýuwdulma koeffisiýenti

strukturada inwersion gatlagyň emele gelmegi (formirowaniýe) istoksyz – haýal proses (onuň dowamlylygy 1ms –den tä 10s – e çenli ).

Zatworyň naprýaženiýasynyň birden ýokarlanmagyndan soň  $U_z = 0$  - dan  $U_z \geq U_{por}$  çenli istokly strukturada inwers gatlak zatworyň aşagynda üst potensialyň ýokarlanmagy we  $n^+ - p$  geçişiň potensial barýeriň peselmegi sebäpli istokda inžektirlenen elektronlar tarapdan emele gelýär. Bu hadysa p-n geçiş arkaly (§2.3) inžeksiýa meňzeşdir. Tapawut diňe göni naprýaženiýe istok-podložka geçişiň hemme meýdanynda däl, eýsem diňe üstde ýüze çykýar. Inwers gatlak istokdan elektronlaryň uçýan wagtynda tä zatworyň iň daşdaky çete çenli çalt emele gelýär; bu wagt  $L_z^2 / \mu_n$  niredе  $L_z$  – zatworyň uzynlygy,  $\mu_n$  – elektronlaryň hereketlilik (üstde) zatworyň uzynlygyna baglylykda inwers gatlagyň emele gelmeginiň wagty 0.01 tä 100ms çenli bolýar. Istogyň naprýaženiýasynyň porogowoý naprýaženiýe täsirine seredeliň. Eger istoga položitel naprýaženiýe berilse, onda  $n^+ - p$  geçiş (2.25b surat) ters birikdirilen halatda bolýar we onuň potensial barýeri köpeliýär we istokdan elektronlaryň inžeksiýasyny kynlaşdyrýar. Inwers gatlak emele getirmek üçin indi zatworyň uly naprýaženiýasy talap

edilýär, ýagny porogowoý naprýaženiýe ulalýar. Ony formula boýunça hasaplamak bolar

$$U_{por} - U_i = U_{por} + K_{podl} \left( \sqrt{U_i + \varphi_{por}} - \sqrt{\varphi_{por}} \right) \quad (2.28)$$

nirede  $U_{por} - U_i = 0$  (2.26 seret) laýyk gelýär;

$$K_{podl} = d \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_y q N_y (\varepsilon_0 \varepsilon_d)}$$

podložkanyň porogowoý naprýaženiýe täsir koeffisienti (2.28) aňlatma istokdan hasaplananda porogowoý naprýaženiýani kesgitleýär (podložkadan däl).

## 2.10 Geterogeçişler

Iki ýarymgeçirijiniň dürli gadagan zonaly arasyndaky geçişe geterogeçiş diýilýär. Ýarymgeçirijiler biri-birine örän ýakyn kristallik gözenege eýe bolmalydyr. Geterogeçişler şöhlendiriji we fotoelektriki abzallarda (swetodiodlar, fotodiodlar we ş.m) giňden ulanylýar. Tipiki mysal bolup hyzmat edýär: AlGaAs-GaAs, GaAsP – GaAs, GaAsP – GaP, InP – GaInAs geterogeçişler. Geterogeçişleriň gemogeçişlerden tapawudy olaryň energetiki diagrammalaryndan gelip çykýar. Gemogeçiş – bu p-n geçiş monokristallarda. Gadagan zonasynyň ini n-ýarymgeçirijiniň p-

golaý telewizion ýaýlymlary geçirip bolýar. Optiki diapazonda şol  $\Delta v/v_0$  gatnaşygyň bahasynda bu san millionlar esse köpeliýär.

2. Ýagtylyk tolkunlaryň uzynlygy radiotolkunlaryň uzynlygyndan has kiçi. Bu optiki şöhlelenmäniň giňişlikde ýokary konsentrasiýasyny almaga ýardam berýär, sebäbi fokusirlenen elektromagnit şöhlelenmäniň in kiçi göwrümi tolkun uzyn tertipli häsiýetli ölçegleri eýeleýär. Onsoň optiki diapazonda  $0,1^\circ$  we kiçi dargama burçly şöhlelenmäniň ugurlylyk şekilini düzmek aňsat. Radiodiapazonda ( $\lambda=1$  m) şeýle şekili ýasamak üçin tertip boýunça ýüzlerçe metrli diametrli antenna gerek bolardy.
3. Maglumatlaryň geçirişi fotonlar arkaly ýerine ýetirilýär. Hemişeki elektron esbaplarda maglumatlaryň esasy äkidijileri bolup elektronlar durýärlar. Olardan tapawutlanýan fotonlar elektrik taýdan zaryadsyz bölejikler, biri-biri we daşky elektrik we magnit meýdanlar bilen özara täsirlere gatnaşmaýan. Bu girişiň we çykyşyň gowy galwaniki baglanyşsyzlygyň mümkinçiligini, maglumatlaryň akymynyň birugurlylygyny, ýokary päsgelçilik goranmaklygy kesgitleýär.
4. Maglumatlary ýazmakda, saklamakda we gaýtadan işlemekde optiki usullaryň ulanmagy elektron hasaplaýyş maşynlary ýasamakda täze mümkinçilikleri açýar.

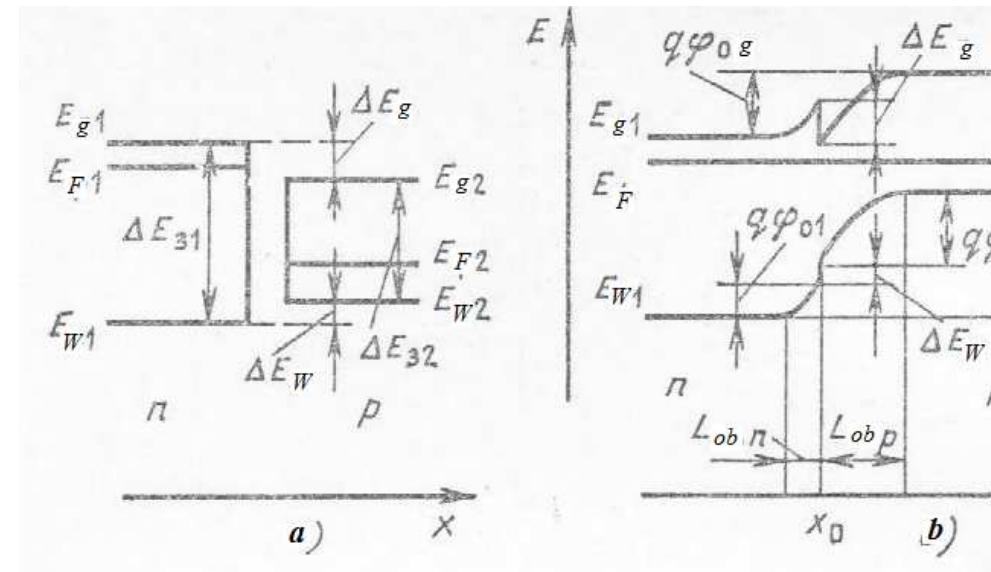


- **Mejbur şöhlendirme** – mejbur göýbermegiň netijesinde ýüze çykýan kogerent elektromagnit şöhlendirme.
- **Mejbur göýberme** – daşky elektromagnit meýdan bilen özara täsiriniň netijesinde ulgamyň kwant geçişindäki fotonyň kogerent göýbermesi.
- **Kogerentlilik** – yrgyldy ýada tolkun hadysalaryň wagtda we giňişlikde ylalyşykly geçmegi. Elektromagnit tolkuna kogerent diýilýär egerde onuň amplitudasy, ýygylgy, fazasy, ýaýramagyň ugry we polärlanmagy hemişeki ýada kesgitli kanun boýunça üýtgeýärler (tertipli).

Optoelektron esbaplary optiki diapazonda ulanylýarlar. Ylymyň bu bölümüni dowamly özleşdirmek üçin häzirki zamanda gowy ösen radiofizikanyň, radiotehnikanıň we elektronikanıň usullary oňa geçirilýär. Bu geçiriş indiki aýratynlyklar bilen häsietlendirilýär:

1. Optiki diapazonda elektromagnit yrgyldylaryň ýygylgy (äkidiji ýygylgy  $\nu_0$ ) radiodiapazonyňka görä has uly. Spektriň göze görünýän we ýakyndaky infragyzyň böleklerinde ýagtylyk yrgyldylaryň ýygylgy ( $\sim 10^{15} - 10^{13}$  Gz) radio we telewideniýedäki ulanylýan radiotolkunlaryň ýygylgyndan millionlar esse uly. Bu aragatnaşygyň optiki kanalyň ýokary maglumat sygymyny kesgitleýär. Hemişeki telewizion şekili geçirmek üçin  $\Delta\nu \approx 5$  MGz gerek bolýar. Şonuň üçin metr diapazonda ( $\lambda = 1$  m  $\nu_0 = 300$  MGz) diňe ona

ýarymgeçirijiniň gadagan zonasy bilen deňeşdirilende uly bolan  $\left( \Delta E_{g1} > \Delta E_{e2} \right)$  ýagdaýyna seredeliň.



2.23-nji surat

2.23a suratda şol bir derejede energiýanyň başlangyç hasaplamasynda iki ýarymgeçirijiniň energetiki diagrammalary görkezilen. Iň ähmiýetli parametr iki ýarymgeçirijiniň geçirişi zonalarynyň düýbünüň energiýalarynyň tapawudydyr:  $\Delta E_n = E_{n1} - E_{n2}$ . Walent zonanyň ýokarsyny energiýalarynyň tapawudyny  $\Delta E_n$  : arkaly

$$\Delta E_W = \Delta E_{W_1} - \Delta E_{W_2} - \Delta E_n. \quad 2.23b \quad \text{suratda}$$

geteroqeçişiň energetiki diagrammasy görkezilen. Metallorgik çäkde  $x_0$  zonalaryň çäginin  $\Delta E_n$  we  $\Delta E_W$  deň bolan bölünmesi emele gelýär.

Metallurgik çägiň  $x_0$  golaýynda zonalaryň çäginin egrelmesi garyplaşan gatlagyň emele gelmegi bilen baglydyr  $L_{obn}$  we  $L_{obp}$  galyňlykly we donorlaryň, akseptorlaryň ionlarynyň göwrüm zaryadlaryny saklaýar. Egrelmeleriň bahasy  $(q\varphi_{01}, q\varphi_{02})$  garyplaşan gatlakda emele gelen içki potensiallaryň tapawudyna deňdir. Jem (summa)  $\varphi_0 = \varphi_{01} + \varphi_{02}$  kontaktyň potensiallarynyň tapawudydyr. Bu hem edil gemogeçişler üçin Fermi derejesi arkaly izolirlenen ýarymgeçirijilerde  $\varphi_0 = (E_{01} - E_{02})/q$  formula bilen aňladylyp biliner. Emma geteroqeçiş üçin  $\varphi_0$  potensial barýeriň beýikligi bilen gabat gelmeýär. 2.23b suratdan görnüşi ýaly potensial barýeriň beýikligi n-oblastdan p –oblasta tarap hereket edýän elektronlar üçin  $\varphi_{0n} = \varphi_0 - \Delta E_n / q$ , deşikler üçin p oblastdan n oblasta hereket edýär  $\varphi_{0p} = \varphi_0 + \Delta E_w / q$  bolar. Şeýlelikde, elektronlar üçin barýer deşikler

öňüne getirmäge optiki şöhlendirmäniň we maddanyň özara täsirleri ulanylýan we olary barlaýan ylmyň we tehnikanyň bölümi.

- **Optiki şöhlendirme** – optiki diapazonyň elektromagnit şöhlendirmesi.
- **Optiki diapazon** – 1 mm-den 1 nm çenli aralykda ýerleşýän tolkun uzynlykly elektromagnit yrgyldylar. Optiki diapazonyň içinde *görüňýän* ( $\lambda=0,38\div0,78$  mkm), *infragyzy* ( $\lambda=0,78\div1000$  mkm) we *ultramelewşe* ( $\lambda=0,001\div0,38$  mkm) şöhlendirmeler bar.
- **Ýagtylyk tolkunlar** – optiki diapazonyň elektromagnit tolkunlary.
- **Monohromatik şöhlendirmesi** – haýsyda bolsa bir ýygylykly (bir tolkun uzynlykly) häsiýetlendirilýän ýagtylyk yrgyldylaryň optiki şöhlendirmesi.
- **Kwant güýçlendiriji** – mejbur şöhlendirmäni ulanmakda esaslanan elektromagnit tolkunlaryň güýçlendirijisi.
- **Kwant generator** – mejbur şöhlendirmäni ulanmakda esaslanan kogerent şöhlendirmäniň çeşmesi.
- **Lazer (optiki kwant generator)** – optiki şöhlendirmäniň kwant generatory.
- **Mazer** – radiodiapazondaky elektromagnit şöhlendirmäniň kwant generatory.

elementleri, impuls transformatorlary, rele, gerkonlar we ş.m. gaty uly göwrümi bolmagyna seretmezden, olaryň ygtybarlylygy gaty kiçidir.

Käbir radiotekniki elementleriň ýokary naprýaženiýa bilen iýmitlendirilmegi, meselem, elektronoptiki özgerdijiler, elektron-şöhle trubkalary, olary integral shemalar bilelikde ulanmaga uly kynçylyk döretýär. Ondan başgada bu esbaplaryň ulanylyş ähtibarlygy gaty kiçidir.

Hakykatyna seretseň esasy göwürüm şu esbaplaryň we radiotekniki elementleriň paýyna düşýär.

Şeýlelikde optoelektronika özüniň ösüşinde iki ugur boýunça häzirkä zaman tehnikasyna öňe gidýär: birinjiden, tranzistor we integral mikroelektronikasyna goşmaça hökmünde; ikinjiden, öňki adaty mikroelektronikany inkär edip, ony düýpden täze derejedäki maglumat tehnikasyna geçirmeklige ýardam edýär.

Dersiň mani-mazmunyna seretmegiň öňünden optoelektronikanyň esasy düşüňjeleri we kesgitlemeleri barada aýdylsa peýdaly boljak.

- **Kwant elektronika** – kogerent elektromagnit tolkunlary generirlemäge, güýçlendirmäge we özgertmäge kwant hadysalary ulanylan we olary barlaýan ylmyň we tehnikaň bölümi.
- **Optoelektronika** – maglumatlary geçirmäge, kabul etmäge, gaýtadan işlemäge, saklamaga we göz

bilen deňeşdirilende  $\varphi_{0p} - \varphi_{0n} = (\Delta E_{L1} - \Delta E_{L2}) / q$  ululyga pesdir. Şonuň üçin göni naprýaženiýe goýulanda elektronlaryň inžeksiýasy bolup geçýär, eger-de p oblast (kä wagtlar uly) birmeňzeş garyntgylaryň konsentrasiýa eýe bolsa hem n – oblastdaky ýoly. Şeýlelikde, 1- e golaý (bir taraplaýyn inžeksiýa) koeffisient inžeksiýany almak bolar, egerde baza iberilen ýagdaýda p-oblast has güýçli garyntgy goşulan (legirowan) emmittere garanynda. Şonuň bilen getegeçiş prinsipial taýdan gemogeçişden tapawutlanýar. Mysal hökmünde  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  n-tipli  $N_g = 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ,  $\Delta E_{31} = 1.8 \text{ eV}$  we GaAs p-tipli  $N_n = 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ ,  $\Delta E_{32} = 1.42 \text{ eV}$  hökmünde geçişe seredeliň. Onda  $\varphi_0 = 1.65 \text{ W}$ ,  $\varphi_{0n} = 1.27 \text{ W}$ ,  $\varphi_{0p} = 1.65 \text{ W}$  ( $\Delta E_n = 0.38 \text{ eV}$ ,  $\Delta E_w \approx 0$ ) we  $N_a \gg N_g$  deňsizlige garamazdan inžeksiýanyň deşikli togy elektrona görä  $\exp[-\Delta E_a / (kT)] < 10^{-8}$  örän ujypsyz, koeffisient inžeksiýa praktiki taýdan 1-e deň.

Garyplaşan gatlaklaryň doly galyňlygy

$$L_{ob} = L_{obn} + L_{obp} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_n \varepsilon_p \varepsilon_0 (N_a + N_g)^2 \varphi_0}{q N_a N_g (\varepsilon_n N_g + \varepsilon_p N_a)}} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_p \varepsilon_0 \varphi_0}{q N_a}} \quad (2.30)$$

nirede  $\varepsilon_n, \varepsilon_p$  n we p tipli ýarymgeçirijileriň dielektrik syzyjylygy.

Takmynan ýazgy  $N_a \ll N_g$  ýagdaýa degişlidir. Eger daşky naprýaženiýe goýulsa, onda  $\varphi_0 = \varphi_0 - U$  üýtgeýär. Ideallaşdyrylan geçişiň wolt-amper häsiýetnama (2.12) formula görnüşi bilen beýan edilýär. Real geterogeçişiň WAH – a generasiýa merkezleri, rekombinasiýa merkezleri güýçli täsir edýärler. Garyplaşan gatlakda, olaryň konsentrasiýasy uly bolmagy hem mümkindir. Bu bolsa metallurgiki çägiň golaýynda struktura d – defektleriň uly bolmagy zerarly bolup geçýär. Mundan başga-da dürli ýarymgeçirijileriň kristallik gözenekleriň doly suratda gabat gelmeýänligi bilen baglydyr. Bu ýagdaýda göni naprýaženiýede rekombinasiýa togy ýüze çykýar, emma ters naprýaženiýede – generasiýa togy.

Indi bir tip geçirijilikli ýarymgeçirijileriň arasyndaky geterogeçişlere seredeliň. 2.29a suratda p-tip geçirijilikli ýarymgeçiriji üçin, nirede

Bularyň hasabuna elektronikany, golografiýany, süýümlü optiki aragatnaşygy, fotoelektrik esbaplaryň fizikasyny, infrogyzyl we ultramelewşe ýagtylygyň tehnikalaryny gaşmaklyk ýerliklidir.

Optoelektron esbaplaryň we esbaplaryň esasynda döredilen ulgamlaryň artukmaçlygy şu aşakylardan ybarat.

1. Optiki kanalyň gaty ýokary maglumat sygymy, ýagtylyk yrgyldyşynyň ýygyllygy ( $\nu \sim 10^{13} - 10^{15}$  Gs) ulanylyan radiotehniki diapazona seredeniňde  $10^3 - 10^5$  esse köpdür. Ýatylygyň tolkun uzynlygynyň has gysga bolmagy optiki maglumatlary ýokary dykzlyk bilen ýazmaga mümkinçilik berýär.

2. Ýagtylyk signalynyň gaty kiçi burç boýunça urukdyrylan bolmagy. Bu ululyk 1' uglowoý minutdan hem kiçi bolup bilýär.

3. Ýagtylyk şöhlesini iki ugur boýunça, ýagny wagt we göwrüm boýunça modulirlemegiň mümkin çiliginiň barlygydyr.

4. Maglumat göýberilende elektrik tarapyndan neýtral fotonlary ulanmagyň mümkinçiliginiň barlygydyr.

Optoelektronikanyň ösmeginiň zerurlygy ilki bilen tranzistorlar elektronikasynyň, integral shemaly tehnikaýnyň gaty çalt depgin bilen ösmegi bilen bagly bolup, olaryň mikroelektroelektronikanyň talaplaryny doly çözüp bilmezligi bilen hem baglydyr. Meselem, elektronikanyň adaty ulanylylyan

Ondan bəri optoelektronika gaty çalt depgin bilen ösmäni dowam etdirip ylymyň we tehnikanyň uly ugryna öwrüldi. Optoelektronikanyň şeýle çalt depgin bilen ösmeginde, ýarymgeçiriji lazerleriň döredilmeginiň we olaryň giň gerimde çykarylmagynyň roly ulydyr.

Optoelektronikanyň ösleginde esasy zatlaryň biri optiki süýümlerin döredilmegidir. Ýaponiýada çüýşe wolnowodlar barada ilkinji gezek 1936 ýylda aýdylanlygyna seretmezden 1964 ýylda Seki Negisi «Fokuslenme häsiýetli optiki Liniýa» diýen potentini alýar. Esasy ösüş 1970 ýylda Amerikada kiçi ýitgili (zatuhaniýaly) kwars süýümini almagyň tehnologiýasy işlenilip düzülenden soň başlaýar.

Ilkibaşdan optiki süýümiň işlenip düzülmeginiň esasy maksady, ony aragatnaşygyň optiki ulgamynda ulanmaklyk bolup durýar. Bu bolsa öz gezeginde aragatnaşygynyň optiki ulgamynda ulanylýan süýümlü optika niýetlenen datçikleriň çalt depgin bilen ösmegine getirdi. Süýümlü optiki aragatnaşyk ulgamynda ulanylýan ýagtylyk göýberiji we duýuji esbaplaryň (lazerleriň we fotokabuledijileriň) tehnologiýasy güýçli depgin bilen ösdi.

Umuman aýdanda optoelektronika häzirki zaman ylymlarynyň ýeten derejesini umumylaşdyryp ösdürip ulanýar. Şeýle ugurlara kwant elektronikasy, gaty jisimler (has hem ýarymgeçirijiler) elektronikasy we dürli esbaplaryň taýýarlanylş tehnologiýay girýär.

$\Delta E_{31} \ll \Delta E_{32}$  we  $N_{a1} \ll N_{a2}$  enenrgetiki diagrammasy görkezilen.

Elektronlaryň potensial baryeriniň beýikligi  $p_1$  – oblastdan  $p_2^+$  – oblata geçenleriň

$$\varphi_{0n} = \varphi_{01} + \Delta E_n / q + \varphi_{02} = \Delta E_n / q + \varphi_0 \text{ bolar.}$$

Deňeşdirmek üçin 2.29b suratda gemogeçişi energetiki diagrammasy görkezilen. Geterogeçişleriň ulanylmagy esasy däl zaryad äkidijileriň potensial baryerini ulultmaga ,mümkinçilik berýär ( $p_2$  oblata geçenler)

Bu praktikada esasy däl zaryad äkidijileriň toplanmasynyň çäklendirmek üçin ulanylýar. Mysal üçin  $\text{GaAs} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$

$$N_{a1} = 10^{15} \text{ sm}^{-3}, N_{a2} = 10^{17} \text{ sm}^{-3} \text{ alarys}$$

$$\varphi_{0n} = 0.42W \text{ emma gemogeçiş üçin}$$

$$\varphi_{0n} = \varphi_0 = \varphi + \ln(N_{a2} / N_{a1}) = 0.06W .$$

Geterogeçişleriň  $n-n^+$  ,  $p-p^+$  görnüşli baryeriň beýikligi uly bolmagy şöhlelendiriji orta elektron abzallaryň parametrlerini gowulandyrmaga mümkinçilik berýär.

Bir taraplaýyn inžeksiýanyň häsiýeti p-n geterogeçişlerde güýçli garyntgy goşulan bazada bipolar tranzistorlarda ulanmak bolar. Bir tip

geçirijilikli ýarymgeçirijileriň arasyndaky  
geterogeçişler meýdan ýokary ýygýlykly  
tranzistorlary, ýokary tizlikli sanly integral shemalary  
döretmek üçin ulanylýarlar.

2. Ýagtylygyň täsiri esasynda bolup geçýän  
elektron hadysalaryň hasabyna optiki signallary  
detektirleýän esbaplar (fotodetektorlar).

3. Optiki şöhläni elektrik energiýasyna geçirýän  
esbaplar (gün fotoelementleri, fotowoltesbaplary).

Optoelektronika-ylmyň we tehnikanyň täze  
ugry bolup, optikanyň we elektronikanyň sepgitinde  
emele gelendir.

Şeýlelikde ylmyň we tehnikanyň elektrik we  
optiki esbaplaryny hem-de usullaryny bilelikde  
peýdalanylyp maglumatlary generirlemek we  
geçermeklik, gaýtadan işläp özgertmeklik meselelerini  
seredilýän, owrenilýän ugra optoelektronika  
diýilýär.

Kesgitlemä laýyklykda, optoelektronikanyň  
fiziki esasyňy elektrik signalyny optiki, şeýlede optiki  
signalyny elektrik signalyna öwüriji hadysalar,  
ýagtylyk signalynyň dürli gurşawda ýaýramak  
hadysasy hem-de ýagtylyk şöhlesiniň dürli jisimlere  
täsiiri düzýär.

Optoelektronikanyň dörän ýyly diýilip köplenç  
1955 ýyl kabul edilýär 1955 ýylda E.Loebner öz ylmy  
makalasynda optoelektron gurlyşlaryň mümkin bolan  
parametrlerini, olaryň özara gatnaşyk  
mümkinçiliklerini hem-de optiki we elektrik  
gurlyşlaryny birleşdirmegiň we izolirlemegiň  
mümkinçiliklerini, ýagny optronlaryň işleýiş  
prinsipini ýazyp düşündirýär.

## 5. OPTOELEKTRONIKA ESASLARY

Işleýiş prinsipi ýagtylyk kwantynyň-fotonyň elektrona ýa-da tersine öwrüliş bilen bagly bolan esbaplar optoelektron esbaplaryna girýärler. Optoelektron esbaplary esasy üç topara bölünýär:

1. Elektrik energiýasyny optiki şöhlä öwürýän esbaplar (ýagtylyk göýberiji diodlar, lazerler).

## 3. ÝARYMGEÇIRJI DIODLAR

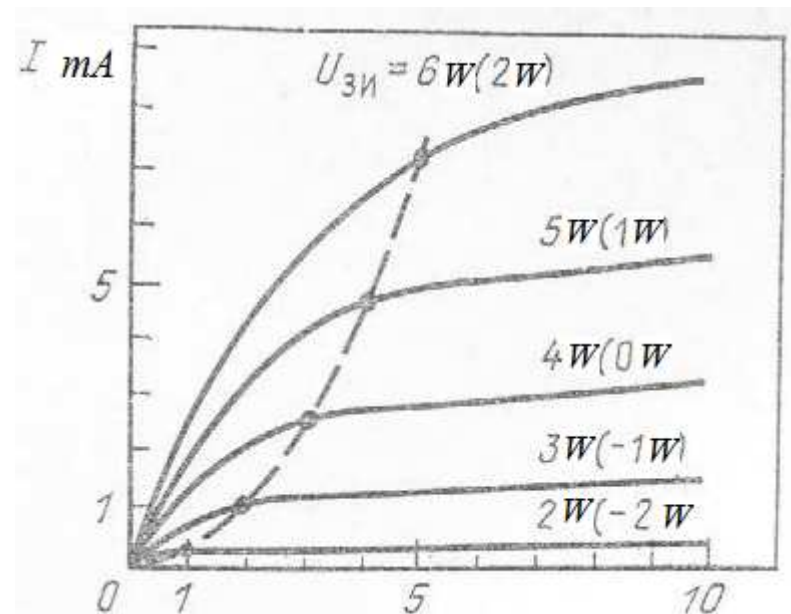
### 3.1 Umumy maglumat

Diod-elektroözgerdiji abzal bolup, düzgün boýunça bir ýa-da birnäçe geçişler we iki çykyş birikdiriji simler daşky zynjyra birikdirmekden ybaratdyr. Diodlaryň köpüsiniň işleýiş prinsipielektrik geçişde fiziki hadysalaryň ulanylmagyna esaslanandyr. Diodlarda köplenç elektron deşik geçiş, kontakt metal-ýarymgeçiriji, geterogeçiş ulanylýar. Emma diodlar bar, olaryň gurluşy göneldiji elektrini geçişlere (Ganyň diody) eýe bolmaýar, ýa-da birnäçe geçişler (mysal üçin p—i—n-diod, dinistor), ýenede has çylşyrymly gurluşly geçişli elektriki geçişle özünde ýeleşdirýär. (MDM we MDÝ diodlar). Ýarymgeçiriji diod elektriki zynjyryň elementi bolup, çyzykly däl iki polýusly, ýagny elektron abzal iki sany daşky birikdiriji simler we çyzykly däl wolt- ampe häsiýetnmalar durandyr (WAH). Ol signallary öwwümek funksiýasyny göneldiji , detektirmek,

ýygýlygy köpeltmek, ýagtylyk energiýany, elektrik energiýa öwürmek lik ýaly funksiýany ýerine ýetirýär.

Diodlaryň klassifikasiýasynda esasynda dürli häsiýetleri belläp bolar-elektrik geçişniň görnüşini (nokatlanç tekiz diodlar), geçide fiziki prosesler (tunneldiod, lawin-prolýotnyý we başgalar), signalyň energiýasyny öwürmekligiň häsiýeti (ýagtylyk diod (swetodiod), fotodiod, we ş.m.)elektrik geçişleri taýýarlamagyň (tehnologiýasynyň) usuly (eredilme, diffuzion, eptansial diodlar we başgalar). Ýarymgeçiriji abzallaryň sprawoçniginde diodlaryň klasifikasiýasyny rodioelektron apparaturalarda ulanyşy ýa-da ulanylyşy boýunça geçirýärler. Klassifikasiýa elektriki geçişleriň özgerdiji we çyzykly däl häsiýetler (göneldiji we impuls diodlar, özgerdiji pereklyuçatelnýye, warikaplar, tabilitronlar we ş.m.), ýygýlyk işleýiş diapazonlar (pesýygýlyklar, ýokary ýygýlykla, aşaaýokary ýygýlykly diodlar, optiki diapozonyň diodlary we başgalar), diod gurluşlarytaýýarlamak üçin başlangyç material (kremnili selenli, gemanili, arsenid gallikli diodlar ulanyş prinsiplerini doly suratda görkezýär.)

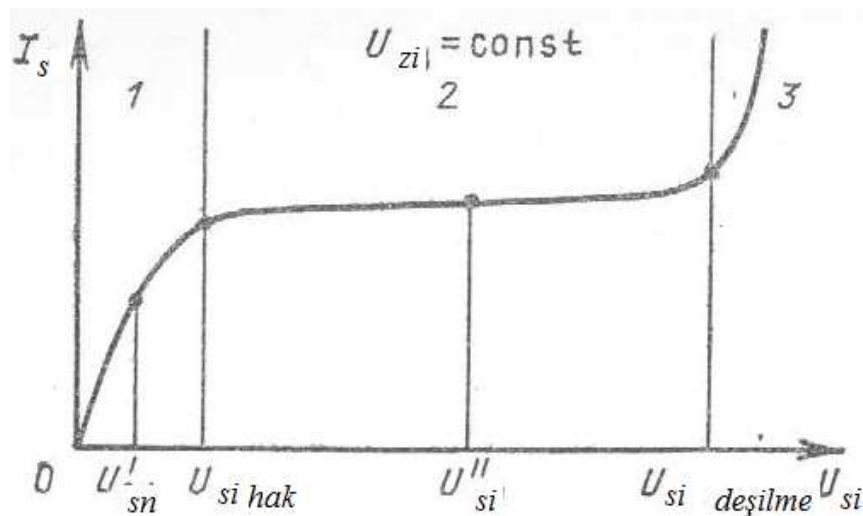
Häzirki ýarymgeçiriji diodlaryň şertleýin belginamalaryň sistemasynda olaryň ulanyşy fiziki häsiýetleri, esasy elektriki parametrleri, konstruktiv-tehnologiki häsiýetleri, başlangyç ýarymgeçiriji material görkezilýär. Bu hemme maglumatlar abzalyň elektrik geçişniň gurluşy bilen baglydyr. Real diodyň



4.7-nji surat

Häsiýetnamanyň dik oblastynda kardinat başlangyjyny golaýynda dürli burçly häsiýetnamalar ýaýraýar. Ýapgydyň tangens burçy kanalyň geçirijiligini aňladýar we zatworyň naprýeženiýesine proporsional ösýär. Häsiýetnamanyň endigan oblastynda ekwidistant däl. Uzc ösmegi bilen giriş togyň artmagy ulalar, bu bolsa degişlilikde zatworda (ýapyjyda) naprýeženiýäniň berlen artmasyna laýyk gelýär ( $U_{gc} = \text{const}$ ). Bu zatworda (ýapyjyda) zatwarka giriş toguň naprýeženiýä göre kwadratiki baglanyşygy bilen düşündirilýär.





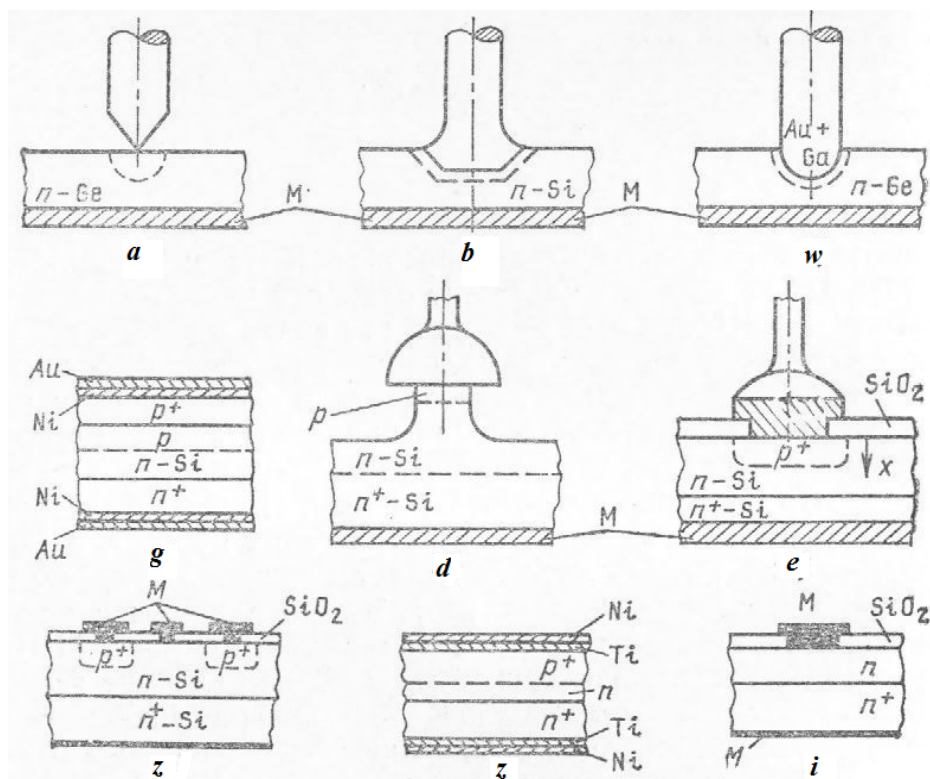
4.6-njy surat

4.7-nji suratda MDÝ tranzistorlaryň birnäçe tipiki giriş häsiýetnamalary görkezilen. Ştrihlenen çyzyklar dik oblasty endigandan aýyrýar. Skobkada getirilse Uzç bahalary gurluşkanally tranzistorlara degişlidir.

gurluşy (strukturasy) bir ýa-da birnäçe elektriki geçişleri ýerleşdirýär.

Elektriki geçişleriň konstruktiv-tehnologiki aýratynlyklary boýynça nokatlanç, mikroeredilme (mikrospławnyýe) eredilme, diffuzion, epitaksial, Sottki barýerli, polikristallik we beýleki görnüşli diodlar tapawutlandyrylýar.

Nokatlanç diodlaryň elektron-deşik geçişi ýiti metallik iňňäniň, mysal üçin, molibdenli wolgram kremniniň, germaniniň, arsenid galliniň ýarymgeçiriji kristallarynyň kontaktybilen emele getirilýär. Geçişň gurluşy (strukturasy) 3.1a suratda şekillendirilen. Gurşap alýan sredanyň häsiýeti, kristalyň üstüniň arassalygy we kontrakt almaklygyň mehaniki şertleri ýeterlik derejede diodlaryň elektriki parametrlerini we onuň wolt-amper häsiýetnamalaryny kesgitleýäler. Gatlak p-tip geçirijilikli ýarymgeçirijiniň kristalynda aksýator galýutynyň (mysal üçin indiy ýa-da alýuminiý n- tipli germanýa) termodiffuziýanyň netijesinde metallik iňňäniň uýynda uly impuls tok rakaly kontakta seplenýär. Nokatlanç diodlyň geçişiniň, gyzykly ölçegleri onuň garyplaşan oblastynyň ölçegleri bilen deňräkdir. Kontaktyň aşagyndaky p-tipiň, oblasty geometriki birmeňzeş däl we adatça onda kristallik gözenegiň köp sanly defektleri toplanan. Kontakt oblastda güýçli elektriki meýdan köp derejede ýitgi we generasiýa toguň üze çykamgyna ýardam berýär.



3.1-nji surat

Splawnoý (eredilme) diodlaryň elektron-deşik geçişiň gurluşy ýarymgeçiriji kristala n-tipe akseptor garyntgyly splawy, mysal üçin, indiy germaniýe, alýuminiý kremniýe eredilme usuly bilen emele getirilýär. Elektron geçirijilikli ýarymgeçirijilerde elektronlaryň hereketliligi 2-2.5 esse p-tip geçirijilikli ýarymgeçirijileriň hereketliliginden köpdür. Şonuň

naprýeženiýe garşylykly polýarlyga eýe bolýarlar n kanally tranzistorlar bilen deňeşdirilende.

Indusirlenen we gurluşkanally n- we p-tipli tranzistorlaryň işleýiş prinsipi we fiziki prosessler birmeňzeşdir.

### MDÝ tranzistorlaryň statistiki häsiýetnamasy. Işleýiş režimleri.

Esasy statistiki häsiýetnamasy çykyş (giriş) häsiýetnamasydyr. Umumy çykyşly shemalar  $I_g = f(U_{gç})$   $U_{zç} = \text{const}$  bolan halatda (surat 5.4.) Häsiýetnamada dik 1, endigan 2 we deşilme 3 oblastlary tapawutlandyryrmak bolar.

Uly uzynlykly kanally tranzistorlarda naprýeženiýe duwwara geçýär we lawin deşilmäniň giriş p-n geçişiň naprýeženiýesinden ýokarydyr. Şonuň üçin 3-nji bölekde lawin deşilme bolup geçýär we duwwara beklenme amala aşmaýar.

Indusirlenen n-tipli kanally tranzistorlar üçin (5.2.a) we p-tipli (5.2.b) çykyş-giriş zynjyr ştrihlenen çykyşlar bilen şekillendirilen, gurluşly kanally n-tipli tranzistorlar üçin (5.2.b) we p-tipli (5.2.g-tutuşlaýyn).

Elektron tipli kanally tranzistorlar üçin (5.2.a,b) strelka p-tipli podložkadan kanal tarapa ugrukdyrylan, p-tipli kanally tranzistorlar üçin (5.2.a,b,g) strelkanyň ugrukdyrylan garşylykly tarapa. Birnäçe diskret tranzistorlar podložkanyň çykyşy II, goşmaça elektrod hökmünde ulanmaga eýe bolýarlar (ikinci zatwor). Tranzistorlarda n-tipli kanally çykyşa girişe otnositellikde položitel naprýeženiýe berilýär  $U_{çг}$ , bu ýagdaýda, eger kanal bar bolsa, onda elektronlar çykyşdan kanal arkaly girişe tarap hereket edýärler. MDÝ tranzistoryň zatworyna islendik porýarly naprýeženiýani berip bolar, sebäbi zatwor kanaldan dielektriki gatlak bilen izolirlenen.

Emma indusirlenen kanally n-tipli tranzistor  $U_{zç} < 0$  bolanda mydama ýapyk we dolandyryjy položitel naprýeženiýede  $U_{zç}$  açylýar. P-tipli podložkanyň çykyşyna diňe otrisatel naprýeženiýe berip bolar  $U_{nç}$  girişe otnositellikde bu bolsa p-n geçişin, giriş-podložka ters naprýeženiýesine degişlidir. Çykyş podložka geçişik göni birikdirilmesi bolmaýar, sebäbi goşmaça dolandyryjy elektrodyň zynjyrynda uly tok ýüze çykýar. Birikdirijisi bolmadyk podložkaly tranzistorlarda ol çykyş bilen birikdirilýär. Kanaly p-tipli tranzistorlarda işçi

üçin birmeňzeş elektrikgeçirijilikli ýarymgeçirijilriň n-we p-tipiniň kristalda- bazada donorlaryň konsentrasiýasyny azaltmak we şonuň bilen birlikde geçişin probiwoý naprezeniýesini ýokarlandyryp bolar. Şular ýaly nuktaý nazara salgylanyp, ýarymgeçiriji kristalyň elektron geçirijilikli baza hökmünde diodlarda saýlamak amala aşyrylýar.

Kremniý eredilme diodlar taýýarlanylanda (geçişin strukturasy 3.1b suratda getirilen) kremnä 600-700°C temperaturada inçe alýuminiý simjagaz eredilýär. Splawyň ýerinde alýuminiý bilen baýlaşdyrylan ýuka täzedden (rekristallizowan) kristallaşan şol bir kristallik strukturaly kremniniň gatlagy emele gelýär, ýagny başdaky ýarymgeçiriji emma p-tip geçirijilikli. Täzedden kristallaşan gatlak (galyňlygy birnäçe mikrometr) bilen monokristalyň arasynda p-n geçiş emele gelýär, geçişoň çägi suratda çyzykly ştrihlenen.

Eredilen diodlaryň elektron deşik geçişleri rezkiý we basgançaklydyr. Olar 10-ça amper çenli göni tok göýberýärler.

Geçişleriň meýdanynyň ulylygy sebäpli olaryň sygymy otnositellikde ulydyr. Mikroeredilme diodlarda p-n geçişleriň meýdany nokatlanç diodlar biilen deňeşdirilende ulydyr. Altyn bilen baglanyşykly mikroeredilme diodlaryň elektrik geçiş (surat 3.1W) germaniniň kristalynda inçe altyn simjagazy we uýynda galliý birlikde mikroeredilme usuly bilen

taýýarlanylýar. Kontaktyň aşagynda täzedden kristallaşan germaniniň p-tip geçirijilikli gatlagy emele gelýär.

Diffuzion diodlarda elekriki geçiş ýarymgeçirijiniň kristalyna donorlaryň we akseptorlaryň garynkylaryny dokal diffuzion ýa-da umumy usul boýunça taýýarlanylýar. Diffuziýany bir gezek ýa-da köpgezek geçirmek bolar. Mysal üçin kremniniň elektrik geçişiniň strukturasyny (surat 3.1,2)  $p^+p-n-n^+$  tipini umumy köp gezek diffuziýa uslynyň kömegi bilen taýýarlanylýar. Kremniniň p-tipiniň oblasty akseptor garyntgy – alýuminiň diffuziýasy kremniý plastinka n- tipli, emma oblast  $n^+$ -tip şol plastina donor garyntgysy fosforyň diffuziýasy bilen amala aşyrylýar,  $p^+$  oblasty almak üçin bory p-oblasta ikinji diffuziýa geçirilýär. Omiki kontaktlar  $p^+$  we  $n^+$  oblasty strukturalar üçin Ni (nikel) himiki çökdirilme usuly bilen taýýarlanylýar, soňra galwaniki altyn çäýylýar.

Germanili diffuzion diodlar taýarlanylanda p-tip geçirijilikli germaniý plastinasy saýlanyp alynýar, sebäbi donor garyntgylar akseptorlar bilen deňeşdirilende germanide gowy diffuzirlenýär.

Diffuzont hökmünde surma ulanylýar. Elektron oblastly diffuzion gurluşyň omiki kontaktyny emele getirmek üçin galaýyly pripoý surma prisadkaly ulanylýar. Omiki kontakt p-oblastly germaniý üçin bu oblasta eredilen indiý berýär. Ýokaryýyglykly

Eger gatлага 6 donor garyntgy girizilen ýagdaýda geçiriji kanal zatworda nul naprýeženiýede emele gelýär, emma porogowyý naprýeženiýede otrisateldir. Bular ýaly abzallar kanalgurluşly kanallar diýip atlandyrylýar.

Indusirlenen tranzistorlaryň we kanalgurluşly tranzistorlaryň gurluşlarynyň tapawudy ýeterlik derejede şertleýindir.

Prinsipial taýdan şol bir gurluşlarda indusirlenen, şonuň emma üst zarýadyň dürli položitel bahalarynda Qüst: Qüst az bahalarynda indusirlenen, uly bahalarynda – gurluşly.

Strukturalaryň ähmiýetli geometriki ölçegleri: (surat 5.1.) kanalyň uzynlyk L, we ini “b” we zatworyň aşagyndaky dielektrigiň galyňlygy strukturanyň esasy elektrofiziki parametrleri tranzistoryň häsiýetnamasyny we parametriki kesgitleýji podložkada garyntgylaryň konsentrasıýasy Ng, 6-njy gatlagyň garyntgy girizilmesiniň dozasy Ng zatworyň aşagyndaky dielektrigiň dielektriği syzyjylygy  $E_0E_1$ , üst zarýadyň, dykzlygy Qüst we kanalda elektronlaryň hereketliligi  $\mu_n$ . Garyntgy girizilmegiň dozasy – garyntgynyň atomlarynyň sany, ýagny bir üst birliğı arkaly ( $1/\text{sm}^2$ ).

MDÝ tranzistorlaryň bellenişi, olaryň birikdirilişi umumy çykyşly upolýarly işçi naprýeženiýeleriň shema boýunça 5-2 suratda getirilen.

aýdylanda kanalyň uzynlygy  $L$  diýip atlandyrylýar, birnäçe mikrometre çenli bolup biler. Gurluş obratima, ýagny islendik oblastlaryň 2 we 8 çykyş ýada giriş hökmünde ulanyp bolar. Ýarymgeçirijiniň üstünde dielektriki gatlak döredilen 4 galyňlygy  $d_d=0,05 \div 0,1$  mkm, dielektrik hökmünde adatça  $\text{SiO}_2$  (kremniň dioksidi) ulanylýar. Dielektrigiň ýuka gatlagyna metallic elektrod 5 çaýylýar. Metallik gatlaklar 3 we 7 çykyşyň we girişiniň çykyş birikdiriji simlerini emele getirýär.

Üst gatlag 6 galyňlygy 0,1 mkm ion usula bilen garyntgy girizilýär, tipi we konsentrasiýasy porogowyý naprýeženiýaň bahasy we belgisini kesgitleýär.

Porogowyý naprýeženiýe düşünje MDÝ tranzistoryň we ýönekeý MDÝ gurluşlaryň biri-birine gabat gelýär. Zatwor-çykyş naprýeženiýede porogowy naprýeženiýeden ýokary zatworyň aşagynda gatlakda 6 geçiriji kanal emele gelýär. Polložka otnositellikde inwersnyý n-nipli gatlak çykyş oblasti giriş bilen birikdiriji. Eger gatlak 6 akseptor garyntgy girizilen bolsa, onda porogowyý naprýeženiýe položitel bolýar. Onda naprýeženiýanyň nul bahasynda geçiriji kanal zatwor-çykyş giriş we çykyşyň arasynda bolmaýar. Çykyşa otnositellikde zatwora (ýapyjy) položitel naprýeženiýe berilende porogowoýdan ýokary kanal indusirlenýär. Bular ýaly tranzistolar indusirlenýän kanally tranzistorlar diýip atlandyrylýar.

diffuzion diotlarda p-n geçişiniň sygymyny azaltmak üçin çuňňur himiki trawleniýe usuly bilen alynýan mezostruktura ulanylýar. Netijede birinji umumy diffuziýada  $n^+$ -Si gatlak n-tip geçirijilikli kristalda döredilýär. Ikinji umumy diffuziýadan soň kremniý kristalynda p-gatlak, omiki kontaktyň emele gelmegi we kristalyň aýratyn meýdanlaryny guramak maska arkaly (kislotalarda) onuň üstün guralmadyk meýdançalaryny trawleniýe bilen amala aşyrylýar. Netijede p-n geçiş kristalyň omiki kontaktyň aşagynda uly bolmadyk meýdançada galýar. Kristalyň üstünde meýdançalar stol gönüşde ýokary çykýar (mezo-isanço). Alnan p-n geçişiniň diametri kislotalarda iýdirilenden soň birnäçe onlarça mikrometre çenli azalýar. Diffuzantyň konsentrasiýasy çuňluk boýunça. Diffuziýada garyntgylaryň deňölçegli däl paýlanyşy koordinat ugry boýunça kristaly üstüne perpendikulýar alynýar. Şonuň üçin diffuzion diodlaryň (tekiz, endgan p-n geçişli bazada togtadyjy elektrik meýdany emele gelýär.

Epitaksial (planar, epitaksial planar) diodlar epitaksiýa we lokal diffuziýany ulanmak bilen taýýarlanylýar.

Monokristallik gatlagy podlozkanyň üstüne ösdürip ýetişdirmek prosessine epitaksiýa diýilýär. Strukturalarda esasy konstuksiýa hökmünde ulanylýar. Ösdürilip ýetişdirilen gatlakda podloznanyň oriýentasiýasyny saklanýar. Epitaksiýa diýilýär.

Strukturalarda esasy konstuksiya hökmünde ulanylýar. Ösdürilip ýetişdirilen gatlakda podlozkanyň oriýentasiýasy saklanýar. Epitaksiya islendik tip geçirijilikli we udel garşylykly galyňlygy birnäçe monometr gatlaklary ösdürip ýetişdirmäge mümkinçilik berýär. Emma p-n geçiş köplenç ýagdaýlarda epitaksial gatlag garyntgy atomlaryň maksada aýna arkaly diffuziya bilen döredilýär (mysal üçin kremniniň oksidinder, 3.1,b surat). Omiki kontaktlar kristalyň p+ we n+ oblastly metallaşdyrmak operasiýasy bilen döredilýär. Kremniý diodlarda omiki kontakt üçin alýuminiý giňden ulanylýar.

Planar ýa-da planar-epitaksial diodlar "üst" struktura eýe bolýar, kontakt oblastlaryň çykyş birikdiriji simler elektrik geçişiniň bir tekizlikde ýerleşýär. Elektriki geçiş kristalyň üst gatlagynda döredilen galyňlygy 1 we 10 mikrometr onuň, üstünden (3.1 surat). Kremniniň  $n^+$  tipiniň podlozkasyna struktura taýýarlanylanda epitakseal gatlak n-tipli ösdürilip ýetişdirilýär. Soňra goraýjy maskanyň aýnasy arkaly oksid kremniýlen onda birnäçe bor tarapdan diffuziýalanan  $p^+$  oblastlar emele gelýärler, şondan soňra umumy baza we emitter oblastlardan çykyş simleriniň metallaşdyrmagy amala aşyrylýar. Şeýlelikde, matriçnyý planar-epitaksial gurluş taýýarlanylýar.

Diodyň elektriki geçişlerini ion-şöhle usuly bilen taýýarlamak giň gerim alýar. Ion inýolaktasiýada

eger  $R_{gir} \gg R_{gen}$ , niredede  $R_{gen}$ - generatoryň çki garşylygy. Tok bilen dolandyrylýan abzallarda giriş garşylygyň azlygy sebäbli giriş tok abzalyň parametrlerine gowşak baglydyr we generatoryň giriş signalynyň togy bilen kesgitlenilýär ( $R_{gir} \gg R_{gen}$ ).

Häzirki wagtda has giňden ulanyş zatwory (ýapyjysy) izolirlenen tranzistorlar tapýarlar, iň esasy mikroelektronikada özleşdirilen MDÝ tranzistorlar kremniý esasyndaky integral shemalarda giňden ulanylýar, esasanam aşa uly: mikroprosessorlarda, mikro EWM, electron kalkulýatorlarda uly informasion sygymly ýatlaýjy gurluşlarda medisina elektronikada giňden ulanylýarlar.

### **Zatwor (ýapyjysy) izolirlenen tranzistorlar (MDÝ - tranzistorlar), Gurluşy we işleýiş prinsipe.**

n kanally MDÝ tranzistorlaryň gurluşy suratda görkezilen. Tranzistorlar örän az garyntgy girizilen p-tipli kremniý podložkada akseptorlaryň konsentrasiasy  $10^{15} \text{sm}^{-3}$  materialda döredilýär.

Podložkanyň üstüniň golaýynda donor garyntgylaryň diffuziýasynyň usuly ýada ion garyntgy girizilmegi bilen güýçli garyntgy goşulan çykyş 2 we giriş 8 oblastlar  $n^+$  tipli galyňlygy takmynan 1 mkm, donorlaryň konsentrasiasy olarda  $10^{19} \text{sm}^{-3}$  hem ýokary emele getirilýär. Güýçli garyntgy goşulan çykyş we giriş oblastlaryň arasyndaky aralyk, başgaça

zarýad äkidijileriň sanyny, mundan başgada kanaldaky togy üýtgedýär.

Meýdan tranzistorlaryň kanalyň tip geçirijiligi bilen hem tapawutlandyrmak bolar: tranzistorlar p- we n- tip kanally.

Hemme meýdan tranzistorlar üçin, zatworyň zynjyrynda örän az tok bolmagy mahsusdyr, sebäbi zatwor ýada izolirlenen ýa-da ters ugra birikdirilýän kanal bilen dolandyryje giriş emele gelýär. Sebäbi zatwor (ýapyjy) elektriki shemalarda giriş elektrody bolup hyzmat edýär, onda meýdan transistor göni tokda ( $10^9$ - $10^{10}$  Om) ýokary giriş garşylyga eýe bolýar. Meýdan tranzistorlary iň ähmiýetli tapawudy bipolar tranzistorlardan şundan ybaratdyr, giriş zynjyryda (bazaly) göni naprýeženiýede emitter-baza geçirde ýeterlik derejede tok akýa. Şonuň üçin bipolar tranzistorlarda **giriş garşylyk** örän azdyr (10-ça we ýüzlerçe Om) umumy emitter we bazaly shemalarda ÝE we UB.

Giriş garşylyklaryň tapawutlanmaklary sebäpli käwagtlar meýdan transistor – bu naprýeženiýe bilen dolandyrylýan (elektriki meýdan tarapdan) abzal, emma bipolar – tok bilen dolandyrylýan abzal diýilýär. Naprýeženiýe bilen dolandyrylýan abzallarda naprýeženiýe abzalyň giriş elektrodynda giriş garşylygyň  $R_{gir}$  ýokary bolmagy sebäpli praktiki taýdan abzalyň özüniň parametrlerine bagly dälir we giriş signalyň generatorynyň EHG bilen kesgitlenilýär,

ýarymgeçiriji plastina garyntgy girizmek (logikowaniýe) ýokary energiýa çenli tizlenmeli garyntgynyň ionlary tarapyndan bombardirlenmegi sebäpli amala aşyrylýar. Implaktirlenen gatlakda garyntgylaryň konsentrasiýasy ion şöhlede toguň dykzlygyna we ekpezisiýa wagta baglydyr. Prosessiň ýokary derejede gözegçilik edilmegi we pes temperatura diody taýýarlamakda islendik stadiýa prosesinde ion implaktasiýany geçirmeklige mümkinçilik berýär. Ýarymgeçirijide ionlaryň aralaşmagynyň çuňlugy olaryň energiýasyna baglydyr. Ionlaryň energiýasyny üýtgedip, çuňluk boýunça garyntgylaryň paýlanyşynyň çylşyrymly kanunyny üpjün etmek bolar. Ion-şöhle usuly bilen döredilen diodyň elektrik geçişiniň strukturasy 31.1z suratda getirilýär. Kremniň n+ tipiniň podloznasynda epitaksial n-gatlak ösdürilen, onda ion implantasiýanyň kömegi bilen p-oblast döredilen. Ýarymgeçiriji platsinanyň iki tarapyna ilki bilen tutan, soňra nikel himiki çökdürilme bilen alynýar.

Şottki barýerli diodlar (3.1 i surat) köplenç ýagdaýlarda wakuum sredada kristalyň arassalanan üstüne metallaryň çäýylmasy ýarymgeçirijä metallary himiki çökürme ýa-da metallaryň ýokary ýygyllykly ion bugarmasynyň kömegi bilen taýýarlanylýarlar. Podlozka hökmünde kremniý arsenid galliý ulanylýarlar.

Geçişiň elektriki häsiýeleri saýlanyp alynan metal-ýarymgeçirijiler jübütlere baglydyr. Kontaktirleýji metal hökmünde alýyminiý altyn, molibden we başgalar ulanylýarlar. Tekiz diodlardan bagada kombinirlenen gurluşlar (epitaksial-diffuzion, diffuzion eredilme, mezosplawnyýe we ş.m. ) giňden ulanylýar.

### 3.2 Göneldiji pesýygylykly diodlar

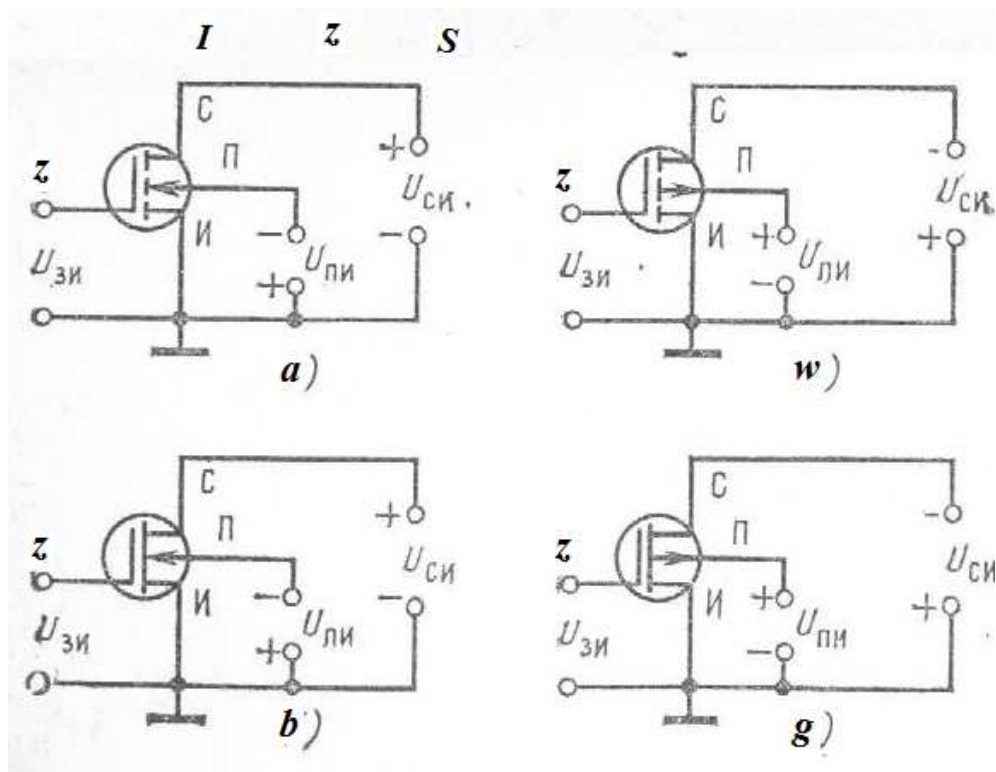
Göneldiji diodlaryň işleýiş prinsipi elektrik geçişiň birtaraplaýyn geçirijiligine esaslanandyr. Üýtgeýän togy birpolýarly pulsirleýjä öwürmek üçin ulanylýarlar. Has giňden ulanylýan kremniý, germenili diodlar Şottki barýerli.

Göneldiji diodlar pesýygylykly ýa-da güýçli diodlardan ybaratdyr. Olar, esasan, tok çeşmesiniň göneldijilerinde we azkuwwatly ýokaryýygylykly diodlara bölünýärler. Göneldiji toguň güýji boýunça diodlary tapawutlandyrýarlar. Olar kiçi ( $I_g \leq 300mA$ ), orta ( $I_g \leq 10A$ ) we uly ( $I_g \geq 10A$ ) kuwwatlylara bölünýärler.

Fiziki gurluşlary we kanalyň geçirijiligini dolandyryş usuly boýunça meýdan tranzistorlaryň üç dürli görnüşlerini tapawutlandyrmak bolar. Zatwor (ýapyjy) bilen izolirlenen meýdan tranzistorlarda metallic zatwor we kanal arasynda ýerleşen dielektrigiň gatlagy metal-dielektrik – ýarymgeçiriji (MDÝ) gurluşy (strukturasyny) emele getirýär. Şonuň üçin şular ýaly tranzistorlara MDÝ tranzistorlar diýip atlandyrylýar. Keseleýin elektrik meýdan dielektrigiň ýuka gatlagy arkaly geçip, kanalda zarýad äkidijileriň konsentrasiýasyny dolandyrýar. Dolandyryş geçişli meýdan tranzistorlarda zatworyň ýapyjy metal-ýarymgeçiriji metallik elektrody kanalyň gatlagyň üst golaýy bilen göneldiji kontakt emele getirýär we işçi režimden ters naprýeženiýe berilýär. Ol kontaktyň garyplaşan gatlagyň galyňlygyny üýtgedýär, şonuň bilen birlikde, kanalyň geçiriji böleginiň galyňlygyny, zarýad äkidijileriň mukdaryny we onuň üstünden akýan togy dolandyrýar.

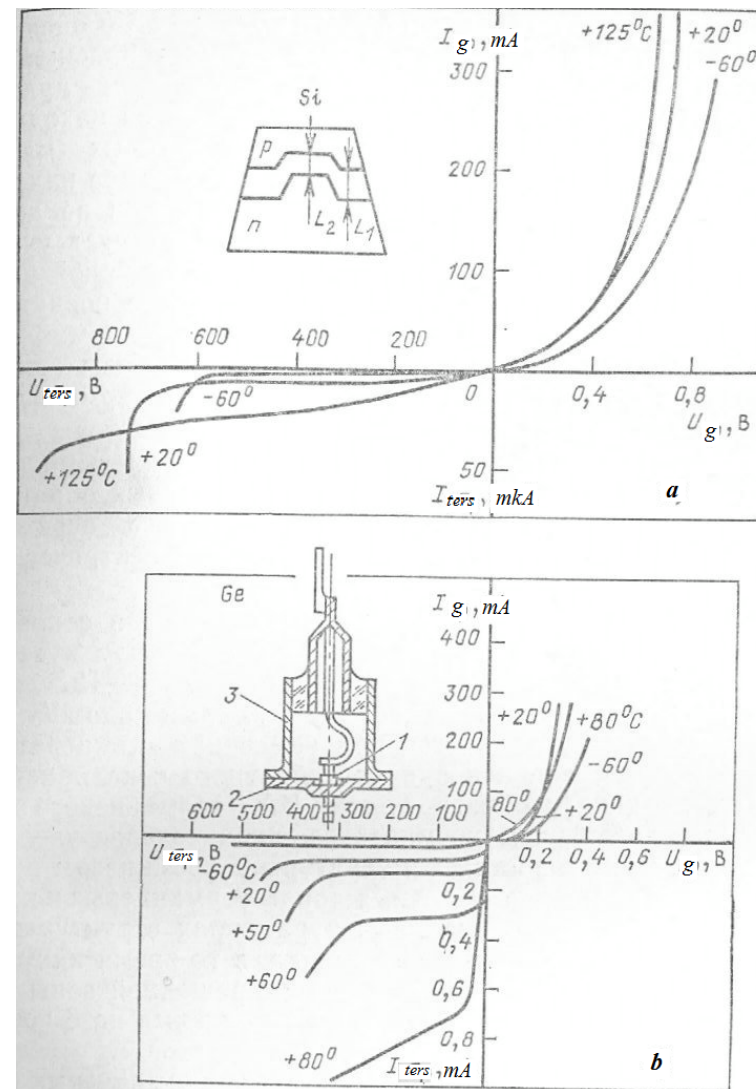
Elektron-deşikli geçişli dolandyryşly meýdan tranzistorlarda zatwor (ýapyjy) hökmünde kanala otnositellikde garşylykly tip geçirijilikli oblast ulanylýar, onuň bilen p-n işçi režimde geçiş emele getirýän ters birikdirilişe eýe bolýar. Zatworda (ýapyjyda) naprýeženiýe dolandyryjy p-n geçişiň garyplaşan gatlagyň galyňlygyny we şonuň bilen birlikde kanalyň geçiriji böleginiň galyňlygyny,





4.5-nji surat

Meýdan tranzistorlaryň gurluşlarynyň örän dürli-dürlidir. Gurluşlaryň köpüsinde kanal az garyntgy goşulan ýuka gatlakdan ybaratdyr, bu gatlak ýa-da gös-göni ýarymgeçirjiniň üstünden ýaly üstden birnäçe aralykda oňa parallel ýerleşen bolýar. Şeýlelikde, zaryad äkidijiler üstüň boýuna tarap hereket edýärler. Giriş we çykyş adatça güýçli garyntgy goşulan oblastlardyr.



3.2-nji surat

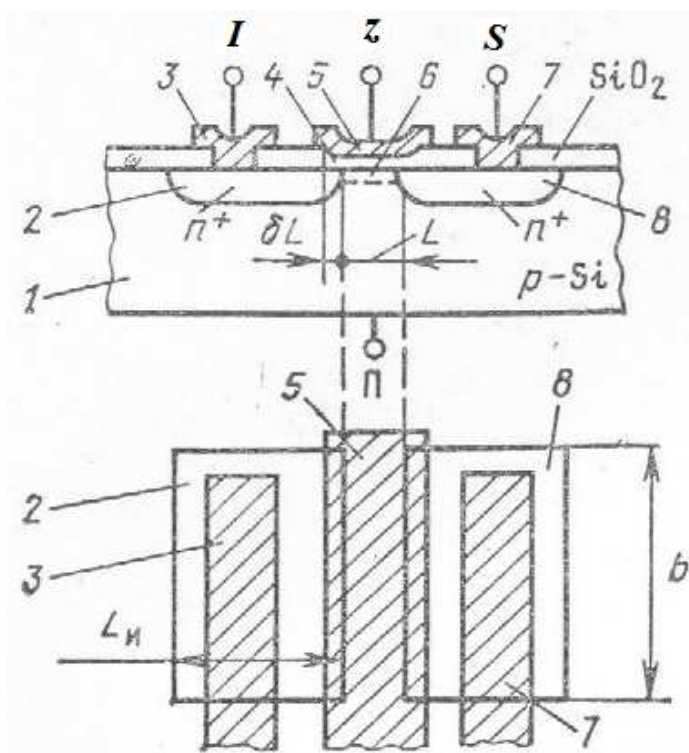
Kremniniň, germaniniň diodlarynyň wolt-amper häsiýetnamalary sredanyň dürli temperaturasy üçin 3.2a we b suratda degişlilikde geçirilen. Wolt-amper häsiýetnamalaryň deňeşdirilmegi birmeňzeş tokda naprýaženiýanyň göni peselmegi  $U_g$  germanili diodlarda 1,5-2 esse azdyr. Kremniý diodlardan we degişlilikde dioddan bölünip çykýan kuwwat azdyr. Diodda WAH-yň göni şahasyna temperaturanyň täsiri naprýaženiýanyň göni peselmesiniň temperatura koeffisiýenti bilen baha berilýär.

$$\alpha = \partial U_g / \partial T$$

Kremniý we germaniý esasynda diodlarda 1,2-3mW/graf predeller bolýar. Belli bir örän az göni toklarda diod arkaly (takmynan 1-2 mA)  $p-n$  geçişde naprýaženiýanyň pese gaçmasy, şonuň bilen birlikde diodda hem azalýar. Uly göni toklarda göni naprýaženiýanyň üýtgemegini diodyň bazasynyň garşylygynyň temperatura baglylygy sebäpli göz öňünde tutulmalydyr. Temperaturanyň ösmegi bilen erkin zarýad äkiriileriň hereketliligiň üýtgemegi diodyň bazasynyň garşylygynyň ulalmagyna getirmegi mümkin we  $U_g$  ulalmagyna, mysal üçin germaniý diodlarda getirýär (3.2,b surat).

Kremniden taýýarlanylýan diodlar germanili diodlar bilen deňeşdirilende az ters toklara birmeňzeş ters naprýaženiýede  $U_{ters}$  we elektrik geçişin

ýapyjy) we çykýan aralygyna naprýeženiýe goýulanda ýüze çykýan elektriki meýdan kanalyň geçirijiligini üýtgedýär, diýmek, kanal arkaly geçýän togy hem üýtgedýär. Bu dolandyryjy elektriki meýdan zarýad äkidijileriň hereketiniň kanalda perpendikulýar ugrukdyrylan we keseligine ugrukdyrylan meýdan diýip atlandyrylyp bilinear. Kanalda boýuna ugrukdyrylan elektrik meýdanyň täsiri astynda zarýad äkidijiler çykyşdan giriş tarapa hereket edýärler (kanalyň boýuna ugrukdyrylan), ýagny meýdan giriş we çykyş arasyndaky naprýeženiýe tarapdan döredilýär.



4.4-nji surat

Tranzistorlarda diňe bir beligili zarýad äkidijileriň hereketi ulanylýar (esasy zarýad äkidijiler), ýagny giriş kanal arkaly çykyş tarapa hereket edýärler. Şonuň üçin giriş atlandyrylmagy, ýagny çykýan oblastlar (çykýan) zarýad äkidijiler, we girýän – oblast ýagny bu oblastda girýän. Zatwor (ýapyjy dolandyryjy elektroddan ybaratdyr Zatwor

ölçeglerinde ýene-de elektrik deşilmäniň has uly ters naprýaženiýesine 1000-1500W eýe bolýarlar.

Kremniý diodyň  $I_{ters}$  togy geçişde, esasanam, zarýad äkidijileriň generasiýa togy we ýitgi togy bilen kesgitlenilýär, temperaturanyň 8-12°C köpelmegi iki esse ulalýar, emma germanili diodyň  $I_{ters}$  – ýylylyk togy bilen  $I_0$ , temperaturanyň 8-12°C üýtgemegi iki esse ulalýar. Ters toklaryň tebigatyndaky tapawutlar WAH germaniý diodyň ters şahasynyň çapgydy has gowşak, kremniniňki bilen bilen deňeşdirilende baglanyşyga getirýär. Kremniý diodlarda temperaturanyň ulalmagy tok ýitgisiniň has ýokary ulalmagy germanili we kremnili diodlarda geçişleriň strukturalarynyň birmeňzeş parametrlerinde diňe 1,5÷2 esse ösmegine getirýär, şol bir özünde germaniniň we kremniniň dürli gadagan zonaly bolanlygy sebäpli  $I_0$  tokla  $C$  esse tapawutlanmalydyr.

Kremnili we germanili diodlarda elektrik proboý (deşilme) adatça lawin bolýar. Emma germanili diodlarda ol birbada ýylylyk deşilmä geçýär. Şonuň üçin germanili diodlar adatdan daşary duýgur has-da gysga wagtdlaýyn impuls peregruzkaly. Temperaturanyň ulalmagy bilen deşilme naprýaženiýe  $U_{prob}$  kremnili diodlarda ösýär, emma germanilide azalýar. Ýokary temperaturada zarýad äkidijileriň ýylylyk generasiýasy germanide ters toguň güýçli ösmegine  $I_{obr}$  we diodyň göneldiji häsiýeti birden erbetleşýär. Kremniý diodlaryň işleýşiniň temperatura

diapazony  $-60 \div +125^\circ\text{C}$ , germaniý diodlaryň  $-60 \div +850^\circ\text{C}$ .

Üst deşilmäni aýyrmak üçin kremniý diodda geçişiň galyňlygyny  $L_1$  (3.2.a, surat) kristallyň gyrany böleginde merkezi bölegindäki galyňlyk bilen deňeşdirilende  $L_2$  ulaldýarlar. Geçişiň merkezi bölegi boryň (Br) diffuziýasy, emma gyraky bölegi alýuminiý diffuziýasy bilen emele getirilýär. Boruň we alýuminiýiň diffuziýalarynyň koeffisiýentleriniň dürliligi sebäpli kremnide kristalyň gyraky böleginde garyntgylaryň kontsentrasiýalarynyň gradiýenti az, emma galyňlyk  $L_2 \geq L_1$ . Şonuň üçin deşilme naprýaženiýesi kristallyň üst ýagdaýyna bagly däl. Mundan başga-da iýji kislotalaryň kömegi bilen kristallyň gýralaryny ýapgyt edýärler, bu bolsa kristallyň üstüne çykýan geçişiň garyplaşan oblastyň ölçeglerini ulaldýar we goşmaça üst deşilmäniň mümkinçiligini azaldýar.

Germanili diodlar n – germaniniň kristalyna indiki eredilme usuly bilen taýýarlanylýan  $p-n$  geçişden ybaratdyr. Kremniniň we germaniniň diodlarynyň elektriki geçişleriniň strukturalary 3.1,g suratda şekillendirilen. Kremniý kristalyna umumy diffuziýasy bilen amala aşyrylýar.

Şottki barýerli diodlar WAH-sy has ýakyn ideallaşdyrylan  $p-n$  geçişiň häsiýetnamasyna we az naprýaženiýa  $U_g$  eýe bolýarlar. Şottki barýerli diodyň strukturasyny 3.4 suratda getirilen. Kremniniň

## 4.2 Meýdan tranzistorlary

### Umumy maglumatlar.

Meýdan tranzistorlar özünde üç sany ýarymgeçiriji şol bir tip geçirijilikli oblastlary ýerleşdirýär we degişlilikde çykýan kanal, girýän hem dolandyryjy elektrod –zatwor (ýapyjy) diýip atlandyrylýar.

$U_{k\varepsilon}$  emitter elektroda otnositellikde hasaplanylýar, umumy giriş (baza) we çykyş (kollektor) zynjyrlar üçin. Şunlukda

$$I_B = I_\varepsilon - I_k \ll I_k (I_k \approx I_\varepsilon),$$

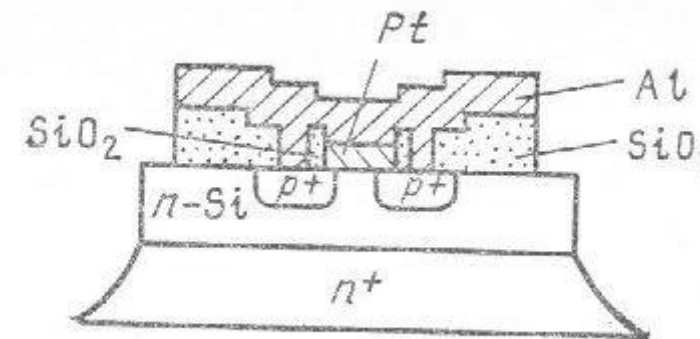
Onda bu shema toguň güýçlenmegini üpjün edýär ( $\Delta I_k \approx \Delta I_B$ ) we naprýaženiýany ( $\Delta U_{kB} > \Delta U_{B\varepsilon}$ ). Mundan başga-da onuň giriş garşylygy

$$\Delta U_{B\varepsilon} / \Delta I_B = (\Delta U_{B\varepsilon} / \Delta I_\varepsilon) (\Delta I_\varepsilon / \Delta I_B)$$

umumy bazaly shemanyň giriş giriş garşylygyndan köpdür.

Umumy kollektorly shemada naprýaženiýe bazada  $U_{Bk}$  we emitterde  $U_{\varepsilon k}$  kollektora otnositellik hasaplanylýar – umumy elektrodyň giriş (baza) we çykyş (emitter) zynjyrlar üçin. Şunlykda  $I_B \ll I_\varepsilon$ , onda bu shema toguň güýçlenmegini üpjün edýär ( $\Delta I_\varepsilon \gg \Delta I_B$ ), takmynan umumy emitter shemasy ýaly. UB we Uε shemalardan tapawutlylykda umumy kollektor (OK) naprýaženiýanyň güýçlenmesini üpjün edýär. Onuň artykmaçlygy onuň uly giriş garşylygy, ýagny nagruzoçnyý rezistoryň garşylygy ulalanda emitteriň zynjyrynda ulalýar.

kristalynda  $n^+$  tip geçirijilikli ýuka epitaksial gatlak emele getirilýär.



3.3-nji surat

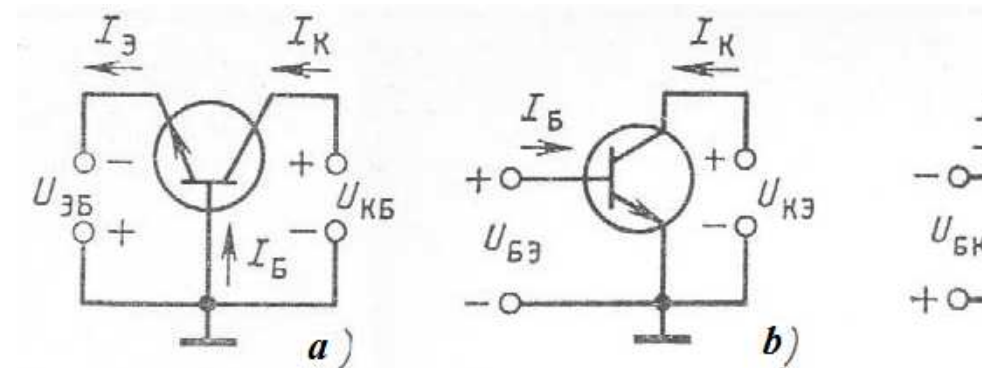
Epitaksial  $n$  – gatlakda lokal diffuziýanyň usuly bilen çuň bolmadyk goraýyş halka  $p^+$  - tipli oblast taýýarlanylýar. Şol usullaryň biri (wakuum bugarma, ýokaryýyglykly ion bugaryjysy argonyň atmosferasynda, elektrolitiki erginlerde himiki çökdürilme we başgalar) epitaksial gatlag altyndak, wolframik molibdenden, latinaban we beýleki metallardan metalliki gatlak çaýylýar. Ol epitaksial gatlak bilen metall-ýarymgeçiriji göneldiji kontakt emele getirýär. Ýarymgeçirijiniň üstünde SiO<sub>2</sub> dielektriki gatlagy ösdürilip ýetişdirilýär we diodyň alýuminiý anod çykyş birekdiriji sim düzülýär (metallik kontaktdan we goraýyş halkaň  $p^+$

oblastyndan). Katod çykyş kristallyň  $p^+$  oblastynyň omiki kontaktyň kömegi bilen amala aşyrylýar.

Garaýyşsyz halkaly strukturada metal-ýarymgeçiriji kontaktyň gýralarynda elektrik meýdanyň güýjenmesi ýokarlandyrylan (gyraky effekt). Şonuň üçin diodda ters naprýaženiýede tok ýitgisi ýüze çykýar, emma  $U \approx 50W$  bolanda üst deşilmesi ýüze çykýar. Garaýyş halkanyň ters süýşürilen geçişinde meýdan az naprýaženiýa eýe bolýar, şonuň üçin gyraky effekt köp gezek gowşadylan bolýar. Häzirki diodlarda garaýyş halka inžektirlenmedik geterogeçişler görnüşinde ýerine ýetirilýär (§2.10 seret). Geterogeçiş diňe tok ýitgisini azaltman we diodda maksimal mümkinçilik bolan ters naprýaženiýany ulaltmak, eýsem epitaksial gatlagyň galyňlygyny peseltmäge, kristalyň göwrüm garşylygyny azaltmaga we güýçli garyntgy goşulan diodlarda az göni naprýaženiýeleri gazanmaklyga mümkinçilik berýär.

Metal-ýarymgeçiriji kontaktyň göni naprýaženiýesiniň temperatura koeffisiýenti otrisateldir. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen güýçli garyntgy goşulan göneldiji diodlarda bazanyň garşylygy ulalýar, bu sebäpli diodyň göni naprýaženiýesiniň temperatura koeffisiýenti položiteldir. Göni naprýaženiýanyň temperatura koeffisiýenti otrisatelli geterogeçiş strukturanyň materialyny we parametrini şeýle saýlanyp alynýar,

ýimitlendiriji çeşme we ýükli rezistor bolan halatda  $R_n \geq r_q$  elektrik signalyň kuwwatyny güýçlendirmäge ukyply ( $\Delta P_{çyk} \geq \Delta P_{gir}$ ) güýçlendiriji koeffisiýent kuwwat boýunça  $\Delta P_{çyk} / \Delta P_{gir} \approx R_n \geq r_e$ .



4.3-nji surat

Tranzistoryň birikdiriliş shemasy 4.3 suratda görkezilen. Umumy bazaly (UB) shemada emitterde naprýaženiýe  $U_{eB}$  we kollektorda  $U_{kB}$  baza otnositellikde hasaplanylýar – umumy elektrodyň giriş (emitterli) we çykyş (kollektorly) zynjyr üçin.

Bu shema kuwwat we naprýaženiýe boýunça ( $\Delta U_{eB} \geq \Delta U_{kB}$ ) güýçlendirmäge eýe bolýar, emma togy güýçlendirmegi üpjün edip bilmeýär ( $\Delta I_k \approx \Delta I_e$ ) we az giriş garşylyk bilen häsiýetlendirilýär (emitter geçişiň göni naprýaženiýede deň garşylykda).

Has giňden ulanylan umumy emitterli shema ( $U_e$ ), onda naprýaženiýe bazada  $U_{Be}$  we kollektorda

ýetmeýärler. Emma olaryň sany az, ýagny bazanyň galyňlygy elektronlaryň diffuzion uzynlygy bilen deňeşdirilende az.

Kollektor geçişe ýeten elektronlar elektrik meýdan tarapdan oňa iteklenýärler we täzeden kollektora zyňylýarlar (3-nji elektronyň hereketi, 4.2, w surat). Şeýlelikde, aktiw režimde kollektor baza inžektirlenen elektronlary ýygnaýar (kollektirleýär).

Aktiw režimde kollektoryň we emitteriň toklary takmynan birmeňzeş, emma olaryň tapawudy bazanyň toguna deňdir. Kollektor geçişde kollektor togy praktiki taýdan naprýaženiýä bagly däldir, islendik ters naprýaženiýede kollektor geçişiniň bazasyna hemme ýeten elektronlar onuň tizlendiriji meýdanyna düşýärler we kollektora äkidilýär. Şonuň üçin kollektor geçişiniň differensial garşylygy  $r_k = dU_{kB}/dI_k$  örän uly, ýagny ters ugra birikdirilen  $p-n$  geçişler üçin mahsusdyr. Kollektoryň zynjyryna ýükli rezistory ýeterlik derejede garşylykly  $R_n$  kollektor toguny gaty azaltman birikdirmek bolar. Şol bir wagtyň özünde emitter geçişiniň differensial garşylygy ( $r_e = dU_{eB}/dI_e$ ) göni ugra birikdirilen örän az ( $r_e \ll r_k$ ). Emitter (çykyş) toguň  $\Delta I_e$  ululyga köpelmegi kollektor tok şol bir baha ( $\Delta I_k \approx \Delta I_e$ ) ulalýar. Emitter zynjyryda sarp edilýän kuwwatyň üýtgemegi  $P_{çyk} = \Delta I_e \Delta U_{eB} = \Delta I_e r_e$  nagruzkada bölünip çykýan kuwwatyň üýtgemeginde  $P_{çyk} = \Delta I_k \Delta U_{kB} = \Delta I_k R_n \approx \Delta I_e R_n$  köp gezek az bolmagy mümkin. Elektrik zynjyryň düzüminde tranzistor,

ýagny  $200^\circ$  çenli diodyň WAH we parametrleri has giň predellerde temperaturanyň üýtgemegi durnukly bolup galýar, mysal üçin kremniý diodyndan.

Şottki barýerli diodlarda  $1\text{mm}^2$  meýdanly geçişiniň  $U_g = 0,5 \div 0,6\text{W}$  naprýaženiýede göni tok 1 ampere deň bolup durýar. Şottki barýerli diodlarda we goraýyş halkaly deşilme naprýaženiýe  $U_{deş} = 200 \div 400\text{W}$ ,  $f_{gr}$  – birnäçe ýüz kilogers. Şonuň üçin barýer Şottkili diodlar iýmitlendiriji çeşmelerde ýazdyryjy (utgaşdyryjy-ýazdyryjy) hökmünde ýaýranda, ýagny ýazdyryjynyň  $100\text{kGs}$  çenli we ondan köpräk işçi ýygylgyny ulaltmaga REA massagabariniň häsiýetnamalaryny azaltmak we iýmitlendiriji çeşmäniň PTK-syny ýokarlandyrmaga mümkinçilik berýär. Şottki barýerli diodlar olaryň az göni naprýaženiýeli  $U_g$  we ters garşylygy dikeltmegiň wagtynyň az bolmagy sebäpli ulanyş effektivligi boýunça kremniý we germaniý diodlaryň önünde has amatlydyr. Garşylygyň  $R_n$  az bahalarynda  $E_i/R_n \rightarrow \infty$ .

### 3.3 Impuls diodlar

Impuls diodlar, esasanam, çalthereketediji impuls shemalar üçin niýetlenen. Olar birnäçe konstruktiv-tehnologiki işiň impuls režimini üpjün edýän aýratynlyklaryna eýe bolýarlar. Barýer sygym we geçişiniň golaýynda zarýad äkidijileriň toplanan zarýad-diodlaryň inersionlygyny kesgitleýji



faktorlardyr. Impuls diodlaryň esasy tapawutlandyryjy häsiýetleri elektrik geçişiniň az meýdanyndan we bazada esasy däl zaryad äkidijileriniň ýaşaýyş wagtynyň az bolmagyndan ybaratdyr.

Impuls diodlar  $p-n$  geçişli (nokatlanç, eredilme, mikrosplaw, diffuzion, maza diffuzion, epitaksial-planar) we Şottki barýerli tapawutlandyrylýar. Diodlar taýýarlanylanda başlangyç material hökmünde germaniý, kremniý, arsenid-galiý ulanylýarlar.

**Impuls diodlara** toplanan zaryadly diodlar hem girýär.

Barýer Şottkili diodlar impuls diodlar. Bu diodlar düzgün boýunça tekiz bolýar.

Kontakt metal-ýarymgeçiriji adaty wakuumda çapylma usuly bilen taýýarlanylýar.

**$p-n$  geçiriji diodlar.** Olar 3 sany uly topary emele getirýär (3.1,a surat): nokatlanç, splaw (eredilme) tekiz  $p-n$  geçişli we bazada garyntgylarynyň paýlanyşy deňölçegli (3.1,b we 3.1,w), diffuzion tekiz geçişli we meýdan tarapdan bazada togtadylýan (3.1,e we 3.1,w).

Diffuzion diodlar geçişler galyňlygy boýunça birmeňzeş planar we epitaksial-planar strukturalarda alynýarlar (3.1, ž). Esasy däl zaryad äkidijileriniň ýaşaýyş wagtyny peselmek üçin gapyjylar (lowuşki) derejani döredýän ýarymgeçiriji kristala altynyň (Ar) diffuziýasy amala aşyrylýar. Diffuzion epitaksial-planar diodlaryň bazasy az garşylyga eýe bolýarlar.

elektronlaryň inžeksiýasynyň üpjün etmekden ybaratdyr. Munuň üçin emitterde donorlaryň konsentrasiýasy  $N_{de}$  geçiş çäginde bazadaky akseptorlaryň konsentrasiýasyndan  $N_{de} \gg N_{aB}$  has ýokary bolmalydyr. Emitterden baza tarap elektronlaryň inžeksiýasy 1-nji elektronyň hereketine laýyk gelýär (4.2,w surat).

Baza tarap inžektirlenen elektronlar kollektor geçişe hereket edýärler. Bu hereket diffuziýanyň we dreýfiň umumylygydyr. Diffuzion hereket emitter geçişiniň golaýynda bazada elektronlaryň konsentrasiýasynyň inžeksiýasynyň ýokarlanmagy, şol bir wagtyň özünde kollektor geçişiniň golaýynda bu geçişiniň meýdany tarapdan ekstraksiýa sebäpli az bolmagy bilen amala aşyrylýar. Ähli görnüşli tranzistorlara diffuziýa mahsusdyr. Dreýf hereketi bazada içki elektriki meýdan tarapdan ýüze çykýar. Dreýf – 4.2,w surat, elektron 2 aýdyň görünýär, bazada hereket edýän edil ýapgyt menizlik boýunça typylýar (skatywaýetsýa). Bazasyna birmeňzeş däl garyntgy goşulan tranzistorlarda esasy roly dreýf hereketi oýnaýar, şonuň üçin dreýf hereketi diýip atlandyrylýar.

Dreýfsiz tranzistorlar bazasy birmeňzeş garyntgy goşulan az ýaýran we içki elektriki meýdan bolmaýar.

Baza tarapa inžektirlenen elektronlaryň bir bölegi rekombinasiýasy sebäpli kollektor geçişe çenli



#### 4.2-nji surat

Deşik-elektron geçişleriň energetiki diagrammalary biri-birine birikdirilen görnüşden ybaratdyr. Deňagram ýagdaý bitewi Fermi derejesi bilen häsiýetlendirilýär  $E_f$ . Emitteriň we bazanyň çäginde energetik barýer  $q\varphi_0$  beýiklikli, emma baza-kollektor çäginde – barýer  $q\varphi_{0K}$  beýiklikli emele gelýär. Bazada energetiki zonalaryň gyrasynyň uly bolmadyk egrelmesi (bazanyň çäklerinde energiýalaryň tapawudy  $q\delta\varphi \approx 0,1 eV$ ) bazadaky içki elektrik meýdan tarapdan ýüze çykan akseptorlaryň deňölçeg däl paýlanyşy bilen amala aşyrylan – olaryň konsentrasiýasy bazanyň emitter geçişli bilen çäginde ýeterlik derejede ýokary kollektorly geçişli çägindäki konsentrasiýasy bilen deňeşdirilende. Garyntgylaryň şeýle paýlanyşy tranzistoryň köpüsine mahsusdyr. Içki elektrik meýdanyň tebigatyna öý seredip geçipdik, bu meýdan bazada hereket edýän elektronlary emitte kollektora tarap tizlekdirýär. Güýçlendiriji shemalarda esasy aktiw režimdäki energetiki diagramma 4.2, w suratda getirilen. Emitter geçişiniň potensial barýeri göni naprýaženiýanyň bahasyna azalýar, bu bolsa emitterden baza tarap elektronlaryň inžeksiýasyna getirýär.

Emitteriň esasy ulanyşy – berlen göni tonda birtaraplaýyn maksimal mümkin bolan baza tarap

Diodlar bazasyna altynyň girizilmesi çalthereketligi ýokarlandyrýar we tok generasiýasyny ulaldýar ( $I_r$ ). Germaniden taýýarlanylýan diodlarda  $70^\circ$  çenli, emma kremnide –  $200^\circ C$  generasiýa togy ýylylyk tokdan uly. Şonuň üçin temperaturanyň ösmegi bilen göneldijiler bilen deňeşdirilende impuls diodlaryň ters togy haýal ulalýar.

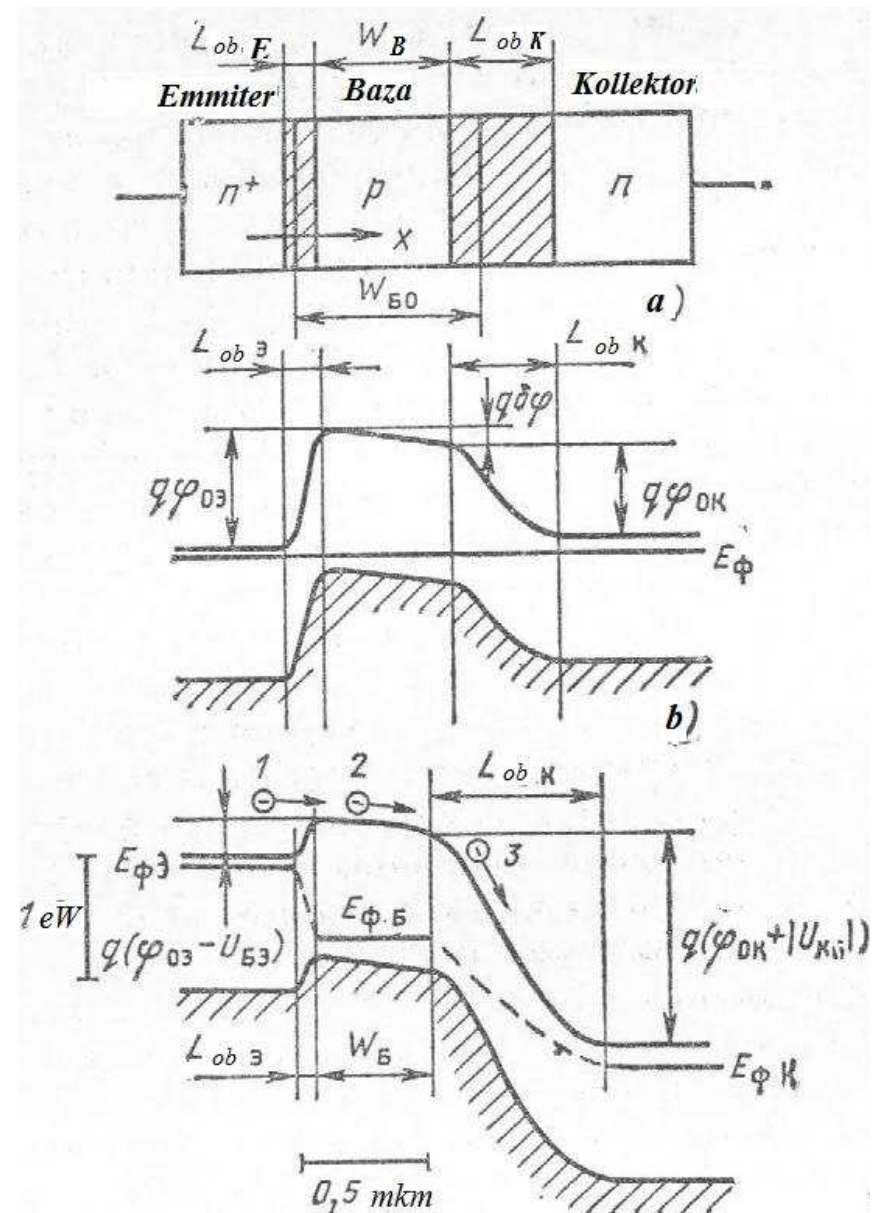
Nokatlanç we tekiz impuls diodlaryň WAH deňeşdirilende nokatlanç diodlarda p-n geçişiniň strukturasynyň birmeňzeş dældigi sebäpli ýitgi toguň roly uludyr. Şonuň üçin nokatlanç diodyň WAH-da  $I_r$  ters toguň baglanyşygy ters naprýaženiýa ýeterlik ýapgyda eýe bolýar, emma  $I_r$  temperatura baglylygy ýeterlik derejede gowşak.

Göni az toklarda  $U_g$  germanili tekiz impuls diodlarda kremniý diodlar deňeşdirilende azdyr. Emma nokatlanç germanili diodlar tekiz germanili ýa-da kremnili diodlar bilen deňeşdirilende 2-3 esse uly naprýaženiýa eýe bolýarlar.

Barýer Şottkili impuls diodlarda bazada esasy däl zarýad äkidijileriň toplanmasy bolmaýar. Şonuň üçin onuň impuls häsiýetnamasy sygym kremniniň ýokary omly gatlagy arkaly elektronlaryň uçuş wagty bilen kesgitlenilýär. Şottki barýerli impuls diodlar özleriniň impuls häsiýetnamasy boýunça beýleki görnüşli diodlar bilen deňeşdirilende iň gowusy bolup galýar.

**Toplanan zarýarly diod.** Toplanan zarýadyň diody mezadiffuzion ýa-da epitaksial-planar diodlaryň gurluşyna meňzeşdir (3.1,d we 3.1,d suratlar). Diodyň bazasynda garyntgylaryň deňölçeqli däl paýlanyşy sebäpli sebäpli inžektirlenen zarýad äkidijiler üçin togtadyjy elektriki meýdandan emele gelýär.

Bazada inžektirlenen deşikler içki elektrik meýdan tarapdan  $p$ - $n$  geçişde gysylýarlar we bazanyň  $n$ -oblastyna zarýadyň toplanmasy bolup geçýär. Diodda naprýaženiýanyň gönüden terse üýtgemegi diodyň garşylygy  $t_1$  wagtyň dowamynda az bolup galýar, toplanan zarýad äkidijiler ekstragirreýetsiýa (ekstransiýa).  $p$ -oblasta we diodyň ters togy çürt-kesik peselýär. Bazanyň içki meýdany geçiş arkaly deşikleriň ekstraksiýasyna ýardam berýär, bu bolsa ters toguň  $t_2$  peselmesiniň wagtyň dowamlylygy çürt-kesik gysgalýar. Toplanan zarýadly diodlaryň ýokarydurnukly häsiýetnamalaryny we parametrlerini üpjün etmek üçin onuň geçişini dioksid  $\text{SiO}_2$  kremniý bilen goralýar (3.1,w surat). Bazanyň  $n$ -gatlagynyň galyňlygy birnäçe mikrometr we ýeterlik derejede güýçli garyntgy goşulan (ýokary derejede logirlenen)  $n^+$  gatlagyň galyňlygyndan azdyr. Şonuň üçin toplanan zarýadly diodlarda bazanyň garşylygy az. Bular ýaly diodlar köpeldijilerde, ýygylgy bölüjilerde, diodly güýçlendirijilerde, logiki shemalarda, modulýatorlaryň shemalarynda we başga ýerlerde ulanylýar. Toplanan zarýadly diodlaryň belli



$p-n$  we  $p-n-p$  birmeňzeşdir. Biz transizstoryň  $n-p-n$  tipine serederis,  $p-n-p$  tranzistoryň işçi naprýaženiýesiniň polýarlygy we toklaryň ugurlary garyşma-garşy. Tranzistorlaryň  $n-p-n$  we  $p-n-p$  şertleşik belgisi 4.1 suratda aşakda görkezilen. Mundan beýläk bipolýar tranzistory ýöne tranzistor diýip atlandyryars.

Tranzistoryň ýarymgeçiriji gurluşynyň esasy oblastlaryna we onuň işleýiş prinsipine (güýçlendiriji) iň ýönekeý birölçegli 4.2,a suratda görkezilen modeline seredeliň. Bu modelde  $p-n$  geçişler tekiz diýip hasaplanylýar, zarýad äkidijiler diňe bir tarapa hereket edýärler – “ $x$ ” onuň ugry boýunça, geçişlere perpendikulýardyr. Ştrihlenen çyzyklar  $p-n$  geçişleriň garyplaşan gatlaklary görkezilen, olaryň arasyndaky aralyk  $W_b$  tehnologiýa galyňlygyny berýär. Bir ölçegli model üçin deňagram ýagdaýda (geçişlerde naprýaženiýe nul bolan halatlarda) energetiki diagramma 4.2,b suratda görkezilen.

impuls parametrlerinden başga-da esasy däl zarýad äkidijileriň ýaşaýyş wagty bilen häsiýetlendirilýär.  $\tau_0$  – geçiş arkaly geçýär zarýadyň ters tokda göni toga onuň uzak wagtla akymdaky gatnaşyk.

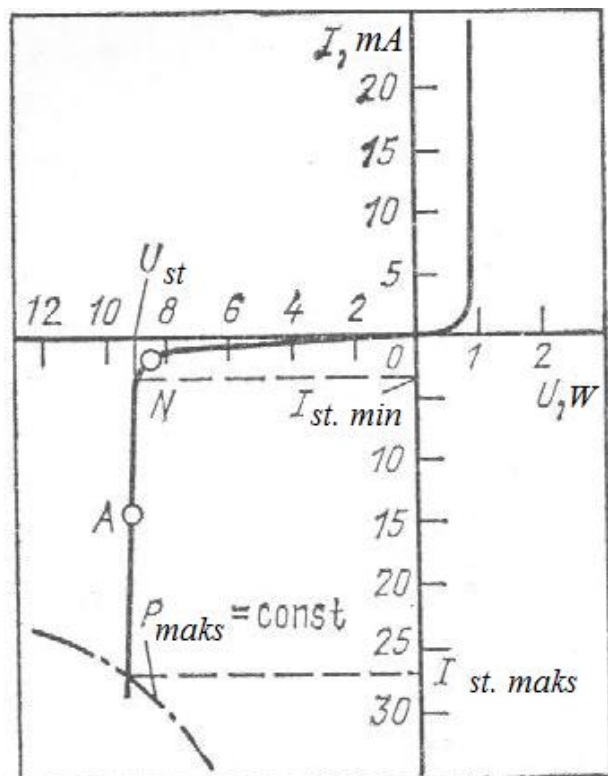
### 3.4 Stabilitrnlar

Stabilitronlar shemalarda naprýaženiýäni durnuklaşdyrmak üçin niýetlenendir. Olaryň wolt-ampere häsiýetnamalarynda (3.12 surat) ýokary krutiznaly meýdan bar (uçastok), diod arkaly naprýaženiýe diodda toga gowşak baglydyr.

RET-da stabilitronlar impuls, ikianodly, presizion, stabistorlar, umumy ulanyş hökümde niýetlenendir.

Umumy ulanyş üçin niýetlenen stabilitronlar iýmitlendiriji çeşmäniň stabilizatorlaryň shemalarynda ulanylýar.

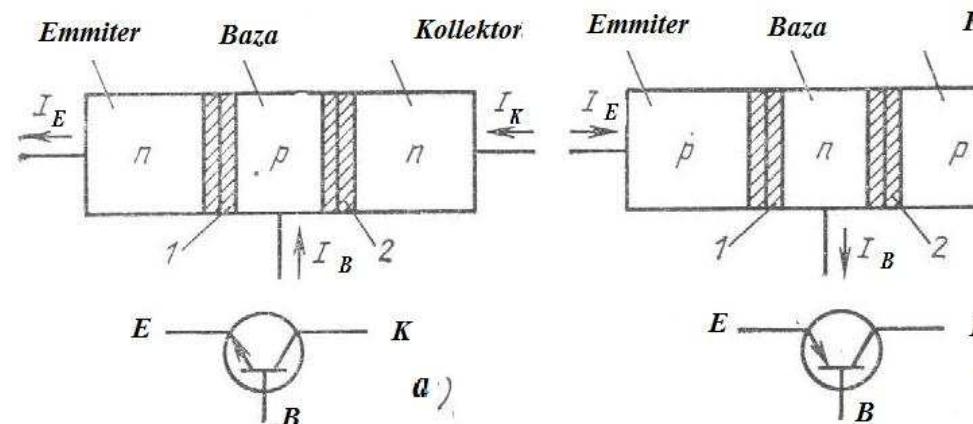
**Prezision stabilitronlar** ýokary takykly durnuklylygy bilen we naprýaženiýanyň w termokompensasiýa derejesini kadalaşdyrmak üçin naprýaženiýanyň çeşmesi hökkmünde ulanylýar.



3.4-nji surat

**Impuls stabilitronlar** mydamalyk we impuls naprýaženiýany durnuklaşdyrmak we az dowamlyly naprýaženiýanyň impulsalarynyň amplitudasyny çäklendirmek üçin, emma ikianodlylar – stabilizatorlaryň shemalarynda dürli polýarly naprýaženipanyň çäklendirijilerinde, şol sanda naprýaženipanyň ikitaraplaýyn çäklendirijisiniň

Zarýad äkidijileriň (esasy we esasy däl) hereketleriniň ulanylmagy abzalyň adyndan bellidir. Meýdan tranzistorlarda bir belgili zarýad äkidijileriň hereketi ulanylýar (esasy zarýad äkidijiler).



4.1-nji surat

Bipolýar tranzistor (4.1 surat) üç ýarymgeçiriji oblasty özünde ýerleşdirýär dürli geçirijilikli  $n-p-n$  (a) we  $p-n-p$  (b) we degişlilikde emitter, baza we kollektor diýip atlandyrylýar, bu oblastlar iki sany özara täsir edýän  $p-n$  geçiş-emitter 1 we kollektor 2 arasynda bölünendir. Geçişleriň arasyndaky özara täsir olaryň arasyndaky aralyk (bazanyň galyňlygy) köp derejede az bazadaky esasy däl zarýad äkidijileriň diffuzion uzynlygy bilen deňeşdirilende, şunuň esasynda özara täsir üpjün edilýär. Ýarymgeçiriji oblastlara omiki kontaktlar we daşky birikdiriji çykyşlar döredilen. Tranzistorlaryň işleýiş prinsipi  $n-$

## 4. BIPOLÝAR WE MEÝDAN TRANZISTORLAR

### 4.1 Gurluşy we işleýiş prinsipi

Tranzistor – bu elektoözgerdiji ýarymgeçiriji abzal bölegi bir ýa-da birnäçe elektrik geçişli we elektrik signallary güýçlendirmek üçin ulanylýar hem üç ýa-da ondan köpräk daşky birikdiriji çykyşlara eýe bolýar. İşleýiş prinsipi boýunça tranzistorlar iki sany esasy klaslara bölünýärler: bipolar we polewyýe (meýdan) unipolar. Bipolar tranzistorlarda fiziki prosessler zaryad äkidijileriň iki belgisiniň, ýagny esasy däl we esasy hereketi bilen kesgitlenilýär.

shemalarynda termokompensirlenen naprýaženiýeli daýanç element hökmünde ulanylýar. Stabistorlar az bahaly naprýaženiýany (mydamalyk, impulsly), mundan başga-da gurşap alýan sredanyň temperaturasy üýtgände shemalarda naprýaženiýanyň berlen derejesini saklamak üçin termokompensirleýji element hökmünde ulanylýar.

**Stabilitronlar** splaw, diffuziýasplaw, planar, diffuzion, epitaksial diodly taýýarlanylýar. Bular üçin başlangyç material bolup kremniý  $n$ -tip geçirijilikli, ýagny az ters toklar  $I_t$ , giň diapazonly iş temperaturany, naprýaženiýanyň durnukly oblastynda wolt-ampere häsiýetnamanyň WAH ýokary krutiznasyny üpjün edýänligi üçin saýlanylýar ( $U_{st}$ ). Naprýaženiýanyň durnuklaşmagyna diodda naprýaženiýanyň derejesi laýyk gelýär, giň predellerde diod arkaly tok üýtgände praktiki taýdan mydamalyk bolup galýar.

**Işleýiş prinsipi.** Stabilitronlaryň köpüsi stabistorlardan başgasy  $p-n$  geçişdäki elektriki deşilmäni (proboýy) ulanylmaklyga esaslanandyr. Diodyň bazasynda garyntgylaryň konsentrasiýasy otrisatel az bolanda onuň elektriki geçişinde deşilmäniň lawin (sygym) mehanizmi ýüze çykýar (durnukly naprýaženiýeli  $U_{st} \geq 6,3W$  ýokarywoltly stabilitronlar), emma diodyň bazasynda garyntgylaryň konsentrasiýasy ýokary bolanda tunnel deşilme ýüze çykýar (peswoltly stabilitronlar naprýaženiýanyň

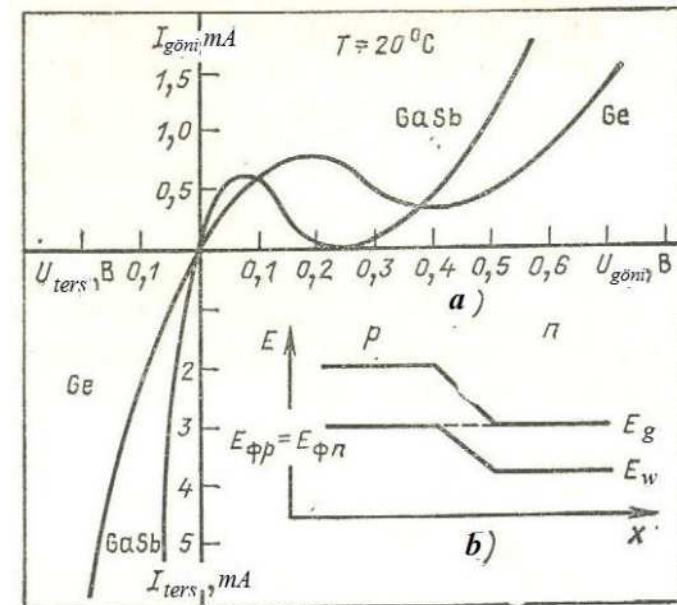
durnuklylygy  $U_{st} \leq 6,3W$ ). Kremniý diod üçin naprýaženiýanyň mydamalygy diňe onuň geçişiniň elektriki deşilme oblastynda bolman, eýsem WAH göni şahasyna hem mahsusdyr (3.12 surat), stabistorda ulanylýar.

Shemalarda naprýaženiýany durnuklaşdyrmak üçin diodyň WAH göni şahasy ulanylýar we **stabistor** diýip atlandyrylýar. WAH göni şahanyň krutiznasyny ulaltmak üçin, ýagny diodyň  $r_{dif}$  garşylygyny we bazanyň garşylygyny  $r_b$  azaltmak üçin stabistorlarda ýokary konsentrasıýaly garyntgyly kremniý ulanylýar. Durnuklylygyň naprýaženiýesi  $U_{st} \approx 0,7W$  we bir  $p-n$  geçişli stabistoryň WAH-da “uly” göni toklaryň uçastogyna laýyk gelýär.  $U_{st}$  ulaltmak üçin käwagtlar bir korpusda ýa-da bir kristalda taýýarlanylýan birnäçe yzygiderli birikdirilen stabistorlar ulanylýar.

Temperaturanyň ulalmagy bilen stabistoryň  $p-n$  geçişinde naprýaženiýe azalýar, emma bazanyň garşylygynda ulalýar.

Stabistoryň bazasynyň garşylygynyň azlygy sebäpli  $U_g$  üýtgemegi  $p-n$  geçişde naprýaženiýanyň temperatura baglylygy bilen kesgitlenilýär. Şonuň üçin naprýaženiýanyň ulalmagy bilen  $U_g$  stabistoryň takmynan  $2mW/^\circ C$  azalýar. Naprýaženiýanyň durnuklylygynyň temperatura koeffisiýenti stabistor üçin  $\alpha_{st} = dU_{st}/(U_{st}dt) \leq 0$ .

**Presizion stabiltronlar.** Olarda, düzgün boýunça, üç yzygiderli birikdirilen  $p-n$  geçişi



3.7-nji surat

ýarymgeçirijiniň çäGINE golaý gelyär. Şonuň üçin tunnel tok diňe geçişde ters naprýaženiýede emele gelyär. Diodyň energetiki diagrammasy deňagram ýagdaýda 3.21,b suratda getirilen. Biri-birine bakylan diodyň işçi bölegi wolt-amper häsiýetnamanyň ters şahasy onuň atlandyrylyşynda bellidir.

Diodyň işçi böleginde diňe geçiş arkaly zarýad äkidijileriň tunnelirlenme hadysasy bilen amala aşyrylýar. Diýmek, geçişin diffuzion sygymy  $C_{dif}=0$ ; diodyň bazasynda zarýad äkidijileriň toplanmasy prinsipial taýdan bolmaýar. Şonuň üçin öwrülen diod  $p-n$  geçişdäki diod bilen deňeşdirilende has ýokary ýygylklarda işläp biler.

Öwrülme diodlaryň parametrleri mydamalyk göni  $U_g$  we ters  $U_t$  naprýaženiýe berlen göni we ters toklarda, berlen impuls ters  $I_t$  tokda  $r_{dif}$  we impulsyň kesgitlenen dowamlylygy, şonuň ýaly pikiň togy  $I_p$  we diodyň sygymy  $C_d$ .

Tunnel diodlar üçin materiallar: InSb, GaAs, GaP, GaSb, Ge. Häzirki wagtda GaAs we Ge diodlar taýýarlanylýar.

ulanyrlar. Olardan biri stabilizirleýji (durnuklydyryjy) ters ugra birikdirilen, beýleki ikisi – termokompensirleýji we göni ugra birikdirilen. Eger stabilizirleýji geçiş lawin (syrgyn) deşilme režimde işlese, onda temperaturanyň ulalmagy bilen naprýaženiýe ulalýar. Şol bir wagtyn özünde iki termokompensirleýji geçişlerde göni naprýaženiýe azalýar, şonuň üçin stabilitronda umumy naprýaženiýe ujypsyz üýtgeýär we stabilizasiýalaşdyryjy naprýaženiýäniň temperatura koeffisiýenti  $\alpha_{st}=(-1\div 20)\cdot 10^5$  grad adatdan daşary az.

**Impuls stabilitronlar.** Naprýaženiýanyň impulsynyň amplitudasyny çäklendiriji, mundan başga-da öwrülme impuls diod hökmünde ulanylýar. Impuls stabilitronyň  $p-n$  geçişinde elektrik proboý bolanda (deşilme) diodyň bazasynda esasy däl zarýad äkidijiler toplanmaýrlar. Diodda naprýaženiýanyň birden çalt üýtgände lawinanyň (syrgynyň) togunyň ulalmagyny häsiýetlendiriji mydamalyk wagt  $p-n$  geçişin garyplaşan gatlagy arkaly uçup geçýän zarýad äkidijileriň wagty bilen kesgitlenilýär we takmynan  $10^{11}s$  bolýar.

Öwrülme impuls diodda iş nokadyny deşilme naprýaženiýanyň golaýynda saýlanyp alynýar ( $N$  nokat, 3.12 suratda). Stabilitronyň elektrik deşilme meýdany imupls diodyň WAH göni şkalasy hökmünde seretmek bolar. Şoňa laýyklykda  $p-n$  geçişde göni süýşmede stabilitronyň meýdanynda



impuls diodyň WAH ters şahasy ýaly seredilýär, şonuň üçin stabilitron **öwrülme impuls diody diýip** atlandyrylýar.

**Ikianodly stabilitronlar.** Stabilizasiýa shemalarda we naprýaženiýanyň ikitaraplaýyn çäklendirijilerde, iki polýarlykda aşa naprýaženiýe bolmazlyk üçin elektrik zynjyryň elementleriniň goraýyş gurluşlarynda ulanylýar. Bu hili stabilitronlaryň gurluşy (strukturasy) *n*-tip geçirijilikli kremniý plastinasyna ikitaraplaýyn garyntgylaryň diffuziýasy arkaly emele getirilýär. Bu halatda emele gelen iki *p-n* geçiş biri-birine garşylykly birikdirilen. Strukturanyň anodlaryň oblasty diňe daşky çykyş birikdirijä eýe bolýarlar. Stabilitronyň bu aýratynlygy abzalyň adyna gabatlaşýar.

Stabilitrona islendik polýarly naprýaženiýe berlende bir geçiş elektrik deşilme režimde, emma beýlekisi termokompensirleýji režimde işleýär.

### 3.5 Warikaplar

Warikap sygymy elektriki taýdan dolandyryjy hökmünde ulanylmaga niýetlenen. Warikapyň işleýiş prinsipi elektriki geçişň sygymynyň naprýaženiýä baglylygyna ulanylmaklygyna esaslanandyr. Warikaplaryň elektriki geçiş çylşyrymly gurluşa, ýagny *p-n-n<sup>+</sup>*, *p-i-n*, MDÝ we ş.m. eýe bolýar.

şekillendirilen. Tunnel diod üçin şu aşakdaky statistiki parametler ulanylýar;  $I_p$  – pik toguň bahasy, ýagny  $U_p$  pik naprýaženiýede tok güýji, WAH krutiznasy  $U_g$  ulalmagy bilen belgisini položitelden otrisatele üýtgedýär.  $I_w$  – minimal toguň bahasy,  $U_g$  naprýaženiýede tok güýji, WAH krutiznasy göni naprýaženiýanyň  $U_g$  mundan beýläk ulalmagy belgisini otrisatelden položitele üýtgedýär;  $U_r$  – tunnel diodyň rastwor naprýaženiýesi – göni naprýaženiýe WAH göni şahasynda,  $I_n$  (minimal toguň bahasy) deňdir.

Ýarymgeçirijiniň *p*- we *n*- oblastlarynda garyndylaryň konsentrasiýasynyň ulalmagy bilen diodyň togy  $I_n$  ulalýar, sebäbi garyntgylaryň konsentrasiýasy  $E_{fp}$ ,  $E_{fn}$  we  $\Delta E$  energiýalaryň bahalaryny kesgitleýär.  $U_w - U_n$  tapawut ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň inine baglydyr  $\Delta E_g$ .

### Öwrülme utgaşdyryjy-ýazdyryjy diod

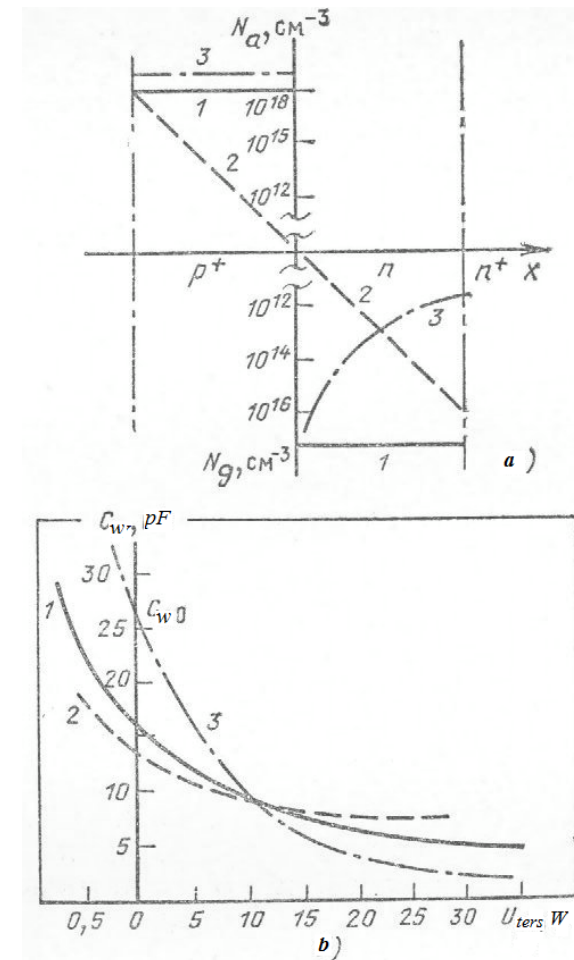
Bular ýaly diodlar çalthereketediji impuls utgaşdyryjy-ýazdyryjy shemalarda, aşayokaryýyglykly diapazonyň garyjysy we kiçi signallaryň detektorlaryň shemalarynda ulanylýar. Biri-birine bakylan diodlaryň wolt-ampere häsiýetnamasy otrisatel garşylykly bölek bolmaýar (3.21, a surat), garyntgylaryň konsentrasiýasy *p*- we *n*- oblastlarda  $10^{18} - 10^{19} \text{ sm}^{-3}$  deň, güýçli garyntgy goşulan



Göni naprýaženiýe  $U_g$  tä  $U'_g$  çenli ulalanda ýapylýan erkin we eýelenen izoenergetiki derejeleriň sany başda ulalýar (3.18,w surat).  $U'_g$  naprýaženiýede Fermi derejesi  $E_{fn}$  p-oblastyň  $E_a$  energiýanyň derejesi we degişlilikde  $E_{fp} - E_n$  diodyň n-oblastynyň derejesi bilen gabat gelýär.

$U'_g$  naprýaženiýä maksimal tok  $I_{g.tun.}$  göni tok laýyk gelýär ( $U'_g=0,1W$ ).  $U_g \geq U'_g$  halatda zolaklaryň ýapylmasy azalýar  $\delta E$ ,  $I_{g.tun.}$  tok azalýar, emma  $U''_g=U$   $\delta E=0$  alýarys we tunnel tok ýok bolýar (3.18,w surat). Emma birnäçe göz önünde tutulmadyk faktorlar (ýarymgeçirijiniň gadagan zonynda derejeleriň bolmagy, ýagny başga garyntgylar tarapdan emele gelen, energetiki zonalaryň çäkleriň ýuwulmasy  $E_w$  we  $E_g$ , olaryň egrelmesi we başgalar)  $U_g+U_w$  halatda uly bolmadyk artykmaç toguň  $I_{g.tun.}$  bolmagyna getirýär. Göni toguň mundan beýläk ulalmagy  $U_g$  potensial barýer şeýle bir peselýär,  $U_g \geq U_w$  halatda geçiş arkaly diffuzion tok ýüze çykýar we esasy bolup durýar. Geçişde seredilen prosesslere tunnel toguň daşky naprýaženiýä baglylygy 3.18,d suratda getirilen.

Tunnel diodyň Wolt-amper häsiýetnamasy 3.19 suratda ştrihlenen çyzyklar bilen şekillendirilen. Bu baglanyşyk tunnel toguň we  $p-n$  geçişiniň WAH togunyň jemi bilen emele gelen. Olar degişlilikde tutuşlaýyn we ştrihlenen-punktir çyzyklar bilen



3.5-nji surat

Warikaplar yrgyldyly konturyň ýygylgyny dolandyryjy gurluşlarda, güýçlendiriji parametriki shemalarda, ýygylgy bölüji we köpeldiji, ýygylk modulýasiýasynyň shemalarynda ulanylýarlar. Bu

gurluşlarda esasy üns  $p$ - $n$  geçişin barýer sygymy esasyndaky warikaplara berilýär.

Warikaplar üçin esasy material kremniý, soňky wagtlar – arsenid galliý ulanylýar. Splaw warikaplarda elektrik geçiş çürt-kesik, geçiş boýunça garyntgylaryň paýlanyşy metallurgiki çäkden başlap, takmynan,  $p^+$  we  $n$ -oblast üçin deňölçegli, diffuzion warikaplarda – endigan (3.15 surat, a-1-2 çyzyklar). Bu paýlanyşlara  $C_W=f(U)$  baglanyşyk laýyk gelýärler – warikapyň wolt-farad häsiýetnamasy (1 we 2 egriçyzyklar, 3.15 surat). Bu wolt-farad häsiýetnamalar şu aşakdaky aňlatma bilen laýyk gelýär:

$$C_n = C_{n0} [\varphi_0(\varphi_0 - U_{ob})]^m. \quad (3.14)$$

Bu ýerde  $m$  – WAH çyzykly dälliginiň koeffisiýenti ( $m=0,5$ , splaw we  $m=0,3$  diffuzion üçin);  $C_{n0}$  – daşky naprýaženiýede  $U_t=0$  warikapyň sygymy.

Epitaksial warinaplarda  $C_W=f(U)$  has çürt-kesik baglanyşygy almak üçin  $p^+$ - $n$ - $n^+$  strukturaly geçişler we bazada ters gradiýentli garyntgylaryň paýlanyşyny ulanýarlar (3 egriçyzyklar, 3.15,a we 3.15,b suratlar).

Warikaplar  $p^+$ - $n$ - $n^+$  görnüşli planar-epitaksial tehnologiýanyň kömegi bilen taýýarlanylýar.

### 3.6 Tunnel we öwrülme diodlar

oblastynyň energiýanyň erkin derejelerine tunnelirlenýärler. Emma şeýle bölekleriň geçişleri deňähtimallydyr, ýagny uzoenergetiki derejeler (birmeňzeş energiýaly  $E$  derejeler) geçişin iki tarapy ýa-da eýelenen, ýa-da birmeňzeş ähtimallykly (2.12 surat) geçiş arkaly toguň jemi nola deňdir.

Geçişde ters naprýaženiýe zonalaryň ýapylmagyny ulaldýar  $dE$ , ýagny  $qU_t = E_{fp} - E_{fn}$ . Bu ýagdaý üçin geçişin energetiki diagrammasy 3.18,b suratda getirilen. Tersinde geçiriji zonada  $n$ -oblastyň elektronlar tarapdan eýelenen derejeler walent zonanyň  $p$ -oblastynyň eýelenen energetiki derejeleri ýerleşýärler we elektronlaryň  $n$ -oblastyndan  $p$ -oblasta tunnelirlenmesiniň ähtymallygy azdyr. Diýmek, elektronlaryň  $p$ -oblastyndan  $n$ -oblasta tunnelirlenmegi bolup geçýär, diod arkaly ters tok akýar  $I_{t.tun}$ . (3.18,b surat). Ters naprýaženiýanyň ulalmagy  $U_t$   $n$ -oblastda eýelenen derejeleriň sany ösýär, geçiş arkaly tunnelirlenýän elektronlaryň sany ýokarlanýar, diodyň ters togy çürt-kesik ýokary galýar.

Uly bolmadyk göni naprýaženiýalarda  $U_g$  (3.18,w surat) geçiriji zonanyň  $n$ -oblastynyň elektronlary tarapdan dolandyryan energetiki derejeler walent zonanyň  $p$ -oblastynyň erkin derejeleriniň garşylykda **bölekleyin** ýerleşýärler. Şonuň üçin, esasanam, elektronlaryň  $n$ -oblastda  $p$ -oblasta tunnel geçişleri bolar, bu bolsa diodyň göni toguna  $I_{g.tun}$  degişlidir.

### 3.6-njy surat

#### Tunnel diodyň işleýiş prinsipi

Tunnel diodyň  $p$  we  $n$  oblastlarynda garyntgylaryň konsentrasiýasy  $10^{20} \text{sm}^{-3}$ , ýagny diodda ýokary konsentrasiýaly zarýad äkidijili ýarymgeçirijiler ulanylýar (zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy ýokary ýarymgeçiriji). Tunnel diodlaryň elektriki geçişiniň galyňlygy 1-10nm ybaratdyr. **Tunnel geçişler** energiýa energiýa sarp etmesiz bölekler tarapdan amala aşyrylýar.

Tunnel diodyň  $p$  we  $n$  oblastlarynda garyntgylaryň **lokal** derejeleri güýçli garyntgy goşulan ýarymgeçirijilerde tutuşlaýyn zonany emele getirýär. Fermi derejesi deňşililikde walent we geçiriji zonada ýerleşýär. Deňagram ýagdaýda  $p$ - $n$  geçişniň energetiki diagrammasy 3.18,a suratda görkezilen, ştrihlenen oblast elektronlar tarapdan eýelenen derejeleriň energiýasyna deňşlidir (has uly ähtimallykly).

Termodinamiki deňagram ýagdaýda  $n$ -ýarymgeçirijiniň geçiriji zonasy we  $p$ -ýarymgeçirijiniň walent zonasy energiýa boýunça  $\Delta E = E_a - E_n$  ululyga garyşýarlar. Şonuň üçin geçiriji zonadan elektronlar  $n$ -oblastdan dar geçiş arkaly walent zonanyň  $p$ -oblastyna tarap erkin energetiki derejelere, emma walent zonanyň  $p$ -oblastynyň elektronlary geçiriji zonanyň  $n$ -

Tunnel diodyň işleýiş prinsipi elektron-deşik feçişdäki tunnel effekte esaslanandyr, bu effekt zarýad äkidijileriň konsentrasiýasy ýokary bolan ýarymgeçirijilerde ýüze çykýar. Tunnel effekt geçişniň göni naprýaženiýesinde tunnel diodyň WAH-yň otrisatel geçirijilikli böleginiň ýüze çykmagyna getirýär.

Öwrülme diodda otrisatel geçirijilik bölegi WAH-da bolmaýar.

Güýçlendiriji, generatorly, utgaşdyryjy tunnel diodlary tapawutlandyrylýar. Güýçlendiriji diodlar güýçlendirijilerde we geterodik kebul ediji gurluşlarda, detektorlaryň shemalarynda we aşa ýokary ýygyllykly diapazonyň garyjy hökmünde ulanylýar. Generator diodlary, esasanam, 10 sm tolkun diapazonunda AÝÝ generatorlary gurmak üçin ulanylýar, emma olar çalthereketediji impulslarda we utgaşdyryjy shemalarda işläp biler. Utgaşdyryjy-ýazdyryjy diodlar ýöriteleşdirilen hasaplaýyş gurlary gurmak, logiki aşa çalthereketediji shemalarda nanosekundly diapazonyň impuls gurluşlary üçin gerek.

Öwrülme diodlar hem edil utgaşdyryjy-ýazdyryjy tunnel diodlary ýaly ulanyş oblata eýe bolýarlar, emma käbir halatda detektorlaryň shemalarynda we AÝÝ (aşa ýokary ýygyllykly) diapazonyň garyjy hökmünde ulanylýar.

