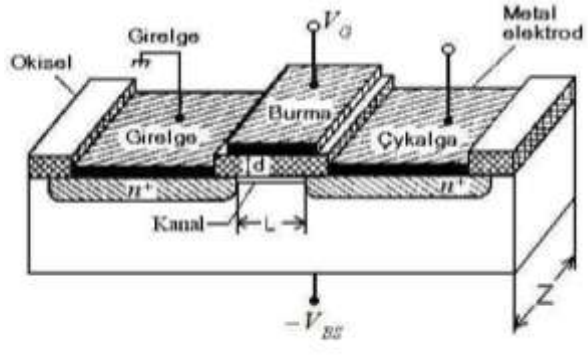
TÜRKMENISTANYŇ BILIM MINISTRLIGI

Jümmi Ataýew

ÝARYM GEÇIRIJI ENJAMLAR

Okuw kitaby

Mikroelektronika we ýarym geçiriji enjamlar hünäri üçin



Aşgabat – 2010

Annotasiýa

Okuw kitaby dört bölümden ybarat bolup, birinji bölüminde ýarym geçirijileriň fizikasy öwrenilýär. Kristallaryň gurluşy we olardaky bar bolan esasy defektler öwrenilýär. Jisimleriň metallara, dielektriklere we ýarym geçirijilere bölünişine zonalar teoriýasynyň nukdaý nazaryndan garalýar. Elektronlaryň Fermi-Diragyň statistikasy boýunça paýlanyşyna seredilýär. Hususy we garyndyly ýarym geçirijilere garalýar. Ýarym geçirijilerdäki kinetiki hadysalara-da ýeterlik orun berilýär. Ýarym geçirijilerde kontakt hadysalaryna has-da giň orun berilýär. Iki metalyň galtaşmasyna, metal bilen ýarym geçirijiniň galtaşmasyna, elektronly we deşijekli ýarym geçirijileriň galtaşmasyna (p-n geçişe). Ýarym geçirijilerde optiki hadysalar, olaryň lýuminessensiýasyna garalyp geçilýär.

Okuw kitabynyň ikinji bölümi bipolýar abzallara bagyşlanýar. Ýarym geçiriji diodlar we olaryň alnyşy, tunnel diodlary, geterogeçişli diodlar, dinistorlar we tiristorlar we syrgyn-uçuşly diodlar hem-de tranzistorlar öwrenilýär.

Okuw kitabynyň üçünji bölüminde unipolýar abzallary öwrenilýär. Meýdan tranzistorlarynyň strukturasy we işleýiş prinsipi öwrenilýär. Metal-okisel- ýarym geçiriji (MOÝ) tranzistorlaryna giň orun berilýär. Ýuka plýonkaly tranzistorlara we huşuň energiýa bagly däl elementlerine garalýar.

Okuw kitabynyň dördünji bölümi optoelektron abzallaryna bagyşlanýar. Fotorezistorlar, fotogalwaniki elementler, fotodiodlar, fototranzistorlar we fototiristorlar, optronlar, we ýarym geçiriji lazerler giňden öwrenilýär. Gun elementlerine aýratyn orun berilýär.

Okuw kitaby ýokary okuw mekdepleriniň maglumatlary işläp taýýarlamagyň we dolandyrmagyň awtomatlaşdyrylan ulgamlary, maglumat-ölçeg tehnikasy we tehnologiýasy, mikroelektronika we ýarym geçiriji enjamlar, fizika, radiofizika we elektronika hünärleriniň talyplary üçin niýetlenendir.

Giriş

Syrgyn-uçuşly diodlaryň iş tertibi çenden aşa ýokary ýygylyklarda otrisatel garşylygyň döremegi, onuň sebäbiniň bolsa,äkidijileriň üznüksiz akymda köpelmegi, olaryň ýarymgeçirijili düzüminiň üsti bilen uçup geçmegi bilen baglydyr.

”Syrgyn gijenmesi”-köpçülikleýin togyň ahyrky ösüşinde, emma “uçuş gijenmesi” bolsa äkidijileriň dreýf zonasyny ahyrky geçiş wagtynda döreýär.

Diodyň garşylygy ýygylygyň birnäçe böleginde bolup biler, haçanda bu wagtlaryň jemi yrgyldynyň ýarym periodyna deň bolan wagty. Ilkinji sapar bu ýagdaý 1965-nji ýylda Džonson, Delouç we Koen tarapyndan kremniý diodynyň ters syrgyn çägindäki çenden aşa ýygylyk AÝÝ (СВЧ) ýerleşdirilen hakynda sylaglandy.

Ýarymgeçiriji diodlarda uçuş effekti netijesinde döreýän otrisatel garşylygy ilkinji sapar 1954-nji ýylda öwrenildi. Häzirki wagtda syrgyn-uçuşly diodlary AÝÝ (СВЧ)-şöhlelendiriji gaty maddaly çeşmeleriň arasyndaky has güýçlisidir.

Syrgyn-uçuşly diodlary belli bir çäkdäki ýygylygynda üznüksiz režimde has uly kuwaty generirläp bilýändir, olar takmynan 30 GGs ýokarydyr. Ýöne iş wagty döreýän käbir kynçylyklary hem bellemek zerurdyr:

1) sesiň ýokary derejeliligi
2) zynjyrlary has ykjam hasaplamagyň gerekligi

MOÝ tranzistorlaryň esasy häsiýetnamalaryna, görnüşlerine we işleýiş prinsiplerine garalmak bilen olary taýýarlamagyň tehnologiýasyna-da has üns berildi. MOÝ tranzistorlardaky bolup geçýän fiziki hadysalara seredildi. Gysga kanally effektlere, meýdan tranzistorlarynyň strukturalaryna giňişleýin syn edildi. Meýdan trnzistorlarynyň ulanylyşyna has giň rol berildi. Olaryň häzirki wagtda ulanylýan ýerleri barada maglumat berildi. Integral mikroshemalary üçin olaryň konstruksiýalary görkezildi. Meýdan trnzistorlarynyň soňky wagtlarda ulanylýan yeriniň biri hem huşuň energiýa bagly däl elementleridir. Bular barada hem giňişleýin maglumatlary berildi.

Häzirki zaman kompýuterleriniň hemişelik huşlary, fleş diskler we ş.m-ler MOÝ tranzistorlaryň esasynda ýasalýar.Şol sebäpli hem şeýle meýdan tranzistorlaryny öwrenmeklik örän wajyp meseleleriň biri bolup durýar.

Bulardan başga-da, radio aragatnaşygynda, umuman, Türkmenistanda ulanylýan häzirki zaman aragatnaşyk serişdelerinde, hemra arkaly aragatnaşyklarda, optiki süýmli aragatnaşykda aşa ýokary ýygylygyň tranzistorlary hökmünde MOÝ meýdan tranzistorlarynyň ulanylmagy olaryň esasy parametrlerini, hilini öwrenmwkligi talap edýär. Şol sebäpli hem olaryň esasy ugurlaryna seredildi.

Häzirki döwürde gün batareýalary köp wagtlaýyn uçuş döwründe kosmiki çämileri we ýeriň hemralary üçin wajyp energiýa çeşmesi bolup durýarlar. Ondan başga-da olar Ýerde-de giňden ulanylyp başlandy. Dünýäde soňky wagtlarda energiýanyň ulanylyşynyň artmagy sebäpli gazylyp alynýan energiýa çeşmeleri tizara azalar.Şol sebäpli alternatiw energiýa çeşmelerini işläp tapmaly bolýar. Olaryň esasy biri hem-yzy uzülmeýän tukeniksiz gün energiýasydyr. Gün energiýasy bilen ünjün edýän esasy serişde bolup gün batareýalary hyzmat edýär. Sebäbi olar gün energiýasyny tok geçmesine öwürýärler we pes çykdajylaryň hasabyna hemişelik kuwwat döredýärler, daş töwerege, tebigata zyýan etirmeýärler.

Ilkinji gün elementi 1954-nji ýylda Çapen, Fuller we Pirson ýaly alymlar tarapyndan, kremniýli diffuziýa p-n geçişiniň esasynda döredildi. Soňra Reýnoldsyň ýolbaşçylygynda sulfit kadminiň esasynda gün elementi ýasaldy.

Ondan soňra bolsa gün elementlerini başga-da dürli görnüşli ýarymgeçirijileri ulanmak bilen ýasadylar we olaryň esasy häsiýetnamalarynyň analizi Höwel, Bekus ýaly alymlar tarapyndan düzülendir.

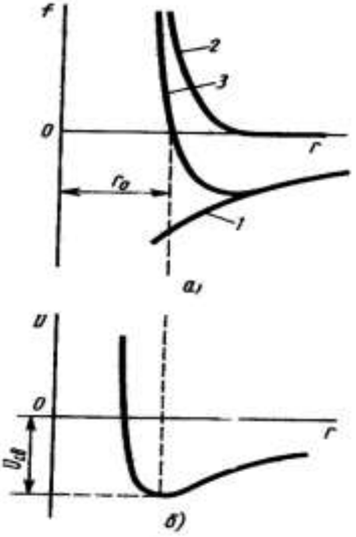
1-NJI BÖLÜM
ÝARYM GEÇIRIJILERIŇ FIZIKASY

1-nji bap. Kristallaryň gurluşy we olardaky defektler

1.1. Kristallik gözenek. Brawe gözenegi. Ýönekeý we çylşyrymly gözenekler. Kristallarda düwünleriň, ugurlaryň we tekizlikleriň bellenilişi. Milleriň indeksi

Kristallik gözenek.

Atomlar we molekulalar bir-birine golaýlaşanda olaryň arasynda özara täsir güýçleri ýüze çykýar (1.1.surat). Otnositel uzak aralykda atomlaryň we molekulalaryň arasynda özara dartyş güýji f_d ýüze çykýar we aralygyň ýakynlaşmagy bilen artýar (1-nji egri). Bölejikler belli bir aralyga çenli ýakynlaşandan soň özara itekleýiş güýji f_{it} ýüze çykyp, f_{it} güýji aralygyň kiçelmegi bilen özara dartyş güýjüne seredende çalt artýar (2-nji egri).

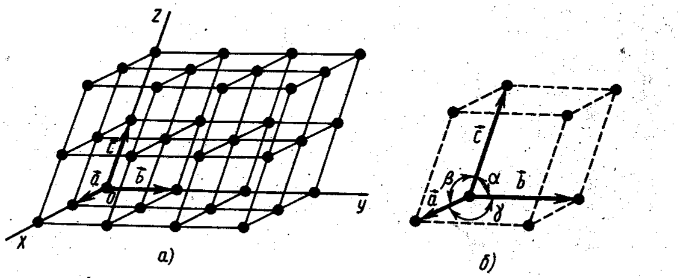


1.1.Surat. Bölejikleriň arasyndaky özara täsir güýjüň (a) we energiýanyň (b) olaryň arasyndaky aralyga baglylygy.

Belli bir $r = r_0$ aralykda özara dartyş we itekleýiş güýçleri deňleşýär hem-de jemleýji güýç *f* nola deň bolýar. Şol sebäpli hem r_0 aralyk atomlar we molekulalar üçin deňagramlykdaky ýagdaýdyr we şeýle aralykdan berk dizgün boýunça ýerleşip dogry içki gurluşly jisimi - kristaly, emele getirýärler. Şeýle gurluşy häsiýetlendirmek üçin kristallik gözenek diýen düşünje girizilýär. Geliň, Braweniň translýasiýa gözenegine we esasly gözenege seredeliň.

Brawe gözenegi.

Geometrik nukdaý nazardan seredeniňde bölejikleriň dogry, periodik gaýtalanýan gözenegini parallel göçürme esasynda almaklyk mümkin. (translýasiýa).



1.2. Surat. Ýönekeý gözenek (a) we bu gözenegiň ýönekeý ülüşi (b).

1.2-nji suratda bölejikleri üç koordinata oklary x, y, z boýunça parallel göçürmeklik bilen alynan gözenek görkezilen: OX-oky boýunça - a, 2a, 3a. . . ma kesimler; OY-oky boýunça - b, 2b, 3b. . . nb kesimler; we OZ-oky boýunça - c, 2c, 3c. . .pc kesimler, bu ýerde m, n, p - bütin sanlar. Islendik bölejigiň ýerleşen ýerni r wektoryň üsti bilen tapmaklyk mümkin

$$r = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + p\mathbf{c} \qquad (1.1)$$

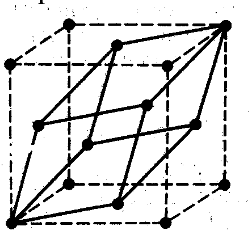
a, **b**, **c** - translýasiýa wektorlary, olaryň modullaryna - translýasiýa periody diýilýär.

Haýsy hem bolsa bir düwüni translýasiýa ugry boýunça (x,y,z) parallel göçürmek bilen alynan gözenege - Brawe gözenegi giýlip at berilýär (1.2a surat). a, b, c wektorlar esasynda gurulan iň kiçi parallelepipede, kristalyň gözeneginiň elementar ülüşi diýilýär(1.2b surat). Kristalyň gözeneginiň elementar ülüşi alty sany ululyk bilen häsiýetlendirilýär, üç sany ýaçeýkanyň gapyrgalary a, b, c we olaryň arasyndaky burçlar α, β, γ. Bu ululyklara ýaçeýkanyň

parametrleri diýilýär. Formasy boýunça ýönekeý ýaçeýkanyň ýedi görnüşi bar: triklin, monoklin, rombiki, romboedriki, geksogonal, tetragonal we kubiki.

Ýönekeý we çylşyrymly gözenekler.

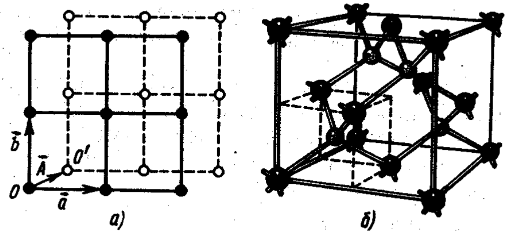
Gözenegiň ýonekeý ülşündäki düwünleriň sany boýunça, gözenegi ýönekeý we çylşyrymly görnüşlere bölýärler. Ýönekeý gözenekde bir ülüşde bir sany düwün ýerleşýär, emma, çylşyrymly gözenegiň ülşünde birnäçe düwün ýerleşýär. Meselem, göwrüm boýunça merkezleşdirilen gözenek (GS) iki düwünli gözenekdir, ýöne üstler boýunça merkezleşdirilen gözenek (ÜS) – dört düwünlidir. Eger-de çylşyrymly gözenek Braweniň gözenegi bolsa, onda onuň ýönekeý ülüşi, bir atom saklaýan has ýönekeý görnüşde alnyp biliner. Muňa mysal edip 1.3 suratda getirilen üst boýunça merkezleşdirilen gözenege seredip bolar.



1.3. Surat. Dört düwünli gapdal üst boýünça merkezleşdirilen gözenek (punktir boýunça geçirilen)
we oňa degişli bolan bir düwünli ýönekeý gözenek (tutuş çyzyk boýunça geçirilen).

Suratda tutuş çyzyklar bir düwünli ýönekeý gözenege degişlidir.

Emma, gözenegiň bir ýönekeý ülşüni parallel göçürip hemme gözenegi gurup bolmaýar. 1.4a suratda ikiölçegli gözenek umumy görnüşde görkezilen.



1.4. Surat. Bazisli gözenek: *a* – bazisli tekiz gözenek (*OO'* – gözenegiň bazisi); *b* – bazisli göwrüm gözenegi – atomlaryň tetraedrik ýerleşişi bolan almaz görnüşli gözenek.

Şeýle gözenek gurulan ýagdaýynda, ony bir düwünli gözenegiň ülüşi bilen gurmak mümkin däl. Şeýle gözenegi gurmak üçin iki sany bir-birine ýakyn ýerleşdirilen Brawe gözenegini göz öňüne getirip gurup bolar. Bu gözeneklerin bir-birine görä süýşmesi, bazis diýilip atlandyrylýan goşmaça Ā wektoryň üsti bilen görkezilýär. Şeýle görnüşli gözeneklere bazisli gözenekler diýilýär. 1.4a suratda görkezilen gözenegi, 0 we 0' düwünlerden durýan bazisi parallel göçürmeklik bilen alyp bolýar. 1.4b suratda üç ölçegli gözenegiň mysaly hökmünde almazyň gözenegi görkezilen. Bu gözenegi bir-birine görä göwrüm diagonallary boýunça ¼ diagonalyň uzynlygyna süýşürilen iki sany üst boýunça merkezleşdirilen gözenegiň esasynda gurmak mümkin.

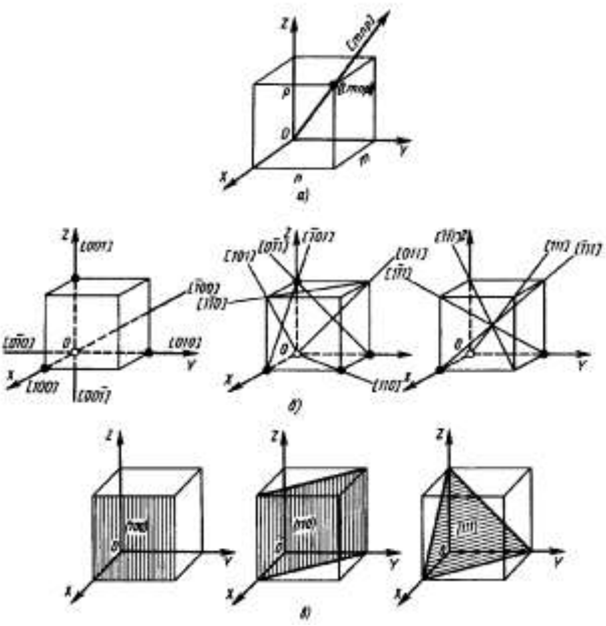
Kristallarda düwünleriň, ugurlaryň we tekizlikleriň bellenilişi.

Kristallik gözenekde islendik düwüniň ýerleşişi üç sany koordinata boýunça tapylýar (x, y, z).

Ýönekeý ýagdaýda:

$$x = ma; \quad y = nb; \quad z = pc \qquad (1.2)$$

bu ýerde a, b, c - gözenegiň häsiýetnamalary. m,n,p – bütiň sanlar. Bu sanlara düwüniň indeksleri diýilip at berilýär we şeýle bellenilýär [[m n p]] (1.5 surat).



1.5. Surat. Kristalda düwünleriň we ugurlaryň indeksi (*a*); kubiki kristalda esasy ugurlaryň indeksi (*b*); kubiki kristalda käbir tekizlikler üçin Milleriň indeksleri (*d*).

Kristallarda ugry görkezmek üçin, koordinatalar başlangyjyndan geçýän göni çyzyk saýlanandyr.

Ugruň indeksleri [m n p] bilen bellenilip, birinji geçýän düwüniniň indeksleri bilen kesgitlenilýär (1.5 surat). Şol sebäpli hem düwüniň indeksleri birbada ugruň indeksleri hem bolup durýar. Çyzgyda kubiki kristallarda esasy ugurlaryň indeksleri getirilen.

<u>Milleriň indeksi.</u>

Goý kristallografiki tekizlik koordinatalar okunda m, n, p kesimleri kessin. Şeýle tekizlik aşakdaky deňleme bilen ýazylýar.

$$x/m + y/n + z/p = 1 \qquad (1.3)$$

Deňligiň hemme böleklerini umumy maýdalowja D getirip, alýarys

$$hx + ky + lz = D \qquad (1.4)$$

Bu erde h, k, l ululyklar - Milleriň indeksleri diýilip atlandyrylýan bütin sanlar. Şeýle indeksler bilen kesgitlenilýän tekizlik (h k l) görnüşde bellenilýär (1.5 surat).

Meselem, eger tekizlik koordinata oklaryny 3, 2, 1-de kesýän bolsa, onda onuň deňlemesi şeýle görnüşde ýazylýar:

$$x/3 + y/2 + z/1 = 1 \qquad (1.5)$$

$$2x + 3y + 6z = 6;$$

Bu ýerde h = 2; k = 3; l = 6.

Şeýle tekizlik (2, 3, 6) görnüşde bellenilýär.

1.2. Kristallarda defektler we olaryň görnüşleri: çyzykly, nokatlanç, üstleýin

Kristallardaky defektler.

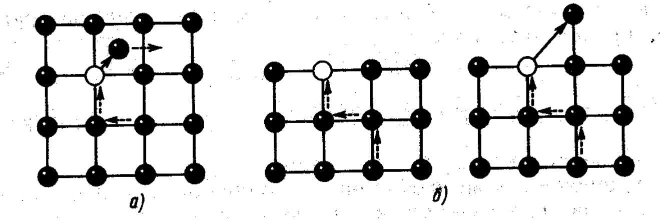
Dogry periodik gurluşy bolan ideal kristallardan tapawutlylykda real kristallar özünde birnäçe dürli defektleri saklaýar. Bu defektler öz gezeginde kristallaryň hemme häsiýetlerine gaty güýçli täsir edýär.

Kristallarda ýüze çykýan defektler birnäçe görnüşe bölünýärler: nokatlanç, çyzykly, üstleýin we göwrümleýin.

Eger-de kristallik gözenegiň haýsy hem bolsa bir düwüninde atom öz ýerinde bolmasa, ýagny haýsy hem bolsa bir sebäbe görä (energiýanyň artyk bolmagy) potensial barýerden geçip düwünleriň arasynda ýerleşen bolsa, onda bu atomyň ýerleşmeli ýerinde boş ýer emele gelýär. Şeýle görnüşde emele gelýän defektlere Frenkeliň defektleri diýilip at berilýär (1.6 surat).

Käbir ýagdaýlarda atomlaryň ýerini ýitirmegi diňe bir kristalyň göwrüminde bolman üstünde bolmagy hem mümkin. Şeýlelikde, kristalyň üstki gatlagynda boş ýer emele gelýär. Bu emele gelýän boş ýerlere Şottki defektleri diýilip at berilýär (1.6

surat). Şeýle defektleriň çeşmesi kristallardaky käbir bar bolan gurluş kemçilikleri bolup bilýar.



1.6 Surat. Frenkel (*a*) we Şottki (*b*) defektleriň ýüze çykyşy.

Kristallardaky defektleriň dykyzlygy, konsentrasiýasy esasan hem temperatura bagly ululykdyr. Sebäbi temperaturanyň artmagy bilen, ýerini taşlap gitmäge energiýasy ýetik bolan atomlaryň sany artýar. Bolsmanyň kanunyna laýyklykda şeýle defektleriň sany,
exp[-U/(kT)]
ululyga göni proporsionaldyr, bu ýerde U - defektiň emele gelmeginiň energiýasy; T - kristalyň termodinamiki temperaturasy. Geçirilen hasaplamalara laýyklykda, kristalyň göwrümindäki defektleriň (Frenkel defektleriniň) sany, eger-de kristalda N düwün we N_1 düwün ara baglanşyklar bar bolsa, onda formulanyň üsti bilen tapylýar.

$$N_F = \sqrt{N \cdot N_1} \cdot \exp\left[-U_F / (2kT)\right]. \quad (1.6)$$

Üst (Şottki) defektleriniň deňagramlykdaky sany:

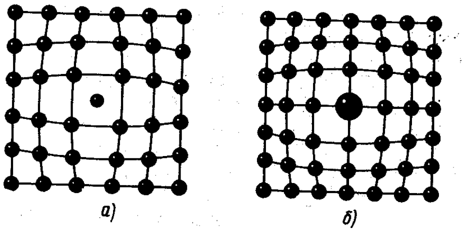
$$N_Ş = N \cdot \exp[-U_Ş/(kT)], \quad (1.7)$$

bu ýerde U_F, $U_Ş$ - Frenkel we Şottki defektleriniň emele gelmeklik energiýalary.

Birmeňzeş düzümli kristallarda Frenkel defektleriniň ýüze çykmaklyk mümkinçiligi gaty kiçi. Sebäbi atomlar diňe bir ýerinden çykman, beýleki atomlary süýşürip aralygyna girmeli. Şeýle defektleriň ýüze çykmaklygynyň mümkinçiligi dürli atomly kristallarda uludyr. Birmeňzeş atomly kristallarda diňe Şottki defektleriniň ýüze çykmaklygynyň mümkinçiligi uludyr.

Garyndylar. Gaty jisimler özleriniň ýokary derejede arassalygyna seretmezden elmydama öz düzüminde garyndylary saklaýarlar. Garyndylar kristallarda öz tebigatyna baglylykda ýaýran görnüşde ýa-da topbak damjajyk görnüşde bolup bilýärler.

Garyndylar kristallarda düwünleriň aralygynda (внедрение) we düwündäki atoma derek olaryň ýerinde (замещение) ýerleşip bilýärler. Garyndylaryň atomynyň diametrine baglylykda kristallik gözenekde deformasiýa ýüze çykýar (1.7 surat).



1.7. Surat. Girizme (*a*) we çalyşma (*b*) garyndy atomlary.

Häzirki zaman tehnologiýasy kristallary 10^{-9}% çenli arassalamaga mümkinçilik berýär. Şeýle arassa kristalda hem 1 sm^3 – göwrümde hem 10^{11} garyndy atomy galýar. Şol sebäpli hem gaty ýokary derejedäki arassa kristallara bolan isleg artýar.

Dislokasiýalar kristallar ösdürilip taýýarlanylanda, plastiki deformasiýada, monokristal bölekleriniň çäklerinde ýüze çykýarlar. Häzirki wagtda birnäçe usuly ulanmaklyk esasynda dislokasiýalary öwrenmek mümkin. Elektron-mikroskopiki usul bilen, ýörite düzülen tehnologiki taýýarlama esasynda öwrenilýär.

Köplenç kislotaly erginleri ulanyp kristaly iýdirmek esasynda defektleriň üsti açylýar. Kristallar kislotaly erginlerde iýdirilende (trawleniýe) ilki bilen defektli we dislokasiýaly ýerler güýçli (çalt) iýilýär. Sebäbi kristalyň defektli ýerleri artykmaç erkin energiýa eýe bolup, olar himiki taýdan gaty işjeň bolýarlar. Şol sebäpli hem kristalyň defektli ýerleri çalt iýilip, defektler iýdirmeden soňra çukurjyklar görnüşinde ýüze çykýarlar. Dislokasiýalaryň mukdar häsiýetnamasy - ýagny dislokasiýalaryň dykyzlygy diýilip kese-kesigiň birlik meýdanyny kesip geçýän dislokasiýalaryň sanyna aýdylýar. Has ýokary derejede struktura taýdan kämil germaniý(Ge)

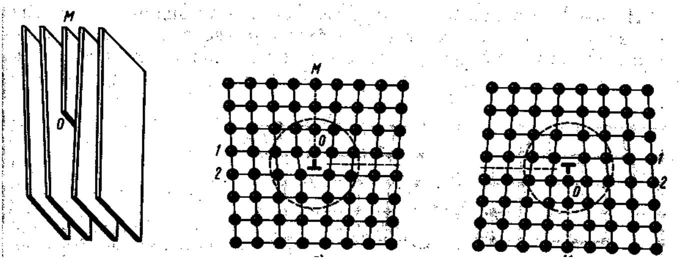
kristalynda dislokasiýanyň dykyzlygy takmynan 10^2-10^3 sm^{-2} töweregidir.

Çyzykly defektler.

Çyzykly defektlere gyra we aýlawly (wintowoý) dislokasiýalar

girýärler.

Gyra dislokasiýasy. Kristallik gözenegiň atomlarynyň tekizliginiň haýsy hem bolsa biri tutuş kristal boýunça dowam etmän, kristalyň içinde üzülsin (1.8 surat).



a b

d

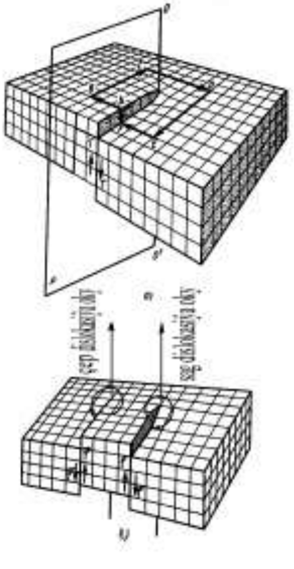
1.8. Surat. Gyra dislokasiýalarynyň shemasy:
a) Kristalyň içinde ýüze çykýan, M – tekizligiň gyrasy, gyra dislokasiýasyny emele getirýär; *b*) O – merkezde položitel dislokasiýaly atomlaryň ýerleşişi; *d*) Şol merkezde otrisatel dislokasiýalar. Dislokasiýanyň ýaýran ýeri punktir bilen bellenen.

Bu tekizligiň gyrasy çyzykly defekti emele getirýär, şeýle defekte gyra ýa-da çyzykly dislokasiýa diýilip at berilýär. 1.8. suratda gyra dislokasiýasyna perpendikulýar ugurda atomlaryň ýerleşişi görkezilendir. Artykmaç atom tekizligi bolan OM tekizlige ekstratekizlik diýilip, onuň üzülýän nokady bolan O nokada dislokasiýa merkezi diýilýär. 1.8b suratda görkezilişi ýaly atom yzygiderligi 1 aşakda ýerleşen atom yzygiderligi 2-ä seredende bir atom artykmaç saklaýar. Dislokasiýa merkeziniň ýakynynda gözenegiň hemişeligi özgeren bolup, dislokasiýa merkezinden daşlaşmak bilen öz adaty ýagdaýyna gelýär. Suratyň tekizligine

perpendikulýar ugurda, dislikasiýa kristalyň içinden doly geçip, onuň üstüne çykýar.

Aýlawly dislokasiýalar.

Daşky güýjüň täsiri netijesinde, P tekizlikde kristalyň bir bölegi beýlekisine seredende süýşsin (1.9 surat). Çyzgydan görnüşi ýaly kristalyň esasy böleginde süýşme diňe bir atom aralygyna deň bolup, biraz aralykdan bu kristalda atomlaryň dogry ýerleşişi saklanýar. OO' çyzygyň ýakynynda ýerleşen atom tekizlikleriniň atomlary bir-birine seredende süýşendirler. Bu süýşme gözenegiň ýerli (lokalnyý) özgermegine getirip, oňa wint görnüşli (aýlawly) dislokasiýa diýilýär. OO' oka dislokasiýa oky diýilýär.



1.9. Surat. Buraw dislokasiýasy üçin Bürgersiň ABCDEF kontury we Býurgersiň b wektory (*a*);
sag we çep buraw dislokasiýalary (*b*).

1.9a suratda Bürgersiň kontury görkezilen. Suratdan görnüşi ýaly bu kontury ýapmaklyk üçin goşmaça $b = \overline{F \cdot A}$ wektory girizmek zerur. $\overline{F \cdot A}$ wektor dislokasiýa okuna parallel bolup oňa Bürgersiň oky diýilip at berilýär. Aýlawly dislokasiýalaryň sag we çep aýlawly görnüşleri bardyr (1.9b surat).

Üst defektleri.

Real kristallar köplenç mozaika görnüşli gurluşa eýedirler. Olar göni gurluşy bolan böleklerden düzülip, bir-birine takmynan paralleldirler. Bu bölekleriň ululygy takmynan $10^{-6} \div 10^{-4}$ sm bolup, olaryň arasynda emele gelýän burçlar birnäçe sekuntdan birnäçe minuda çenli üýtgeýär. Bu bölekleriň bir birine geçýän ýerinde dislokasiýalar emele gelip, olaryň aralygyndaky burçuň artmagy bilen defektleriň dykyzlygy artýar.

Ýerleşme defektleri.

Kristallik gözenekde atomlaryň ýerleşiş tekizliginiň düzgün boýunça bolmalysyndan islendik gyşarmasyna ýerleşme (upakowka) defekti diýilýar. Atom gatlaklarynyň düzgünli ýerleşişiniň bellenilişi atomlaryň ýerleşişiniň yzygiderligi bolup durýar, ýagny: ABCABC…. . Emma kristalyň ösmeginde, ýa-da olaryň deformasiýasynda, atomlaryň ýerleşiş yzygiderliginiň ýa-da atom gatlaklarynyň ýerleşişiniň bozulmagy mümkin, ýagny atomyň *a* gatlagyndan soň *b* gatlaga derek *c* gatlak ýerleşýär. Şeýle ýerleşme defekte aýrylma (wyçitaniýe) görnüşli defekt diýilýär. Ýerleşme defektleriň bulardan başgada birnäçe görnüşiniň ýüze çykmagy mümkin.

Dislokasiýalaryň, defektleriň dykyzlygynyň hasaplanyşy.

Belli boluşy ýaly real kristallaryň göwrüminde we üstünde dürli defektler emele gelýär. Gaty jisimler elektronikasynda, optoelektronikada, fotoenergetikada, ýylylyk öwrüjilerinde we ş.m. dürli kristallary peýdalanmak üçin olaryň göwrümindäki, üstündäki defektleriň dykyzlygyny anyklamaklyk, olaryň emele geliş sebäplerini öwrenmeklik zerur bolup durýar. Defektleriň dykyzlygyny kesgitlemek üçin ýarymgeçiriji plastinasynyň üsti ýa-da kese kesigi ilki tekizlenilip soňra ýylmalanýar we himiki usul bilen arassalanýar, onuň üstki gatlagy dürli kislotalaryň ergini bilen iýdidilýär. Şeýle ýagdaýda defektler has gowy ýüze çykýar, görünýär. Sonra optiki mikroskopyň kömegi bilen belli bir aýratyn alnan meýdanda defektleriň sany tapylýar. Soňra birlik meýdanda näçe defektiň barlygy hasaplanylýar. Şeýle hasaplama bilen tapylan kristaldaky, plastinadaky defektleriň dykyzlygy uly ýalňyşlyga getirmeýär. Bu usul gaty jisim elektronikasynyň tehnologiýasynda epitaksial gatlaklaryň hilini öwrenmek üçin giňden peýdalanylýar.

1.3. Kristallarda nokatlanç defektleriň ýüze çykyşy we dolandyrylyşy

Gaty jisimleriň käbir fiziki häsiýetleri, ýagny dykyzlyk, maýyşgaklyk, gözenegiň ýylylyk sygymy we dielektrik syzyjylygy, kristalyň gözeneginiň kämilligine az duýgur bolup, bu fiziki häsiýetler ideal kristalyň modelinde doly düşündirilýär. Real gaty jisimleriň gözeneginiň periodiki gurluşynda elmydama kadadan çykmalar bolup, olar gurluş taýdan ideal daldirler. Gaty jisimleriň esasy fiziki häsiýetnamalary bolan, elektrik, magnit, optiki, mehaniki, ýylylyk häsiýetnamalary kristalyň struktura taýdan kämilligine örän duýgurdyr, has takygy kristalyň gurluşyna aşa duýgurdyrlar. Gaty jisimleriň kristallik gözeneginiň periodikliginiň islendik bozulmasyna, defekt diýilip at berilýär.

Defektleriň döreýşini seljermeklik we defektleriň materiallaryň fiziki häsiýetnamalaryna täsirini öwrenmeklik, gaty jisimler fizikasynyň esasy meseleleriniň biri bolup durýar. Bu meseläni öwrenmeklik esasan hem ýarymgeçirijiler fizikasy üçin uly ähmiýetlidir, sebäbi ýarymgeçiriji materiallarynyň fiziki häsiýetleri beýleki gaty jisimlar bilen deňeşdirilende defektleriň görnüşine we konsentrasiýasyna baglylykda has ýokary derejede üýtgeýär.

Defektlerin toparlara bölünişi adatça ölçeg häsiýetnamalary boýunça amala aşyrylýar, ýagny defektiň ölçegleriniň makroskopiki dowamlylygynyň ugrunyň sany boýunça kesgitlenilýär. Defektler birnäçe görnüşlere bölünýärler:

1) nokatlanç (nol ölçegli) defektler, kristallaryň gurluş näsazlygy sebäpli ýüze çykyp, gözenegiň aýratyn nokadynda, mikroskopiki uzynlyk ölçeginde her bir ölçeg boýunça gözenegiň birnäçe periodyndan uly bolmadyk aralykda aýratyn ýerleşendir;

2) çyzykly (birölçegli) defektler, haýsy hem bolsa bir ugur boýunça dowamlylygy gözenegiň periodyndan örän uly bolan, beýleki ugurlar boýunça mikroskopiki masştabda bolan (birnäçe atomaralygy derejesinde) - gyra we wint görnüşli dislokasyýalardyr;

3) üstleýin (ikiölçegli) defektler, iki ugur boýunça makroskopiki dowamlylygy bolan defektler – ýagny, däneleriň araçägi (границы зерен), fazaara araçäk, atom gatlaklarynyň ýerleşiş defekti we kristalyň erkin üstüniň defekti;

4) göwrümleýin (üçölçegli) defektler – boşluklar, başga fazalaryň goşulmagy.

Energetiki ýagdaýy boýunça defektler deňagramlykda we deňagramlykda däl görnüşlerde bolup bilýärler. Nokatlanç defektler, gözenegiň ýylylyk yrgyldysynyň netijesinde emele gelip, kristalliki gurluş bilen termodinamiki deňagramlykda bolmak bilen, deňagramlyk şertlerinde hem saklanýarlar. Haçan-da, kristallar fotonlar we ýokary energiýaly bölejiker bilen şöhlelendirilende, deňagramlykda bolmadyk, radiasion defektler diýilip atlandyrylýan, nokatlanç defektler emele gelýär. Kristallarda ýüze çykýän çyzykly, ustleýin we göwrüm defektleri hem deňagramlykda däl defektlere degişli bolup, olar nokatlanç defektler ýaly deňagramlykda bolmadyk şertlerde ýüze çykýarlar, meselem, kristallar emele gelende, ýagny kristallaşma hadysasynda, kristallar termiki ýa-da mehaniki taýdan gaýtadan işlenende ýüze çykýar

Bu bölümiň esasy maksady – kristallarda nokatlanç defektleriň özüni alyp barşyny kesgitleýän fiziki kanunalaýyklyklary öwrenmek we ýarymgeçiriji materiallaryna garyndylary goşmaklyk bilen olaryň elektrofiziki häsiýetleriniň maksatlaýyn özgerdilişine seretmek, ýagny nokatlanç defektleriň emeli döredilişini öwrenmek bolup durýar.

2-nji bap. Gaty jisimleriň zona nazaryýetiniň esaslary

2.1. Zonalaryň elektronlar bilen doluşy. Jisimleriň metallara, dielektriklere we ýarym geçirijilere bölünişi.

Gaty jisimleriň zona nazarýetiniň başdaky düşünjeleri

- 3-nji temada metallaryň elektrik geçirijiliginiň kwant nazarýeti seredilende

bir metalyň tekiz "düýpli" potensial "guty" görnüsli modelinden ugur aldyk. Geçiriji elektronara Fermi – Diragyň statistikasy ulanyldy, ýöne kristalliki gözenegiň položitel ionlarynyň elektrik meýdan döredýändigi hasaba alynmady. Mundan başga-da, metallaryň kwant nazarýetinde geçiriji elektronlaryň döreýşiniň nähili düşünilmegi baradaky sorag ara alyp maslahatlaşýlmady. Näme üçin metallaryň kristallarynda erkin elektronlar bar, dielektrikleriň kristallarynda bolsa ýok, hatda gaz halynda hemme maddalar dielektrigem bolsalar. Gaty jisimleriň kwant nazarýeti näme üçin aşgar metallaryň, mysal üçin atomlarynyň bir sany walent elektrony bolan natriý – geçiriji almazyň, bolsa uglerodyň dört walent elektronlarynyň barlygyna garamazdan – dielektrik häsiýetine eýediklerini düşündirmelidi. Galyberse-de nazarýet näme üçin udel elektrik geçirijilikleri uly çäklerde üýtgeýän we temperaturanyň artmagy bilen eksponensial kanun boýunça çürt-kesik artýan maddalaryň uly toparynyň – **ýarymgeçirijilerdigini** düşündirmelidi.

- Bu we başga-da köp soraglara gaty **jisimleriň zona nazarýetinde** jogaplar

tapyldy. Bu nazarýetde kristalliki gaty jisim kadaly periodiki gurluş ýaly seredilýär, onda ionlar elektriki meýdanyny döredýär. Mesele bu meýdanda elektronlaryň özlerini alyp baryşlaryny ýazyp beýan etmekdedir. Munuň ýaly köp bölejikler ulgamy üçin Şredingeriň deňlemesini takyk çözmek mümkin dädir. Meseläni çözmegiň göräýmäge biri-birine gapma-garşý, ýöne birmeňzeş netijä getirýän iki usuly bardyr. Birinji usul - ýakynlaşma, baglanşan elektronlardan ugur alýar (berk baglanşyk ýakynlaşmasy). Bu usulda köp sanly izolirlenen atomlaryň toplumy bar, olaryň her biriniň elektronlary özleriniň diskret energetiki derjeleriniň ulgamyna eýedirler diýip düşünilýär. Elektronlaryň "**öz**" atomlary bilen baglanyşyk energiýasy

olaryň kristalliki gözenekdäki hereketiniň kinetiki energiýasyndan has uly hasap edilýar. Izolirlenen atomlaryň ýakynlaşmagy bilen we olardan kristal emele gelende energetiki derejeler bilen näme bolup geçýändigine seredilýär. Elektronlaryň öz atomlary bilen baglanşyklary şeýle güýçli, atomlar özleriniň ölçegleri bilen deňräk aralyga golaýlaşanlarynda diňe walent elektronlar bir atomdan beýleki atoma geçýär.

- Ikinji usul erkin elektronlaryň ýakynlaşmasyndan ugur alýar (gowşak

baglanşyk ýakynlaşmasy). Bu usul elektronlaryň gözenek bilen özara täsirleri kinetik energiýalaryndan örän azdyr diýen pikire esaslanýar. Bu elektronlary erkin ýaly kabul etmäge we ýöne elektronlaryň kristalliki gözenegiň periodiki meýdanynda hereket edýändigini hasaba alyp erkin elektronlar üçin Şredingeriň deňlemesinden peýdalanmaga mümkinçilik berýär.

Güýçli baglanyşyk ýakynlaşmasynda kristallarda energetiki zonalar

- Izolirlenen atomlarda energiýanyň diskret enrgetiki derejeleri $W_{n,l}$ bardyr. Olar

n baş we *l* orbital kwant sanlara bagly hasaplanýar. Şeýle hem *m* magnit we m_s spin kwant sanlarynyň dürli bahalaryna degişli energetiki derejeler gabat gelýärler diýip hasap edilýär. Adatça energetiki derejeler *m* we m_s kwant sanlar boýunça birmeňzeş energiýaly halatda diýip aýdýarlar.

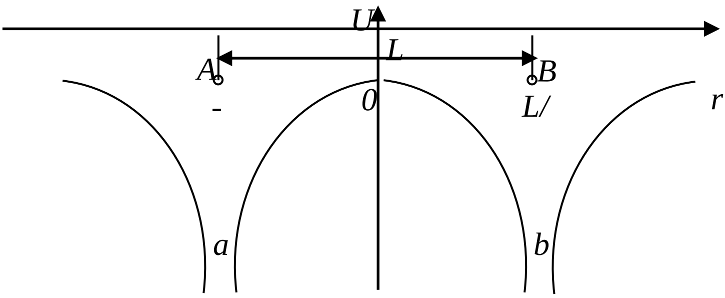
Oýandyrylan ýagdaýlarda bolýan atomlarda elektronlaryň energetiki derejeleri, energiýa we wagt üçin kesgitsizlik gatnaşygy bilen baglanşan, çäkli $\Delta W_{n,\ell}$ ine eýedir. Şu formulanyň ikinjisine laýyklykda $\Delta W_{n,\ell}\tau_n \geq h$.

Atomyň oýandyrylan ýagdaýdaky ýaşaýyş wagty τ_n elektronyň bu ýagdaýda ýaşaýyş wagty bilen gabat gelýär:

$\tau_n \approx 10^{-8} s.$ Bu ýerde τ_n-niň ululygyň we energetiki derejäniň tebigy ini $W_{n,\ell}$ - hakyndaky sorag ara alnyp maslahatlaşyldy:

$$W_{n,\ell} \sim \frac{h}{\tau_n} \approx 10^{-25} J \approx 10^{-5} \div 10^{-6} eW.$$

Görňüşi ýäly bu in *~1 eW* tertibi bolan derejeleriň arasyndan örän kiçidir.

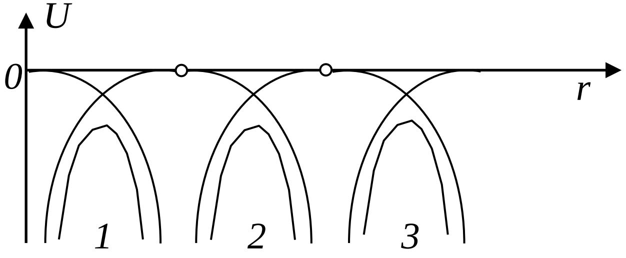


2.1. surat

- Eger izolirlenen goňşy atomlar *A* we *B* biri birinden *L>>d* aralyga

uzaklaşdyrylan bolsa, bu ýerde *d* – atomyň diametri, onda walent *a* we *b* elektronlar üçin goňşy atomlardaky potensial çukurlar örän giňdir, elektronlaryň olaryň içinden geçmeginiň ähtimallygy nola deň diýen ýalydyr. Elektronlar öz atomlaryna, “daňylandyrlar” we kristalda erkin elektronlar ýokdur (2.1-nji surat).

Atomlar golaýlaşdyrylanda, mysal üçin kristalliki gözenegi simmetriýasyny bozman gysylanda atomlaryň arasyndaky özara täsir artýar. Haçanda *L* – aralyk kristalliki gözenegiň parametri *d* – bilen deňeşdirer ýaly $(L \approx d)$ ululyga çenli kiçeldise, atomlaryň özara täsiri olaryň elektriki meýdanlarynyň örtülmesine (kesişmesine) getirýär. Goňşy atomlary araçäklendirýän potensial egriler az-kem biri-biriniň üs tüne düşýär we eleketronlar üçin 1- 2 görnüşli potensial egrilerini berýär (2.2-nji surat).



2.2. Surat

Çyzgydan walent elektronlar üçin potensial çukuryň daralmasy we peselmesi bolup geçýändigi görünýär. Bu şertlerde elektronyň öz atomlaryndan başga atoma “geçmegine” kömek berýän (tunnel) effekti möhüm rol oýnaýar.

- Hasaplamalary ýönekeýleşdirmek üçin potensial çükury gönüburçly hasap

edeliň. Onda çukuryň durulygyny aşakdaky formula boýunça hasaplamak mümkindir

$$D \sim exp\left[-\frac{2d}{h}\sqrt{2m(U_0 - W)}\right].$$

Biziň ýagdaýymyz üçin potensial çukuryň (päsgelçiligiň) ini $d \sim 10^{-10}$ m. Onda $U\text{-}W=6eW \sim 10^{-18}J$ bolanda hasaplamalar çukuryň durulygy üçin $D \approx 0.05$ netijä getirýär.

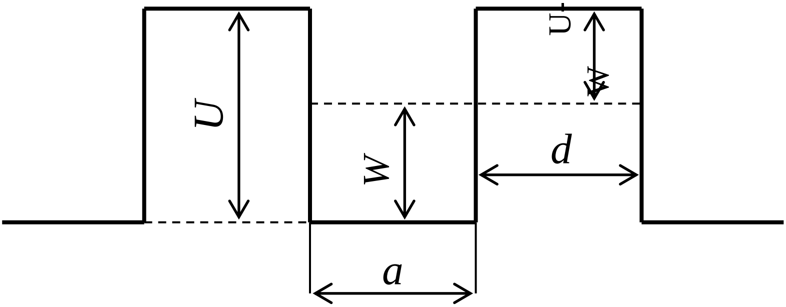
Walent elektronyň potensial çukuryň içinden syzyp geçmeginiň ýygylygyny tapalyň. Çukuryň diwaryna elektronyň wagt birligindäki urgularynyň sany $n=\upsilon/2a$, bu ýerde υ -elektronyň atomdaky hereket tizligi ($\upsilon \sim 10^6$ m/s), $a \sim 10^{-10}$ m – elektronyň bolýan potensial çukurynyň ini (43.3-nji çyzgy). Elektronyň potensial çukuryň içinden syzyp geçme ýygylygy

$$\nu = Dn \approx \frac{\upsilon}{2a} exp\left[-\frac{2d}{h}\sqrt{2m(U_0 - W)}\right]. \quad (2.1)$$

Hemme ululyklaryň san bahalaryny goýup alarys $\nu \sim 510^{14} s^{-1}$. Berlen atomdaky walent elektronyň ýäşaýyş wagty τ ýygylyga ters ululykdyr:

$$\tau = \frac{1}{\nu} \sim 2 \cdot 10^{-15} s.$$

Görnüşi ýaly, bu ýagdaýda τ walent elektronyň izolirlenen atomdaky oýandyrylan ýagdaýdaky ýaşaýyş wagtyndan ýedi derejä kiçelýär. τ -nyň munuň ýaly bahalarynda walent elektronlaryň kesgitli atomlara degişlidi-



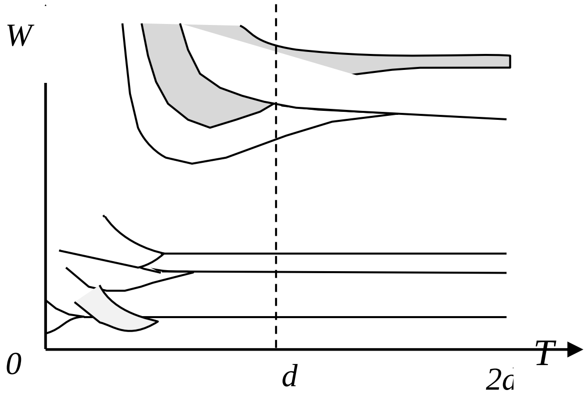
2.3. Surat

gi barada aýtmagyň manysy ýokdyr. Olar “umumylaşdyrylan”, bileleşen bolýarlar we kwant gazyny emele getirýärler. Bu elektronlar kristal boýunça hereket edip bilýärler.

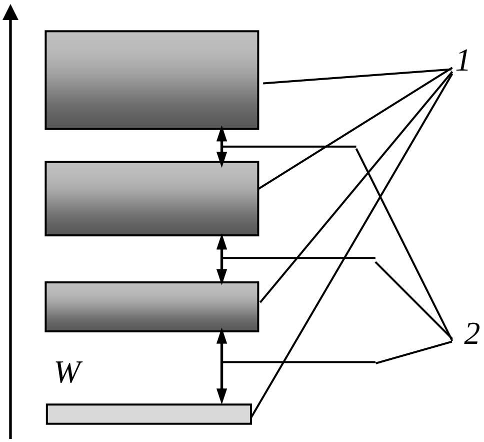
- Kristalda atomlaryň özara täsirleri netijesinde ýaşaýyş wagtynyň çürt-kesik

kemelmegi bilen bagly bolan elektronyň ΔW energetiki derejesiniň deňlemesini tapalyň. Kesgitsizlik gatnaşygy boýunça

$\Delta W \approx h/\tau \approx 3 \cdot 10^{-19} \boldsymbol{J} \approx 2eW$



2.4. surat



2.5. surat

Izolirlenen atomdaky walent elektronyň insiz energetiki derejesi kristalda inli zolaga –ini elektron-wolt birligi tertipli elektronlaryň **energiýasynyň gadagan däl bahalarynyň zonasyna** giňelýär (4.5-nji surat). Gadagan däl energetiki zonalar (1) biri-birlerinden elektronlaryň energiýasynyň gadagan bahalarynyň zonalary (2) bilen bölünendirler. Izolirlenen atomda degişli derejedäki $W_{n,\ell}$ energiýasy näçe uly bolsa gadagan däl zona şonçada inlidir. Elektronlaryň gadagan däl zonalaryň çägindäki energiýalarynyň mümkin bolan bahalary kwantlanandyrlar, ýagny bölek-bölekdirler (diskretdirler), olaryň umumy sany bolsa çäklidir. N atomlardan durýan kristalda izolirlenen atomyň $W_{n,\ell}$ energiýasynyň derejesine, her birinde ikiden köp däl, antiparallel spinli elektronlar bolup bilýän, $(2l+1)N$ diskret derejelerden ybarat bolan zonalar degişlidir.

- Atomyň içki gabygynyň elektronlary üçin elektronyň bir atomdan beýleki

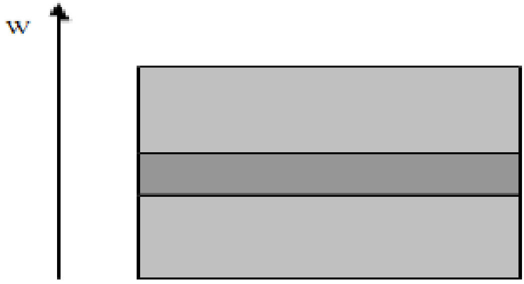
atoma syzyp (tunnel) geçişiniň ähtimallygy örän kiçidir. Bu potensial çukuryň durulygynyň kiçelmegi bilen baglydyr, netijede elektronyň potensial çukur arkaly syzyp geçmeginiň v ýygylygy örän kiçelýär. Mysal üçin, esasy ýagdaýda Na atomynyň elektrony ücin

$\nu \approx 10^{-27} s^{-1}$ we degişlilikde elektronyň berlen atomyndaky orta ýaşaýyş wagty $\tau \approx 10^{20}$ ýyl. Diýmek, kristallarda atomlaryň içki gabyklarynyň elektronlary hem "öz" atomlary bilen izolirlenen atomlardaky ýaly berk baglanandyrlar. Kristallarda bu elektronlaryň energetiki derejeleri hem ýeke bir atomdaky ýaly insizdir.

Metallar, dielektrikler we ýarymgeçirijiler

- Zona nazaryýetinde gaty jisimleriň dürli görnüşleri elektrik häsiýetleri boýunça,

energyýanyň gadagan we gadagan däl zonalarynyň ýerleşişleriniň häsiýetleri bilen tapawutlanýarlar. Energiýanyň gadagan däl zonalarynyň ininiň izolirlenen atomdaky elektronyň $W_{n,\ell}$ energiýasynyň artmagy bilen artýandygyny, gadagan zonalaryň inleriniň bolsa kiçelýändigini belläliň. Izolirlenen atomlaryň elektronlarynyň ýeterli derejede ýokary energiýa derejeleri üçin olardan emele gelen energetiki zonalar biri-birlerini örtýärler. Gaty jisimleriň zona nazaryýetinde olaryň dürli görnüşleriniň elektrik häsiýetleriniň dürlidigi gadagan zonalarynyň ini we gadagan däl energetiki zonalarynyň doldurylyşynyň dürlidigi bilen düşündirilýär. Gadagan zonalaryň gadagan däl zonalary bölmekleri ýa-da, eger gadagan däl zonalar biri-birlerini örtýän bolsalar umuman ýok bolmaklary mümkindir. 2.6 suratda aşaky gadagan däl zona ýokarky gadagan däl zona bilen örtülendir. **Garyndy** zona emele gelýär.



2.6. surat

- Izolirlenen atomda gadagan däl kwantlanan energetiki derejeler elektronlar

bilen doldurylan ýa-da boş bolup bilerler. Degişlilikde gaty jisimde energetiki zonalar dürli doldurylyşa eýe bolmaklary mümkindir.

Aýratyn atomda boluşy ýaly elektronlar bir energetiki derejeden başgasyna geçip bilýärler, kristallarda elektronlar bir energetiki zonadan başgasyna geçip bilýärler, şeýle hem şol bir zonanyň çäginde geçişler etmekleri mümkindir. Elektronyň aşakdaky energetiki zonadan ýokarky goňşy zona geçmegi üçin gadagan zonanyň inine deň energiýa, ýagny birnäçe elektron – wolta golaý energiýa zerurdyr.

- Gadagan däl zonanayň käbir energetiki derejesinde bolýan elektronyň

nergiýäsynyň güýjenmesi E bolan elektriki meýdanynyň täsiri astynda üýtgemesini kesgitläliň. Elektronyň erkin ylgaw ýolunda eýe bolýan energiýasy $\Delta W \sim eE\langle\lambda\rangle$. Kristalda elektronyň erkin ylgaw ýoly $\langle\lambda\rangle \sim 10^2 d \sim 10^{-8} m$, bu ýerde *d* -kristalliki gözenegiň periody ($d{\sim}10^{-10}$ *m*). Adaty tok çeşmelerine degişli bolan güýjenmesi $E{\sim}10^5 W/m$ elektrik meýdanynda $\Delta W \sim 10^{-3} ev$. Bu goňşy gadagan däl zonalary **bölýän gadagan** zonalaryň ininden has kiçidir. Şeýlelikde şunuň ýaly elektriki meýdanynyň täsiri astynda elektronlar diňe zonalaryň içinde geçişleri edip bilýärler. Temperaturanyň artmagy elektrona, onuň ýokarda ýerleşen gadagan däl zona geçmegi üçin ýeterli bolan energiýanyň berilmegine getirýär. Şunuň bilen bir hatarda ýylylyk bilen oýandyrma elektronlaryň zonalaryň içinde geçiş etmeklerine getirýär.

- Gaty jisimiň elektrik geçirijiliginiň zerur şerti bolup, daşky güýçleriň elektrik

meýdanynyň elektronlary geçirmegi üçin, gadagan däl zonada boş energetiki derejeleriň bolmagy durýar.

Elektronlar bilen doly doldurylmadyk ýa-da boş (T=0K-de) zona geçiriji zona diýilýär.Elektronlar bilen doly doldurylan, iň ýokary zona (T=0K-de) walent zona diýilýär.

Eger geçiriji zona doly doldurylmadyk bolsa we elektronlar bilen eýelenmedik ýokarky boş derejeleri saklaýan bolsa, onda gaty jisim geçirijidir. Mysal üçin, metalliki natriýde geçiriji zona ýarysyna çenli doldurylandyr (4.7 – nji surat), muňa Na-ň izolirlenen

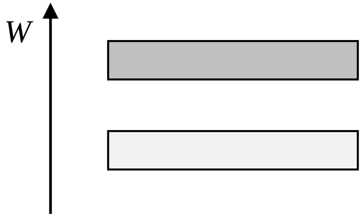
atomyndaky onbirinji walent elektronyň ýarysyna çenli doldurylan ýokarky oýandyrylan energetiki derejesi degişlidir. Gaty jisim geçiriji bolýar. Eger zonalaryň kesişmesi bar we garyndy zonalar emele gelen bolsa, özem aşakky zona
doldurylan, ýokarky bolsa boş, emma aşaky bilen kesişýär (4.7-nji surat).

2.7. surat

Aşgar – ýer metallary munuň ýäly geçirijileriň mysaly bolup bilýärler.

- Zona nazarýeti näme üçin metalyň walentliginiň artmagy, ýagny bir atoma

düşýän “erkin” elektronlaryň sanynyň artmagy degişlilikde elektrik geçirijiliginiň artmagyna getirmeýändigini düşüňdirmäge mümkinçilik berdi. Mysal üçin, üç walentli alýuminiň udel elektrik geçirijiligi bir walentli misiňkä garanda iki esse golaý azdyr. Gaty jisimiň elektrik geçirijiligi walent elektronlaryň sanyna däl-de, geçiriji zonadaky elektronlaryň sanynyň bu zonadaky energetiki derejeleriniň umumy sanyna gatnaşygyna bagly eken.



2.8. surat

Gaty dielektriklerde energetiki zonalar *kesişmeýärler*, özem walent zona geçiriji zonadan şertli *2 eW* – den köpräk energiýa aralygyna bölünip aýrylandyr. Kristalliki nahar duzy NaCl munuň ýaly jisimiň mysalydyr. NaCl -yň molekulasynda Na -niň atomynyň

däsky (walent) elektrony Cl -yň daşky gabygyna geçýär. Netijede doly doldurylan elektron gabykly Na^+ we Cl^- ionlar emele gelýärler. Şu sebäpli NaCl -yň kristalynda hloruň walent zonasy we ýokarda ýatýan natriýniň ionynyň geçiriji zonasy (4.8 – nji çyzgy), Na^+ we Cl^- bu zonalaryň “aralygy” *6 eW* – a deň bolar ýaly ýerleşýärler. Diýmek daşky elektrik meýdany elektronlary Cl^- ionyň doly doldurylan
zonasyndan Na^+ ionyň boş geçiriji zonasyna geçirip bilmeýär.

- Gaty dielektriklerde elektronlar kristal boýunça ýylylyk tizlikleri bilen süýşüp

bilýärler. Ýöne bu hereket tertipsizdir we elektronlaryň ugrukdyrylan hereketini – elektriki toguny döretmeýär. Şu sebäpli dielektrikleriň kristallaryndaky elektronlary sözüň käbir manysyndan metallardakydan erkinräk hasap etmelidir: daşky elektrik meýdany olary kesgitli bir ugurda hereket etmäge mejbur edip we elektrik toguny döredip bilmeýär. Şunlukda, dielektrikleriň gurluşlary hakyndaky häzirki zaman düşünjeler dielektrikleriň klassyky nazarýetiniň esasyny düzýän baglanan zarýadlar düşünjesinden düýpgöter tapawutlanýar.

<u>Ýarymgeçirijileriň hususy geçirijiligi</u>

- Udel garşylygy 10^{-6} - 10^{-8} *Om·m* bolan metallar we udel garşylygy $10^{-8} \div 10^{-13}$

Om·m bolan dielektrikleriň arasynda ýarymgeçirijilere degişli, udel garşylyklary 10^{-5} –den 10^{-8} *Om·m* –e çenli aralykda üýtgeýän köp materiallar bardyr.

Bizi gurşap alan tebigatyň hemmesi diýen ýaly ýarymgeçiriji maddalardan ybaratdyr. Metallaryň oksidleri, sulfidler, telluridler we köp metallaryň selenidleri ýärymgeçiriji häsiýetine eýedirler. D.J.Mendeleýewiň periodiki sistemasynda ýarymgeçirijiler 4.9-njy suratda görkezilen elementleriň jebs toparyny emele getirýär.Ýarymgeçiriji elementlerden çepde we aşakda metallar, sagda we **ýokarda gaty** ýägdaýda dielektrik bolan elementler ýerleşýärler. Adaty ýarym geçirijilere germaniý kremniý we tellur degişlidir.

Germaniý – giňden ulanylýan ýarymgeçiriji elementleriň biridir. Ol elementleriň periodiki sistemasynyň IV toparynda we IV periodynda ýerleşendir. Onuň atomynyň 32 elektrony daşky gabykda

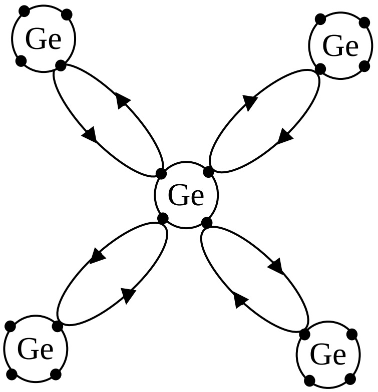
dört walent elektron ýerleşer ýaly paýlanandyr. Germaniýniň kristalynda goňşy

5 B 1,1 **BOR**	6 C 5,2 **UGLEROD**			
	14 Si 1,1 **KREMNIÝ**	15 P 1,5 **FOSFOR**	16 S 2,5 **KÜKÜRT**	
	32 Ge 0,72 **GERMANIÝ**	33 As 1,2 **MY ŞÝAK**	34 Se 1,7 **SELEN**	
	50 Sn 0,1 **GALAÝY**	51 Sb 0,12 **SURMA**	52 Te 0,36 **TELLUR**	53 I 1,25 **ÝOD**

2.9. Surat

atomlaryň elektronlary *T=0 K* -de arassa germaniýde “erkin” elektronlar ýok ýaly himiki ýada kowalent baglanşyklary (2.10 – njy surat) emele getirýär. Germaniý tebigatda seýrek we gymmat bahaly elementdir.

Hazirkizaman ýarymgeçiriji tehnikasynda kremniý uly ähmiýete eýedir. Onuň atomynyň 14 elektrony germaniýdäki ýaly daşky gabygynda ýerleşer ýaly paýlanandyr. Olar goňşy atomlaryň elektronlary bilen himiki baglanyşygy emele getirýärler.



2.10. Surat

- *Ýarymgeçiriji garyndysyz diýip aýdylýar, eger ol himiki taýdan ideal arassa*

we ideal dogry kristalliki gözenegi bar bolsa. Onuň geçirijiligine ýarymgeçirijiniň hususy geçirijiligi diýilýär.

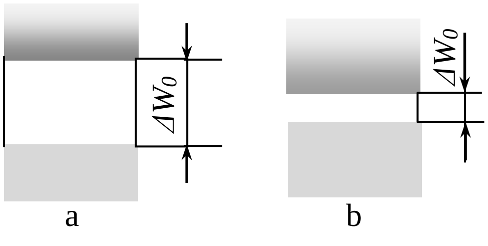
Arassa ýarymgeçirijilerde hususy geçirijiligiň döremegi üçin elektronlary walent zonadan geçiriji zona “geçirmek” zerurdyr. Munuň üçin iň bolmanda gadagan zonanyň inine deň bolan energiýany sarp etmek gerekdir. Bu ululyk ýarymgeçirijileriň elektrik häsiýetiniň möhüm häsiýetnamasydyr we hususy geçirijiligi işjeňleşdiriş energiýasy diýilýär (kremniý üçin ol *1.1eW*). Ýarymgeçiriji elementleriň işjeňleşdiriş energiýasy (elektronwoltlarda) 2.9-njy suratda tegeleklerdäki sanlaryň üşti bilen görkezilen.

- Ýarymgeçirijileriň garşylygynyň temperaturanyň artmagy bilen güýçli

kiçelmegi käbir duýgur enjamlarda ulanylýar. Bu ýagdaýda olar özlerini metallara ters alyp barýarlar.

Gaty jisimlerde şular ýaly häsiýetleriň mümkinligini zona nazarýeti düşündirdi. Eger kristallyň elektronlar bilen, doly doldurylan ýokarky energetiki zonasy iň ýakyn erkin (boş) zonadan energetiki aralyk bilen bölünen bolsa, onda munuň ýaly jisim pes temperaturalarda dielektrikdir.

Temperaturanyň artmagy bilen ýylylyk oýandyrmasy walent zonanayň ýokary araçäginde ýerleşen elektronlary geçiriji zona geçirmegi mümkindir.



2.11. surat

(2.11)-nji suratda dielektrigiň (a) we ýarym geçirijiniň (b) energetiki zonalarynyň ýerleşişi görkezilen. Temperaturanyň artmagy bilen ýylylyk oýandyrmasy netijesinde ýarymgeçirijiniň geçirijiliginiň döremeginde gatnaşýän, geçiriji zona geçýän

elektronlaryň sany artýar. Şu sebäpli temperaturanyň artmagy bilen ýarymgeçirijiniň geçirijiligi artýar.

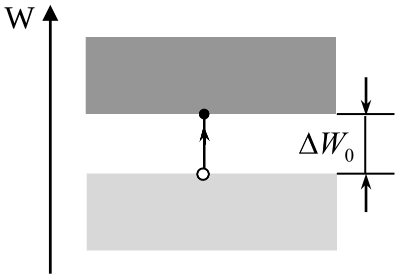
- Eger elektrik taýdan neýtral maddada elektronlaryň birisi öz ýerini taşlap başga

ýere, mysal üçin başga iona geçse, onda onuň taşlap giden ýerinde položitel zarýadyň artykmaçlygy emele gelýär, ýa-da "položitel deşijek" döreýär. Elektron tarapyndan boşadylan ýere ("deşijege") goňşy elektron süýşmegi mümkin, bu "položitel deşijegiň" süýşmegi bilen deňgüýçlidir: ol elektronyň giden täze ýerinde peýda bolýar. Mysal üçin, eger teatrda iň çetki sag ýer boş bolsa we tomaşaçylar yzygiderli boş ýere geçip otursalar, boş ýer tomaşaçylaryň garşysyna sagdan çepe süýşýän ýalydyr.

Ýagny, ýärym geçirijileriň "deşijekleriň" süýşmekleri bilen bagly elektrik geçirijiligine deşijekli geçirijilik diýip aýtmak kabul edilendir.

- Şunlukda elektronyň walent zonadan geçiriji zona geçmegi (onuň iň

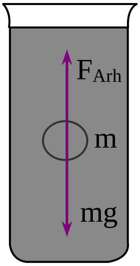
ýokarysyna golaýdan), (2.12 – nji surat) we walent zonada "položitel deşijegiň" döremegi, ýarymgeçirijiniň elektrik geçirijiliginiň döremegine mümkinçilik peýda bolýar. Daşky elektrik meýdany bar bolsa bu mümkinçilik amala aşýar. Kristalda zarýad äkidijilere (elektronlara) diňe



2.12. surat

daşky elektriki meýdany däl-de, eýsem kristalyň içki periodiki elektrik meýdany hem täsir edýär. Kristalyň meýdanynyň täsirini elektronyň effektiw massasy m* düşünjesini girizmek ýaly yoly bilen hasaba almak mümkindir. Bu massa elektrona kristallyň içki

meýdanynyň täsiri hasaba alnan we m* effektiw massaly elektron diňe daşky maýdanyň täsiri astynda hereket edýär diýip hasaplap bolmalydyr.



2.13. surat

- Elektronyň m*effektiw massasy düşunjesini mehaniki meňzeşlikde

düşündirmek mümkindir. ρ_0 dykyzlykly suwuklykly gapda $P=mg$ agyrlyk güýjüniň täsiri astynda ρ dykyzlykly şarjagaz hereket edýär diýeliň (2.13 – nji surat). Şarjagaza agyrlyk güýjünden başga içki güýjüň roluny ýerine ýetirýän arhimet güýji täsir edýär. Nýutonyň ikinji kanuny boýunça

$$\boldsymbol{ma} = P + F_{arh} = mg - m\rho_0 g/\rho = mg(1 - \rho_0 / g).$$

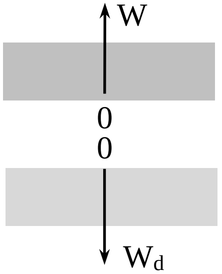
Hereket diňe agyrlyk güýjüniň täsiri astynda bolup geçýär diýip hasap eder ýäly $m^* = \dfrac{m}{\rho_0 / g}$ effektiw massany girizmek mümkindir:

m*a=P=mg

bu ýerde $m^* = \dfrac{m}{1 - \rho_0 / g}$

Görňüşi ýaly elektriw massa ρ_0 *we* ρ dykyzlyklaryň gatnaşygyna baglylykda položitel ýa-da otrisatel bolup bilýär. Elektronyň m* effektiw massasyny girizmegiň oňaýlygy elektronyň energetiki ýagdaýy üýtgände ol hemişelikmi ýa-da hemişelik däldigine baglydyr. Geçiriji zonanyň “düýbündäki” ($m^*<0$) elektronlar üçin $m^* \approx$ hemişelik bolýandygy mälim boldy.

Ýarymgeçirijiniň walent zonasynda elektrik meýdanynyň täsiri astynda hereket edýän ummasyz köp sanly elektronlaryň hereketini kwazibölejikleriň – dessejikleriň kömegi bilen ýazyp beýan etmek amatlydyr. Walent zonadaky boşluk ýagdaýy san taýdan deň alamatlary boýunça gatnaşykly zarýadlary, effektiw massalary, spinleri we başga häsiýetnamalary $q_e + q_d = 0;\ m_e^* + m_d^* = 0$ ýagny $q_\alpha = e > 0$, $m_\alpha^* + m_e^* > 0$ bolan: iki bölejigiň toplumy – elektron we deşijek ýaly seretmek mümkindir.



2.14. surat

Walent zonanyň hemme boş ýerlerine elektronlaryň ýerleşdirilmegi bu zonany geçirijilik diňe geçiriji zonadaky elektronlar we walent zonadaky deşijekleriň hasabyna bolup geçýän diýip hasap edip bolar ýaly zona öwürýär. Daşky elektrik meýdanynda geçiriji zonadaky elektronlar E wektoryň güýjenmesiniň tersine, deşjekler bolsa E wektoryň ugruna hereket edýärler.

Mundan beýläk elektronlaryň energiýasy W_e-ni geçiriji zonanyň düýbünden, deşijekleriň elengiýalary W_d-ni walent zonanyň iň ýokarysyndan (2.14-nji surat) hasap ederis.

Deşijegiň energiýasynyň artmasyna onuň walent zonada aşak düşmesi ýagny boş ýeriň aşak düşmesi degişlidir.

- Ýarymgeçirijiniň hususy geçirijiliginde toruň dykyzlygy elektronlaryň we

deşijekleriň toklarynyň jeminden durýar:

$$J = J_e + J_d \qquad (2.1')$$

Elektronlaryň we deşijekleriň biri – birlerine deň sanlaryny $n_{oe}=n_{od}=n_o$ we elektronlaryň we deşijekleriň tertipleşdirilip ugrukdyrylan hereketleriniň birliklerini $<V_e>$ we $<V_d>$ bilen belläliň. Onda

$$J_e=e\,n_{oe}<V_e>,\ J_d=e\,n_{od}<V_d>.$$

Eger elektronlaryň we deşijekleriň süýşijilikleri U_e we U_d –ni geçirsek $<U_e>= U_eE,\ <U_d>= U_dE,$

Onda

$$J=en_0\,(U_e+U_d)E. \qquad (2.2)$$

Bir hususy geçirijilik üçin Omuň kanunynyň differensial görnüşini aldyk. Udel elektrik geçirijiligi

$$\gamma = en_0(u_e+u_d). \qquad (2.3)$$

Ýarymgeçirijiniň hususy geçirijiliginde zarýad äkidijileriň sany n_0-y tapalyň. Otag temperaturasynda n_0 uly däl, sebäbi husysy geçirijiligi işjeňleşdiriş energiýasy $\Delta W_0 >> kT$. Şu sebäpli geçiriji zonadaky elektronlar we walent zonadaky deşijekler birmeňzeş energiýaly haldaky gazlar däl we olar üçin (2.21) formula boýunça birmeňzeş energiýaly halatyň ululygy kiçidir:

$e^{\frac{\mu_e}{kt}} << 1$ we $e^{\frac{\mu_d}{kt}} << 1$. Bu ýerde $\mu_e\ we\ \mu_d$ -elektronlaryň we deşijekleriň himiki potensiallary. Elektronlar we deşijekler üçin formula boýunça Fermi – Diragyň paýlanma funksiýasy:

$$f_e = \frac{1}{e^{(W_e-\mu_e)/kt}+1} \approx e^{(W_e-\mu_e)/kt}$$

$$f_d = \frac{1}{e^{(W_d-\mu_d)/kt}+1} \approx e^{(W_d-\mu_d)/kt}$$

Geçiriji zonadaky elektronlaryň sanyny kesgitlemäge girişeliň. Geçiriji zonadaky, energiýanyň W_e – den W_e+dW_e –e çenli aralygyna degişli elektronlaryň sany dn_0 formulalara laýyklykda

$$dn_0 = \frac{1}{v} f_e \frac{dg}{dW_e} dW_e,$$

$$\frac{dg}{dW_e} = \frac{4\pi v}{h^3}(2m_e^*)^{\frac{3}{2}}\sqrt{W_e}, \qquad (2.4)$$

Şu sebäpli

$$dn_0 = \frac{4\pi}{h^3}(2m_e^*)^{\frac{3}{2}}\sqrt{W_e exp(-\frac{W_e\mu_e}{kT})dW_e}$$

(2.5)

Walent zonadaky deşijekler üçin aňlatma hem ýokarka meňzeşlikde alynýar:

$$n_{od} = \frac{2}{h^3}(2\pi m_d^* kT)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\mu_d}{kT}}$$

(2.6)

Zarýad äkidijileriň sanyny hususy geçirijiligi işjeňleşdiriş energiýasy ΔW_0 arkaly aňlatmak üçin onuň bilen elektronlaryň we deşijekleriň himiki potensiallaryny baglanyşdyrmak gerekdir.

- Walent zonada

$$f_d = 1 - f_e = 1 - \frac{1}{e^{(W_e-\mu_e)/kT}+1} = \frac{e^{(W_e-\mu_e)/kT}}{e^{(W_e-\mu_e)/kT}+1} = \frac{1}{e^{-(W_e-\mu_e)/kT}+1}.$$

$f_d + f_e = 1$ deňlik ($T=0$ K-de) ýägdaýlary doldurma funksiýasynyň meýdanyndan gelip çykýar. Her bir energetik ýagdaýda elektron ýa-da erkin boş ýer – deşijek bardyr, bu ýerden ýokarda ýazylan deňleme gelip çykýar. Başgaça,

$$f_d = \frac{1}{e^{\frac{(W_d-\mu_d)}{kT}}}.$$

Diýmek, $W_d + \mu_d = -(W_d - \mu_d)$. Galyberse-de walent zonada

$W_d = -W_e - \Delta W_0$, ýagny

$W_d + W_e = \Delta W_0$ we $\mu_d = -(\mu_e + \Delta W_0)$. (6) formulany aşakdaky ýaly ýazmak mümkindir:

$$n_{0d} = (\frac{2}{h^3})(2\pi m_d^* kT)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-\Delta W_0}{kT}} e^{\frac{-\mu_e}{kT}}$$

(2.6')

$n_{oe}=n_{od}=n_o$ deňlemeden peýdalanalyň. Onda

$$n_0 = \sqrt{n_{oe}n_{od}} = (\frac{2}{h^3})(2\pi kT\sqrt{m_e^* m_d^*})^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-W_o}{2kT}}$$

(2.7)

- Hususy ýarymgeçirijide elektronlaryň μ_e himiki potensiallaryny kesgitläliň we,

diýmek Ferminiň derejesiniň ýagdaýyny. Aşakdaky deňlemeden

$$(m_e^*)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\mu_e}{kT}} = (m_d^*)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-\Delta W_{0e}}{kT}} \quad e^{\frac{-\mu_e}{kT}}$$ almak mümkindir.

$$\mu_e = -\frac{\Delta W_0}{2} + \frac{3}{4} kT ln \frac{m_d^*}{m_e^*} \tag{2.8}$$

(2.8) formuladan T=*OK* -de

$$\mu_e(o) = -\frac{\Delta W_0}{2} \tag{2.8'}$$

bolmalydygy gelip çykýar. Ferminiň derjesi gadagan zonanyň ortasynda ýerleşendir.

Eger $m_e^* = m_d^*$ bolsa, onda islendik temperaturada

$$\mu_e(T) = \mu_e(o) = -\Delta W_o / 2 = hemişelik. \tag{2.8''}$$

Köplenç $m_e^* \neq m_d^*$ (köplenç $m_d^* > m_e^*$) we Ferminiň derejesi temperaturanyň artmasy bilen $m_d^* > m_e^*$ bolanda birazrak ýokary süýşýär, ýöne bu süýşme kT-e golaýdyr we uly dädir.

(2.7) formuladan hususy ýarymgeçirijiniň udel elektrik geçirijiliginiň dürli sebäplere baglydygyny aňsat anyklap bolýar:

$$\gamma = en_0(u_e + u_d),$$

$$n_0 \sim (m_e^* m_d^*)^{\frac{3}{4}} T^{\frac{3}{2}} e^{-\Delta W_0 / 2kT} \tag{2.9}$$

Zarýadlaryň süýşüjiligi olaryň gözenegiň ýylylyk yrgyldylarynda dargamasy bilen kesgitlenilýär, ýagny fononlarda, özem

$$u \sim T^{\frac{3}{2}} (m^*)^{-\frac{3}{2}}$$

bolýandygyny görkezmek mümkindir.

Eger ýarymgeçiriji ideal arassa däl we onda gözenegiň bozulan ýerleri we baryndylar bar bolsa, onda pes temperaturalarda ionlaşan garyndylarda dargama esasy rol oýnaýar. Ýöne adaty we ýokary temperaturalarda äkidijileriň süýşüjiligi olaryň fononlarda dargamasyna baglydyr. (2.9) formuladan hususy ýarymgeçirijiniň udel elektrik geçirijiliginiň temperatura exponensial kanun boýunça baglydygy gelip çykýar

$$\gamma = hemiselik(m_e^* m_d^*)^{\frac{3}{2}}\left[(m_e^*)^{-\frac{3}{2}} + (m_d^*)^{-\frac{3}{2}}\right]\ell^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}} \qquad (2.10)$$

Udel elektrik geçirijiligine elektronlaryň we deşijekleriň goşantlary dürlidir we bu olaryň effektiw massasynyň dürliligi bilen baglydyr. (2.1)-nji tablisada *T=300 K* – de möhüm hususy ýarymgeçirijiler üçin elektronlaryň we deşijekleriň süýşüjilikleri görkezilen.

Tablisa 2.1

Süýşüjilik $m^2/(BC)$	Ýarym geçiriji		
	Si	Ge	InSb
U_e	0.135	0.380	7.700
U_d	0.040	0.180	7.130

Ýarymgeçirijileriň garyndyly geçirijiligi

- Ýarymgeçirijä garandy girizilse onuň elektrik häsiýetine güýçli täsir edýär.

Başga elementleriň atomlary ýa-da ionlary we kristallik gözenegiň bozulan ýerleri: boş düwünler, kristal deformirlenende

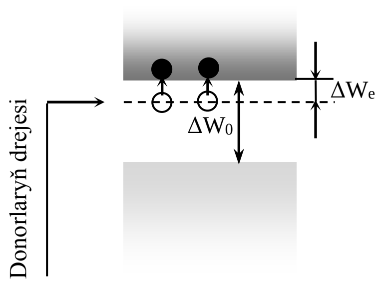
döreýän süýşmeler, ýaryklar, garyndylardyr. Bu hemme garyndylar we gözenegiň bozulan ýerleri krisstalyň periodiki meýdanyna goşmaça üýtgeme girizýär we elektronlaryň özlerini alyp baryşlaryna we olaryň energetiki ýagdaýlaryna täsir edýär.

Eger ýarymgeçirijiniň esasy kristalliki gözenegine garyndy atomlar girizilse, onda kristalda bu atomlaryň nirede ýerleşendiklerine garamazdan gadagan zonada ýerleşen we garyndy, lokal energetiki derejeler diýlip aýdylýan goşmaça energetiki derejeler döreýär.

- Garyndylar iki hili rol oýnaýar. Bir tarapdan olar kristaly goşmaça elektronlar

bilen üpjün ediji, başga tarapdan kristalda bar elektronlaryň ýygnanýan merkezleri bolup hyzmat edýärler. Germaniýniň gözeneginde onuň atomlarynyň biri bäş walent elektronly garyndy atom (fosfor, myşýak, surma) bilen çalşyrylanda näme bolup geçýändigine seredeliň. Garyndy atomyň dört walent elektrony germaniýniň goňşy atomlary bilen himiki baglanyşygy emele getirýär, bäşinji elektron walent baglanyşygy emele getirip bilmeýär. Bu “artyk” elektron ýadro bilen gowşagrak baglanyşandyr we beýleki elektronlar bilen deňeşdirilende ony ýarymgeçirijiniň geçiriji zonasyna geçirmek ýeňildir.

“Artyk” garyndy elektronlaryň energiýasy ýarymgeçirijiniň geçiriji zonasynyň aşakky araçagine degişli energiýadan azdyr. Şu sebäpli garyndy elektronlaryň energetiki derejeleri geçiriji zonanyň *düýbüne golaýda* ýerleşýär. Bu drejeler elektronlaryň käbir sany bilen doldurylan bolýar we donor derejeler diýilýär, “artyk” elektronlar berýän atomlara donor – atomlar diýilýär. Elektronlary donor derejeden geçiriji zona geçirmek üçin onuň ýylylyk oýandyrmasynda alyp bilýän energiýasy ýaly



2.15. surat

ujypsyz energiýa gerekdir. Mysal üçin, eger garyndysy myşýak bolan kremniý üçin bolsa, onda $\Delta W_n = 0.054\,eW$.

Donor derejeden elektronlaryň geçiriji zona geçirilmegi netijesinde ýarymgeçirijide elektron garyndy geçirijilik (n görnüşli geçirijilik) döredilýär.

Munuň ýaly ýarymgeçirijilere elektron (ýa-da n – görnüşli ýärymgeçiriji) ýärymgeçirijiler diýilýär.

(2.16) suratda *n* -görnüşli ýarymgeçirijiniň energetiki derejeleriniň gurluşy görkezilen. (2.2) tablisada gadagan zonanyň ΔW_0 ininiň we käbir ýarymgeçirijiniň n – görnüşli geçirijiliginiň işjeňleşme energiýasynyň bahalary görkezilen.

Tablisa 2.2

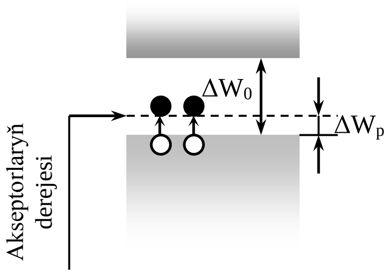
Ýarym geçiriji	Energiýa, *eW*			
	ΔW_0	ΔW_e		
		P	As	Sb
Si	0.10	0.045	0.050	0.039
Ge	0.72	0.012	0.013	0.010

- Goý germaniýniň gözenegine üç walent elektronly garyndy atom (bor,

alýuminiý, indiý) girizilen bolsun. Munuň ýaly atom germaniýniň gözeneginde zerur bolan doly baglanyşygy emele getirip bilmeýär (2.10 – njy surata seret), sebäbi munuň üçin onda bir elektron ýetmeýär. Ýöne ol hemme baglanyşygyny germaniýniň goňşy atomyndan elektron alyp dolduryp bilýär. Boş baglanyşygyň yzygiderli doldurylmak hadysasy ýarymgeçirijide “deşijegiň” hereketi bilen deň derejelidir.

Üçwalentli garyndylar gadagan edilen zonada elektronlar bilen eýelenmedik garyndy energetiki derejeleriň emele gelmegine getirýär. Olara akseptor derejeler diýilýär. Bu ýagdaýda garyndy

atomlara akseptor – atomlar diýilýär. Akseptor derejeler esasy kristalyň walent zonasynyň ýokarky araçäginden birazrak ýokarrakda ýerleşýär. Mysal üçin, kremniýniň kristalynda, üçwalentli, bor girizilende, akseptor derejeler doldurylan zonalar $\Delta W_F = 0.08\,eW$ ululyga ýokarda ýerleşýär. Bu energiýa gadagan zonanyň umumy ininden köp esse kiçidir. Munuň ýäly ýärymgeçirijilerde deşijekli garyndyly geçirijiligiň ýüze çykmagy walent zonanyň ýokarky araçäginde ýerleşen elektronlaryň aňsat akseptor derejelere geçirip bolýanlygy bilen baglydyr.



2.16. Surat

Netijede aşaky zona özlerini “položitel deşijekler” ýaly alyp barýan “boş” elektron derejelerini saklaýar: ol deşjekli geçirijiligiň zonasyna öwrülýär. Elektrik meýdanynyň täsiri astynda, aşakky zonadaky elektronlar yzygiderli deşijekleri doldurýarlar, bu bolsa deşijekleriň elektronlaryň hereketiniň ters ugruna süýşýänligi bilen deňgüýçlidir. Geçirijiligiň ýazylyp beýan edilen gönüşine p-görnüşli geçirijilik, ýarymgeçirijilere bolsa – deşijekli ýa-da p–görnüşli ýärymgeçirijiler diýilýär.

(2.16) suratda p-görnüşli ýarymgeçirijiniň energetiki derejeleriniň gurluşy görkezilen.

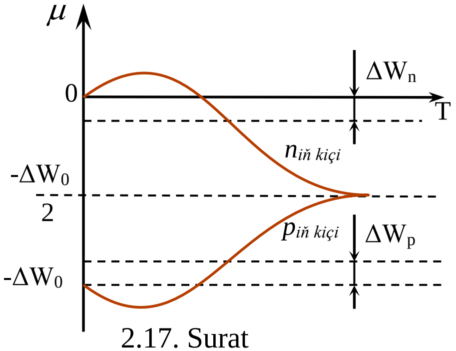
(2.3) tablisada käbir p-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin deşijekli geçirijiligi işjeňleşdiriş ΔW_p energiýasynyň bahalary görkezilen.

Tablisa
2. 3

Ýarymgeçiriji	Energiýa, *eW*			
	ΔW_0	ΔW_e		
		B	Al	In
Si	0.10	0.045	0.060	0.07 0
Ge	0.72	0.010	0.010	0.01 1

Ýarymgeçirijiniň (n – ýä-da p - görnüşli) geçirijiliginiň görnüşini aýdyňlaşdyrmak üçin ýa-da garyndyly geçirijilikde zarýad äkidijileriň agdyklyk edýän görnüşini kesgitlemek üçin Holluň effekti ulanylýär.

Ýarymgeçirijiler üçin Holluň hemişeligi R elektronlaryň we deşijekleriň süýşijiliklerine we sanlaryna bagly funksiýadyr. Holluň hemişeliginiň alamaty garyndy geçirijiligiň görnüşine baglydyr.



2.17. Surat

n- görňüşli geçirijilik üçin R<0, p-görnüşli üçin R>). Şu sebäpli Holluň hemişeligini ölçemek ýarymgeçirijiniň garyndyly geçirijiliginiň häsiýetini kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

- *T=OK* – de Ferminiň derejesi garyndyly ýarymgeçirijilerde garyndyly

geçirijiligiň görnüşine baglydyr.

n – görnüşli ýarymgeçirijilerde $\mu(0) = -\Delta W_n / 2$. Zarýadlary esasy äkidijiler geçiriji zonadaky

elektronlardyr (geçiriji elektronlar). Walent zonadaky deşijekler esasy däl äkidijilerdir.

p – görnüşli ýarymgeçirijilerde $\mu(0) = -\Delta W_0 + \Delta W_p / 2$

Toguň esasy äkidijileri walent zonadaky deşijeklerdir, esasy dälleri – geçiriji zonadaky elektronlardyr.

Temperaturanyň Ferminiň derejesiniň ýagdaýyna täsiri çylşyrymly häsiýete eýedir, n – we p – görnüşli garyndyly ýarymgeçirijiler üçin dürlidir (2.17 – nji surat).

n – görnüşli ýärymgeçirijiler üçin termodinamiki temperaturanyň artmagy bilen μ ilki artýar, soňra $-\Delta W_0 / 2$ ululyga ymtylyp kemelýär we ýeterli derejede ýokary temperaturalarda hususy geçirijilige geçmek amala aşýar.

p – görnüşli garyndyly ýärymgeçirijiler üçin T temperaturanyň artmagy bilen ilki kemelýar, soňra $-\Delta W_0 / 2$ ululyga ymtylyp, n – görnüşlä meňzeşlikde ýokary temperaturalarda hususy geçirijilige geçmek bilen artýar.

- Togy äkidijileriň sany n_0 hususy n_0^{hus} we garyndyly n_0^{gar} geçirijilikler-däki

äkidijileriň sanyndan durýar:

$$n_0 = n_0^{hus} + n_0^{gar}.$$

Bu sanlaryň her biri temperaturanyň artmagy bilen eksponensial kanun boýunça artýar.

$$n_0^{gar} \sim exp\left[-\Delta W^{gar} /(2kT)\right],$$

$$n_0^{hus} \sim exp\left[-\Delta W_0 /(2kT)\right],$$

Bu formulanyň birinjisinde ΔW^{gar} ululyga ýa ΔW_e, ya-da ΔW_p diýip düşünmeli.

Pes temperaturalarda tok äkidijileriň n_0 sanyna esasy goşandy garyndylar goşýar - $n_0 \approx n_0^{gar}$. Tersine ýokary temperaturalarda hususy geçirijiligiň äkidijileriniň sany esasy rol oýnaýar - $n_0 \approx n_0^{hus}$.

Haçanda ýarymgeçirijide hemme donor we akseptor garyndylar ulanylyp bolandan soň tok äkidijileriň garyndy sanlarynyň doýgunlaşmasy ýüze çykýar. Bu ýagdaýda

$$n_0^{gar} \leq \{n_0^{don} \; ya-da \; n_0^{aks}\},$$

bu ýerde n_0^{don} we n_0^{aks} - akseptor ýa-da donor garyndylaryň berýan tok äkidijileriniň sany.

Udel elektrik geçirijiligi

$$\gamma = e\left[n_{on}u_n + n_{op}u_p\right]$$

Ýarymgeçirijileriň fotogeçirijiligi
(Ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň täşiri astynda döreýän geçirijilik)

- Ýarymgeçirijiniň elektromagnit şöhlelenmesi tarapyndan oýandyrylan elektrik

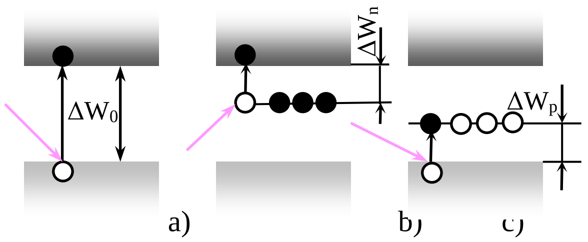
geçirijiligine fotogeçirijilik diýilýär.

Fotogeçirijiligiň döremegine içki fotoeffekt sebäp bolýar. Ýarymgeçirijide (ýa-da dielektrikde) ýagtylygyň täsiri astynda goşmaça deňagramlyksyz tok äkidijiler döreýär. Ýarymgeçirijiniň jemleýji udel elektrik geçirijiligi

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_f \qquad (2.11)$$

Bu ýerde γ_0 ýagtylyk düşmedik halatdaky udel elektrik geçirijilik; γ_f - udel elektrik fotogeçirijiligi.

2.18. a) çyzgyda hususy garyndysyz ýarymgeçirijide fotogeçiriji elektronyň we deşijegiň döremegi görkezilen.



2.18. surat

Energiýasy gadagan zonanyň ΔW_0 inine deň ýa-da uly $(h\nu \geq \Delta W_0)$ $h\nu$ energiýaly foton elektrony walent zonadan geçiriji zona geçirýär. Bu elektron – deşijek jübütiniň – deşijegi zonada elektronyň we walent zonada deşijegiň döremegine getirýar. Ol ýarymgeçirijiniň hususy fotogeçirijiligini döretmäge gatnaşýar.

$$\gamma = en_c\left[u_n\langle\tau_n\rangle + u_p\langle\tau_n\rangle\right] \tag{2.12}$$

Bu ýerde n_{os} ýarymgeçirijiniň birlik göwrüminde *1 s* -da döredilýän (generirlenýän) deňagramlyksyz äkidijileriň jübütleriniň – elektronlaryň we deşjekleriň sany; $\langle\tau_n\rangle$ we $\langle\tau_p\rangle$ - bu äkidijileriň orta ýaşaýyş döwürleri.

2.18. b), c) suratlarda donor (*b*) we akseptor (c) garyndyly ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň täsiri astynda tok äkidijileriň nädip döredilýändikleri görkezilen.

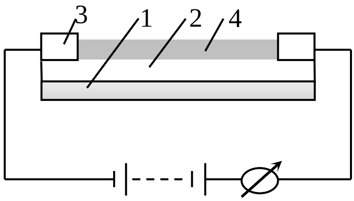
Bu ýagdaýlarda garyndy geçirijiligiň energiýasyndan az bolmadyk $h\nu$ energiýaly foton ýa elektrony donor derejeden geçiriji zona geçirýar, ýa-da elektrony walent zonadan boş akseptor garyndy zona geçirýär.

- Fotonyň energiýasy üçin $h\nu \geq \Delta W$ talap $h\nu = \Delta W$ şerden kesgitlenilýän içki

fotoeffektiň gyzyl araçaginiň bardygyny aňladýar, bu ýerde ΔW - degişli geçirijileriň işjeňleşdiriş energiýasy. Ýygylykdan tolkun uzynlygyna geçip alarys.

$$\lambda_{gyz} = hc / \Delta W \tag{2.13}$$

$\Delta W = 2eW$ bolanda hususy fotogeçirijilik üçin $\lambda_{gyz} = 600nm$. Bu sary ýagtylyga degişlidir. Görünýän we ultramelewşe ýagtylyklar diňe ýarymgeçirijilikde däl-de eýsem, $\Delta W > 2eW$ bolan dielektriklerde-de fotogeçirijiligi döretmegi mümkindir. Garyndyly ýarymgeçirijilerde geçirjiligi işjeňleşdiriş energiýasy $\Delta W`0.01 \div eW$ we $\lambda_{gyz} \sim 10^{-5} \div 10^{-4}\, m$, bu spektriň infragyzyl aralygyna degişlidir.



2.19. surat

- Yarymgeçirijileriň fotogeçirijileriniň ýagtylandyrmakda baglylygy

fotorezistorlarda (fotogarşylyklarda) ulanylýar.

2.19 – njy suratda fotogarşylygyň görnüşlerinden biriniň gurluşy görkezilen. Ýuka ýarymgeçiriji gatlak 2 izolirleýji 1 esasa çalynýar. Metalliki 3 elektrodlaryň kömegi bilen fotogarşylyk zynjyra çatylýar. Gorag lak örtügi 4 abzaly daşky täsirlerden gorap saklaýar. Fotogarşylyklaryň häsiýetnamasy bolup onuň yagtylyk duýujylygy $dI/d\phi\ (mA/lm)$ - ýagtylyk akymy bir *Lm*-ne üýtgände tok duýujynyň üýtgemegi. Fotogarşykyllaryň ýagtylyk duýujylygy daşky fotoeffekta esaslanan wakuum fotoelementleriniňkiden ýokarydyr. Meselem CdSe fotorezistorynyň ýagtylyk duýujylygy ~1200 *mA/lm;* ol 10^5 esse wakuum fotoelementleriniňkiden uludyr.

3-nji bap. Ýarymgecirijilerde elektronlaryň we deşikleriň statistikasy

3.1. Fermi-Diragyň statistikasy boýunça paýlanyş funksiýa

Islendik gaty jisim bu ummasyz köp sanly mikrobölejiklerden durýan ulgamdyr. Şeýle ulgamlarda özboluşly statistiki kanunalaýyklyklar ýüze çykýar.

Statistiki kanunalaýyklyklaryň esasy özboluşlylygy onuň ähtimallyk häsiýetidir. Olar diňe haýsy bolsa hem bir hadysanyň

ýerine ýetmeginiň, haýsy hem bolsa bir netijäniň alynmagynyň ähtimallygyny görkezýär.

Gaty jisimlerde energiýalary E den E+ΔE aralygynda üýtgeýän mikrobölejikleriň ortaça sany paýlanmagyň doly statistiki funksiýasy bilen kesgitlenýär N(E)dE.

Paýlanmagyň doly funksiýasyny dE energiýa aralygyndaky derejeleriň umumy sany g(E)dE, şol derejeleriň doly bolmagynyň ähtimallygyna köpeldilmegi görnüşinde göz öňüne getirip bolar. Eger-de derejeleriň doly bolmagynyň ähtimallygyny f(E) diýip bellesek, onda

$$N(E)dE=f(E)g(E)dE \qquad (3.1)$$

f(E) funksiýa ýöne paýlanyş funksiýasy diýilip aýdylýar. Ýokarda görkezilişi ýaly f(E) funksiýa berlen derejeleriň elektronlar (bölejikler) bilen doly bolmagynyň ähtimallygyny görkezýär.

Şeýlelikde, bölejikleriň derejeler boýunça paýlanyşynyň doly funksiýasyny tapmaklyk meselesi g(E)dE funksiýany tapmaklyga (derejeleriň energiýalar boýunça paýlanyşy) we bu derejeleriň elektronlar doly bolmagynyň ähtimallygyny görkezýän f(E) funksiýany tapmaklyga gelýär.

Paýlanma funksiýasy, meselem elektronlar üçin, şeýle görnüşde ýazylýar.

$$F(E) = (e^{(E-\mu)/kT} +1)^{-1} \qquad (3.2)$$

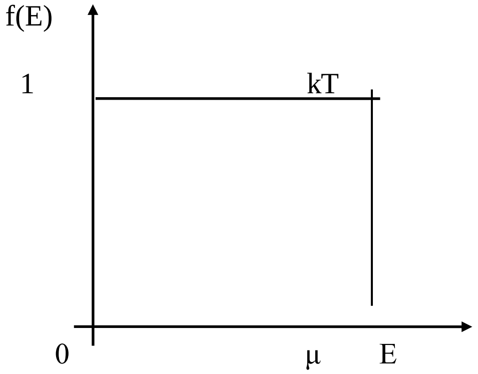
bu ýerde T-absolýut temperatura, μ-ulgamyň himiki potensiýaly, köplenç halatda Ferminiň energiýasy ýa-da derejesi diýilýär.

(3.2) funksiýa Fermi-Diragyň funksiýasy diýilýär. Ilki bilen bu funksiýanyň T→0 K ýagdaýyna seredeliň. Bu ýagdaýda μ-den kiçi bolan E energiýadaky derejeleriň islendigi üçin f(E)=1. Şol bir wagtda islendik E>μ dereje üçin f(E)=0 (3.1-nji surat).

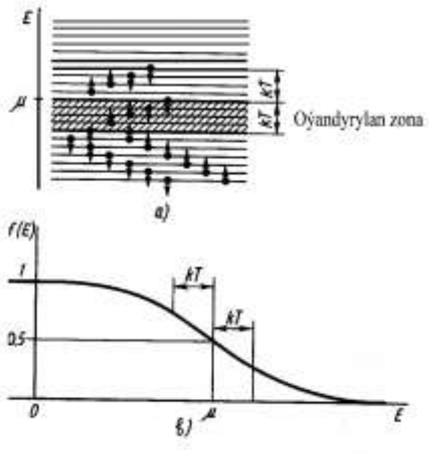
Şeýlelikde, T=0 K temperaturada E<μ bolan energetik derejeleriň hemmesi elektronlar bilen eýelenendir, emma E>μ energetik derejeler boşdyr. Başga söz bilen aýdanyňda, T→0 K elektronlar iň pesdäki energetik derejeleri eýelemäge ymtylýarlar. Temperaturanyň artmagy bilen elektronlar ýylylyk bilen oýandyrylýar we ýokary energetiki derejelere geçýärler, şol sebäpli hem elektronlaryň energetiki derejeleri boýunça paýlanyşy üýtgeýär. Emma, Ferminiň derejesiniň ýakynyndaky energetik derejelerde, ýagny kT energetiki aralykda, elektronlar ýylylyk oýandyrmasyna

sezewar bolup bilýär. Çuň ýerleşen energetik derejelerdäki elektronlar öž ýerlerinde üýtgemän galýarlar, sebäbi kT energiýa olary Ferminiň derejesinden ýokary geçirmeklige ýetik däldir.

Ýylylyk oýandyrmasy esasynda elektronlaryň öň Ferminiň derejesinden aşakda ýerleşen bir bölegi ýokary geçýär, şeýlelikde elektronlaryň energetik derejeler boýunça täze paýlanyşy emele gelýär (3.2-nji surat). Suratdan görnüşi ýaly, temperaturanyň artmagy bilen, energetik derejeler boýunça elektronlaryň paýlanyşy energiýa boýunça μ ululykdan kT çuňlukda ýaýraýar.



3.1. Surat. T=0K temperaturada Fermi- Diragyň funksiýasy.



3.2. Surat. T>0K bolanda elektronlaryň Ferminiň derejisinden μ ýokary oýandyrylyşy (a)
we T>0K bolanda Fermi-Diragyň paýlanyş funksiýasy (b).

3.2. Ýarymgeçirijilerde elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy

Geçiş zonasynyň hemme energiýalary boýunça paýlanyşyň doly funksiýasyny (3.1) integrirläp, geçiş zonasyndaky elektronlaryň konsentrasiýasyny tapýarys:

$$n = \int_{(g.z.b)} n(E)dE = \int_{0}^{E_{zona.dep}} g(E)f(E)dE \qquad (3.3.)$$

Bu ýerde n(E) V=1 ýagdaýda N(E) funksiýa.

Integralyň arasyndaky f(E) funksiýanyň çalt (eksponenta boýunça) energiýanyň artmagy bilen kemelmegi sebäpli, integral almaklygy tükeniksizlige çenli dowam etdirip bolýar, şol bir wagtyň özünde g(E) (dereje boýunça) ýuwaş-ýuwaş artýar.

$$n = \frac{1}{2\pi^2}\frac{((2m_n)^{3/2}}{\hbar^3}\int_0^{\infty}\frac{\sqrt{E}dE}{e^{(E-\mu)/(kT)}+1}$$

(3.4.)

$$E(k) = -E_g - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_p}$$

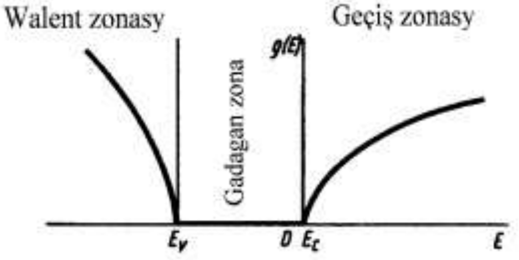
bu ýerde $f(E) = \dfrac{1}{e^{(E-\mu)/kT}+1}$

$$g(E) = \frac{V}{\pi^2}\cdot\frac{\sqrt{2m_n^3\cdot E}}{\hbar^3}$$

$$g(E) = \frac{V}{\pi^2}\frac{\sqrt{2m_p^3(E_v - E)}}{\hbar^3}$$

EW= - E_g - walent zonanyň depesindäki energiýa.

Geçiş zonasynyň düýbünde we walent zonasynyň depesinde derejeleriň dykyzlygynyň funksiýasy 3.3. suratda görkezilen.



3.3. Surat. Geçiş zonanyň düýbünde we walent zonanyň depesinde derejeleriň
dykyzlygynyň funksiýasy.

Eger Ferminiň derejesi μ geçiş zonanyň düýbünden E_c=0, aşakda ýerleşen bolsa, ýagny (E-μ)>>kT, onda Fermi-Diragyň funksiýasynyň maýdalawjysyndaky birligi hasaba almasada bolýar.

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/(kT)}+1} \approx e^{\mu/kT} \cdot e^{-E/kT} \qquad (3.5.)$$

Bu ýagdaýda geçiş zonanyň derejeleriniň elektronlar bilen doly bolmak mümkinçiligi kiçidir

$$f(E) \ll 1 \qquad (3.6.)$$

(3.6) şerte geçiş zonanyň elektronlar bilen doly bolmazlyk şerti (uslowiýem newyroždennosti) diýilýär.

Bu şert ýerine ýetende elektronlaryň energiýa boýunça paýlanyşynyň doly funksiýasy şeýle görnüşe eýe bolýar:

$$n(E)dE \approx \frac{(2m_n)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3}\sqrt{E} \cdot e^{\mu/(kT)} \cdot e^{-E/kT} \cdot dE$$

(3.7.)

Bu deňlige Bolsmanyň paýlanyşy diýilip at berilýär. Elektron gazynyň umumy sany $e^{\mu/kT}$ köpelijä proporsionaldyr, emma olaryň energiýa boýunça paýlanyşy $\sqrt{E} \cdot e^{-E/(kT)}$ köpelijiler boýunça kesgitlenýär. Energiýa boýunça (3.7.) deňlikden alnan integral Ferminiň energiýasyna μ baglylykda elektronlaryň umumy sanyny berýär.

$$n = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{\mu/(kT)} = N_c \cdot e^{\mu/(kT)} \quad (3.8.)$$

N_c-ululyga, geçiş zonanyň düýbünden başlap, energetik derejeleriň effektiw sany diýilýär. N_c ululyk umuman aýdanda geçiş zonanyň düýbünden kT aralykda ýerleşen derejeleri aňladýar, sebäbi esasan hem şol derejeler elektronlar bilen doludyr. Şol bir temperaturada elektronyň konsentrasiýasy näçe az bolsa, Ferminiň derejesi şonça-da aşakda ýerleşendir.

Indi walent zonasyndaky deşikleriň konsentrasiýasynyň Ferminiň energiýasyna baglylygyna seredip geçeliň.

Walent zonada E energiýaly derejäniň elektron tarapyndan eýelenen bolmazlygynyň ähtimallygy şeýle tapylýar.

$$f_p(E) = 1 - f(E) = \frac{1}{1 + e^{(\mu - E)/(kT)}} \quad (3.9.)$$

Eger-de $f_p(E) \ll 1$, bolsa onda

$$f_p(E) \approx e^{-(\mu - E)/(kT)} \quad (3.10.)$$

Deşikleriň energiýa boýunça paýlanyş funksiýasyny $f_p(E)g(E)$ integrirlemek bilen, deşikleriň konsentrasiýasyny tapýarys.

$$P = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-(\mu - E_v)/(kT)} = N_v e^{-\frac{(\mu + Eg)}{(kT)}}$$

(3.11.)

Bu ýerde N_v-walent zonadaky energetik derejeleriň effektiw sany (walent zonasynyň depesine getirilen).

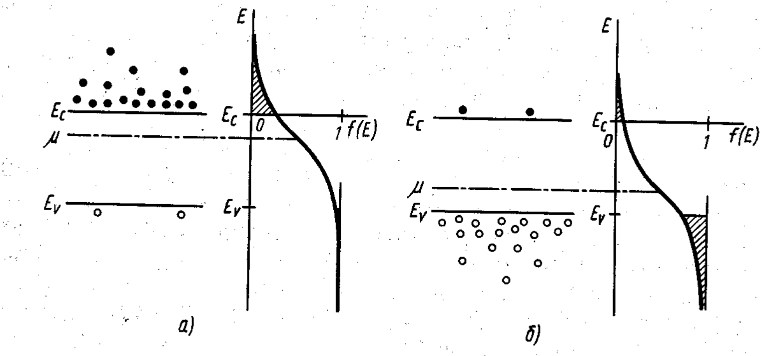
3.3. Hususy ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesiniň ýerleşişi we erkin zarýadlaryň konsentrasiýasy

Garyndysyz hususy ýarymgeçirijide Ferminiň derejesiniň ýerleşişini, geçiş zonadaky elektronlar bilen walent zonadaky deşikleriň deňlik şerti esasynda tapmak mümkin:

$$n_i=p_i \qquad (3.12.)$$

Bu ýerde i indeks, hususy ýarymgeçirijä degişliligi aňladýar.

3.12-nji şert, Ferminiň derejesiniň gadagan zonanyň takmyndan ortasynda ýerleşýändigini aňladýar. Eger Ferminiň derejesi geçiş zona ýäkyn ýerleşse, onda şeýle ýarymgeçirijide elektronlar deşiklere seredende has köp, sebäbi geçiş zonanyň düýbünde ýerleşen aýratyn energetik derejeleriň elektronlar bilen doldurylyşy (f(E)) walent zonanyň depesindäki derejeleriň elektronlar bilen eýeli däldiginden (1-f(E)) gaty köpdür (3.4 a surat).



3.4. Surat. n-görnüşli ýarymgeçirijilerde (n>>p) (a) we p-görnüşli ýarymgeçirijilerde (p>>n) (b) paýlanyş funksiýasy.

Şeýlelikde, diňe Ferminiň derejesi gadagan zonanyň ortasynda ýerleşen ýagdaýynda elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasynyň deňligini gazanmak mümkin. Hakykatyna seredeniňde hususy ýarymgeçirijide Ferminiň derejesi takmyndan gadagan zonanyň ortasynda ýerleşendir. Sebäbi geçiş zonada we walent zonada energetik derejeleriň dykyzlygy dürlüdir.

Hususy ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesiniň takyk bahasyny n(μ) bilen p(μ) bahalaryny deňleşdirip alýarys (3.11) we (3.12).

$$N_c e^{\mu_i/(kT)} = N_v e^{-(\mu_i+E_g)/(kT)} \qquad (3.13.)$$

Eger (3.13) deňlikden Ferminiň derejesiniň bahasyny tapalyň

$$\frac{N_v}{N_c} = e^{\left(\frac{\mu_i}{kT}+\frac{\mu_i+E_g}{kT}\right)}$$

$$\ln\frac{N_v}{N_c} = \ln e^{\left(\frac{\mu_i}{kT}+\frac{\mu_i+E_g}{kT}\right)}$$

$$\ln\frac{N_v}{N_c} = \frac{\mu_i}{kT} + \frac{\mu_i + E_g}{kT} = \frac{2\mu_i}{kT} + \frac{E_g}{kT}$$

$$\frac{2\mu_i}{kT} = -\frac{E_g}{kT} + \ln\frac{N_v}{N_c}$$

$$\mu_i = -\frac{E_g}{2} + \frac{kT}{2}\ln\frac{N_v}{N_c}$$

$$N_v = \frac{2(2\pi m_p kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}$$

$$N_c = \frac{2\left(2\pi m_n kT\right)^{\frac{3}{2}}}{h^3}$$

$$\frac{N_v}{N_c} = \left(\frac{m_p}{m_n}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\mu_i = -\frac{E_g}{2} + \frac{kT}{2}\ln\left(\frac{m_p}{m_n}\right)^{\frac{3}{2}} = -\frac{E_g}{2} + \frac{3}{4}kT \cdot \ln\frac{m_p}{m_n}$$

(3.14.)

Haçanda T→0 K Ferminiň derejesi gadagan zonanyň ortasynda ýerleşendir. μ_i-niň alnan bahasyny (3.14.) deňlige goýup, hususy ýarymgeçirijilerde erkin zarýadlaryň konsentrasiýasyny hasaplap bileris.

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot e^{-E_g/(2kT)} = \frac{2(2\pi\sqrt{m_n m_p} \cdot kT)^{3/2}}{\mathrm{h}^3} \cdot e^{-E_g/(2kT)}$$

(3.15.)

Bu ýerde m_n we m_p-elektronyň we deşigiň effektiw massasy. (3.15) deňlikden görnüşi ýaly hususy ýarymgeçirijilerde deňagramlykdaky zarýadlaryň konsentrasiýasy esasan ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň giňligi we temperatura bilen kesgitlenýär.

Meselem, Eg -niň 1.1 eW-dan (kremniý) 0.08 eW (çal galaýy) çenli kiçelmegi otag temperaturasynda n_i-niň 9 dereje artmagyna getirýär. Germaniý ýarymgeçirijisiniň temperaturasynyň 100 K-den 600 K-e çenli ýokarlanmagy n_i-niň 17 dereje artmagyna getirýär.

4-nji bap. Kinetiki hadysalar

4.1. Elektrik meýdanynda erkin zarýadlaryň dreýfi. Erkin zarýadlaryň hereket edijiligi (podwižnost)

Daşky elektrik meýdanynyň täsiri astynda, erkin zarýadlaryň ugrukdyrylan herektiniň ýüze çykmaklygyna – dreýf diýilýär. Daşký elektrik meýdany erkin zarýadlara tizlenme berip, bu tizlenmäniň ugry deşikler üçin daşky meýdanyň ugryna ugrukdyrylandyr, emma elektronlar üçin ters ugra urukdyrylandyr.

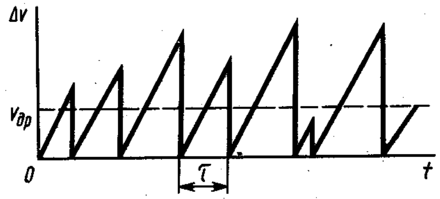
Eger güýjenmesi E bolan elektrik meýdany effektiw massasy m* zarýady *e* bolan bölejige täsir etse, onda ol şeýle tizlenme bilen hereket eder:

$$a = \frac{F}{m*} = \frac{e}{m*}E; \qquad (4.1)$$

Eger-de, her gezek çaknyşmadan soň zarýad islendik tarapa hereket edip öz ugrukdyrylan hereketini her bir erkin hereket edýän wagt aralygynda $<\tau>$ ýitirýär diýip hasap etseň, onda ugrukdyrylan hereketiň ortaça tizligi (dreýf tizligi) şeýle tapylýar:

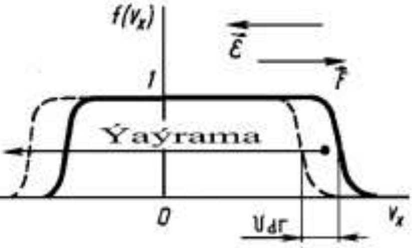
$$v_{dr} = \frac{a < \tau >}{2} = \frac{1}{2} * \frac{e}{m*} < \tau > E. \quad (4.2)$$

4.1 suratda daşky meýdanyň täsiri astynda bölejigiň eýe bolan artykmaç dreýf tizliginiň wagt bilen üýtgeýşi görkezilen.



4.1. Surat. Dreýf tizliginiň hasaplanylyşyna düşündiriş.

Daşky elektrik meýdanyndaky elektronlaryň dreýf hereketini we beýleki käbir kinetiki hadysalary Bolsmanyň kinetiki deňlemesini peýdalanmak bilen has takyk tapmak mümkin. Bu deňleme daşky meýdanyň täsiri astynda elektronlaryň tizlikleri boýuça paýlanyş (raspredeleniýe) funksiýasyny görkezýär. Daşky Ē elektrik meýdanynyň täsiri bilen elektronlaryň dreýfi ýüze çykyp, daşky güýjiň $\overline{F}$ elektrona täsiriniň ugryna, tizlikler boýunça paýlanyş funksiýanyň V_{dr} ululyga süýşmesine getirýär (4.2 surat).



4.2. Surat. Daşky elektrik meydanynda elektronlaryň tizligi boýnça paýlanyş
funksiýasynyň süýşmesi ($V_y = V_z = 0$).

Daşky elektrik meýdanynyň aýrylmagy bilen elektronlaryň tizlikler boýunça paýlanyş funksiýasy öňki durnukly ýagdaýyna gelýär we relaksasiýa prosesi bolup geçýär. Relaksasiýa prosesi şeýle deňleme bilen ýazylýar.

$$\Delta n(v_x) = \Delta n(v_x)\Big|_{t_0} e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{rel}}}$$

bu ýerde t_o - meýdanyň aýrylan wagty, τ_{rel}- relaksasiýa wagty.

τ_{rel} - wagtyň içinde , elektronlaryň tizlikler boýunça paýlanyş funksiýasynyň durnukly ýagdaýyndan üýtgemesi we elektronlaryň dreýf tizligi *e* esse kiçelýär.

Bolsmanyň kinetiki deňlemesiniň çözgüdi esasynda alýarys:

$$v_{dr} = \frac{e}{m*}\tau_{rel}E \qquad (4.3)$$

(4.2) we (4.3) deňlemelere seretseň relaksasiýa wagtynyň t_{rel} we erkin hereket wagtynyň <τ> birmeňzeş manysynyň bardygy görünýär.

Erkin zarýadyň dreýf tizliginiň elektrik meýdanynyň güýjenmesine bolan gatnaşygyna, zarýadyň podwižnosti (hereket edijiligi) diýilýär, *u* ýa-da μ harpy bilen bellenilýär.

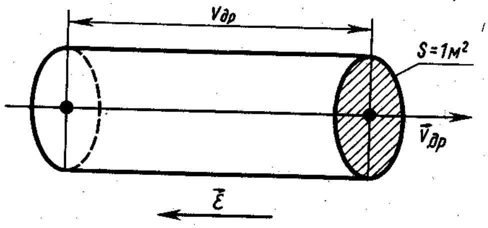
$$u = \frac{|v_{dr}|}{E} = \frac{e}{m^*}\tau_{rel} \qquad (4.4)$$

Zarýadyň podwižnosti m^2/Ws ýa-da sm^2/Ws birliklerde ölçelinýär.

4.2. Udel elektrik geçirijiligi. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi

Eger ýylylyk deňagramlylygy wagtynda elektronlaryň hereketiniň tizliginiň jeminiň nola deňligini göz öňünde tutsaň, onda elektrik togunyň dykyzlygyny we geçirijiniň udel elektrik geçirijiligini, elektronlaryň dreýf tizligini V_{dr} hasaba alyp hasaplamak bolýar.

Geçirijiniň içinde esasy bire deň bolan silindri göz öňüne getireliň (4.3. surat). Silindriň içindäki elektronlar, haçanda silindriň uzynlygy V_{dr} deň bolanda, 1 sekuntda silindriň esasyndan geçip, dykyzlygy *i* deň bolan tok emele getirer:



4.3. Surat. Togyň dykyzlygynyň aňlatmasynyň çykarylyşyna degişli çyzgy.

$$i = en|v_{dr}| = enu_n\vec{\varepsilon} \qquad (4.5.)$$

Bu erde n - geçirijidäki elektronlaryň konsentrasiýasy. Omyň kanunyna laýyklykda $i = \sigma E$.

Onda $\sigma = enu_n$. (4.6.)

Deşikler üçin

$$\sigma = epu_p \qquad (4.7.)$$

4.4 - nji deňlikden *u* - nyň bahasyny (4.6.) goýup alýarys.

$$\sigma = enu_n = \frac{e^2 n\langle\tau_{rel}\rangle}{m_n} \qquad (4.8.)$$

Bu formula, geçirijide elektronlaryň häsiýetnamalaryny mikroskopiki ululyklaryň üsti bilen aňladyp, udel elektrik geçirijiliginiň tapylyşyny aňladýar.

Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi.

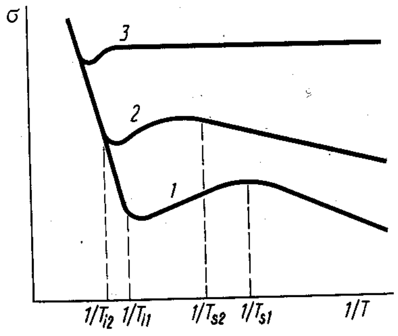
Umumy görnüşde ýarymgeçirijileriň udel elektrik geçirijiligi elektronlaryň (n) we deşikleriň (p) konsentrasiýasy bilen kesgitlenilýär:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = enu_n + epu_p \quad (4.9.).$$

Emma, has pes temperaturalarda ýarymgeçirijilerde esasy zarýadlaryň konsentrasiýasy, esasy däl zarýadlaryn konsentrasiýasyndan has köpdir. Şol sebäpli hem (4.9.) deňlikdäki goşuljylaryň biri galdyrylyp ýazylýar, meselem, *n*-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin erkin elektronlara degişli goşulyjy galýar:

$$\sigma \approx \sigma_n \approx enu_n \quad (4.10.).$$

Ýarymgeçirijilerde erkin zarýadlaryň konsentrasiýasy temperatura gaty ýokary derejede, ýagny eksponenta boýunça baglydyr. Bu baglylyk diňe garyndylaryň erkin zarýad berip bilijiliginiň mümkinçiligini ýitirýän oblastynda üýtgeýär (4.4 surat).



4.4. Surat. Dürli derejede taryndyly (degişlilikde) ýarymgeçirijileriň udel elektrik
geçirijiliginiň temperatura baglylygy.

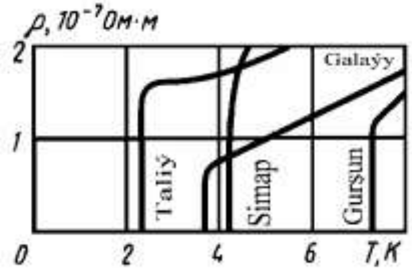
Pes temperaturalarda *lnσ = f(1/T)* baglylygyň *a* böleginde udel elektrik geçirijilik ýagny erkin zarýadlaryň artmasy donorlaryň ýa-da akseptorlaryň hasabyna artýar. Baglanşygyň *b* bölegi garyndylaryň erkin zarýadlary berip bilijilik ukybynyň gutarandygyny aňlagýar. Baglylygyň üçünji bölegi *c* hususy geçirijilige, ýagny walent we geçiş zonalaryň arasyndaky zonaara geçişiň hasabyna ýüze çykýar.

Ýarymgeçiriji näçe ýokary derejede garyndyly bolsa, şonça-da udel elektrik geçirijiligi ýokary bolup, *a, b, c,* bölekleriň arasyndaky çäkler umumylaşyp başlaýar.

Aşageçirijilik hadysasy.

1911-nji ýylda Golland fizigi Kammerling-Onnes simabyň udel garşylygynyň temperatura baglylygyny öwrenen wagtynda, has pes temperaturada üýtgesik bir hadysany ýüze çykarýar: 4,2 K temperaturada simabyň udel garşylygy has çalt (böküp) nola çenli

kemelýär. Bu hadysa aşageçirijilik diýen ada eýe bolýar. (4.5.



surat).

4.5. Surat. Aşageçiriji ýagdaýa geçende geçirijileriň udel garşylygynyň birbada üýtgeýşi.

Häzirki wagtda aşageçirijilik hadysasy 100 töweregi jisimlerde ýüze çykaryldy. Jisimleriň aşageçirijilik ýagdaýa geçýän temperaturasyna, kritiki temperatura diýilip, dürli jisimler üçin 0-20K aralykda ýerleşýär. 1990-njy ýyllarda bu ugurda gaty uly üstünlikler gazanylyp, käbir keramiki materiallarda aşageçirijiliň ýüze çykýan temperaturasy 80-100K çenli ýokarlandy. Muňa mysal edip Y-Ba-Cu- -O_7 materýaly we başga birnäçe garyndylary getirip bolar. Bu ugurda 1988-1996-njy ýyllarda Türkmenistanyň Ylymlar akademiýasynyň Fizika-tehnika institutynda hem birnäçe ylmy işler ýerine ýetirildi. Meselem, $YBaCuO_7$ we $BiSrCoCuO_7$ birleşmeleri köp dürli garyndy garylyp alyndy (Pb, Sb, Li, K, Na). Bu keramiki materiallar ulgamynda aşageçirijilik 88-112K aralykda ýüze cykaryldy. Olaryň alnyş tehnologiýasy we esasy fiziki häsiýetleri öwrenildi.

Umuman aýdanyňda aşageçirijiligi öwrenmeklik käbir düýpli fiziki häsiýetleriň üýtgeýändigini ýüze çykardy.

Aşageçirijilik hadysasynyň ýüze çykmaklygy, diňe bir udel garşylygyň nola öwrülmegi däl-dir. Ýene bir ýüze çykýan düýpli hadysa ol hem ideal diamagnetizimdir. Bu häsiýet 1933-nji ýylda Meýsner we Oksenfeld tarapyndan açyldy. Bu häsiýetiň düýp mazmuny şundan duryar. Magnit meýdanynda ýerleşdirilen jisim aşageçirijilik ýagdaýyna geçen wagtynda özünde bar bolan magnit meýdanyny «doňdurmaýar», a öz göwrüminden daşary itekläp çykarýar we ideal diamagnit ýagdaýyna geçýär. Eger-de jisim ýönekeý nol garşylykly ýagdaýyna geçende onuň içindäki magnit meýdany daşyna iteklenmän, jisimiň içinde doňdurylýar.

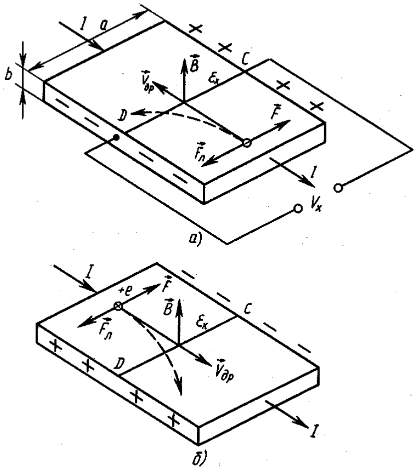
Şeýlelikde, aşageçirijiligiň mazmuny şeýle zatdyr, ýagny bir-birine bagly bolmadyk iki sany fundamental häsiýetiň ýüze çykmagydyr: ideal geçirijilik we ideal diamagnetizmdir.

4.3. Galwanomagnit effektleri. Holluň effekti. Ettingsgauzeniň effekti. Termomagnit effektleri

Holluň effekti.

Haçanda geçiriji plastinkadan tok goýberilip, daşky magnit meýdanyna perpendikulýar ýerleşdirilse, onda hereketdäki zarýadlar bilen magnit meýdanynyň täsiri esasynda, geçiriji plastinkanyň gapdal üstünde potensiallaryň tapawudy ýüze çykýar. Şeýle hadysa bolsa Holluň effekti diýlip at berilýär.

Goý göniburçly plastinkadan, I elektrik togy aksyn (4.6-njy surat). Magnit meýdany täsir etmedik ýagdaýynda, toguň ugruna perpendikulýar gapdal üstlerde C we D nokatlaryň arasyndaky potensiallaryň tapawudy nola deňdir. Haçan-da tok geçýän nusga (plastinka) magnit meýdanynda ýerleşdirilse we magnit meýdanynyň induksiýasy B toguň ugruna perpendikulýar bolsa, onda C we D nokatlaryň arasynda U_H potensiallaryň tapawudy ýüze çykyp, oňa Holluň e.h.g. diýilýär.



4.6. Surat. n-görnüşli (a) we p-görnüşli (b) ýarymgeçitilerde Holluň effektini düşündirýän çyzgy.

Tejribeleriň görkezişi ýaly, U_H gaty uly bolmadyk magnit meýdanynyň induksiýasyna B, tok güýjüne I göni proporsional we geçiriji plastinkanyň galyňlygyna ters proporsionaldyr (b).

$$U_H = R_H \cdot B \cdot I / b = R_H \cdot B \cdot i \cdot a \qquad (4.11.)$$

$$i = I/s; \qquad I = i \cdot s = i \cdot a \cdot b$$

Bu ýerde i – ýarymgeçiriji nusgadaky toguň dykyzlygy; a - nusganyň ini; proporsionallyk koefisiýenti bolan R_H - gaty jisimler üçin hemişelik sandyr we ol Holluň hemişeligi diýilip atlandyrylýar. R_H - birligi L^3/q $[m^3/k]$ (L-uzynlyk, q - elektronyň zarýady) aňladylýar.

Holluň effektiniň tebigatyna seredip geçeliň. Eger 1-nji suratda görkezilişi ýaly geçýän tok strelka bilen görkezilen ugra akýan bolsa, onda elektronlar garşylykly ugra dreýf tizligi V_{dr} bilen hereket edýärler. Şeýle hereket edýän elektronlaryň her birine B magnit meýdany tarapyndan Lorensiň güýji täsir edýär.

$$F_L = -e\,[V_{dr} \cdot B] \qquad (4.12.)$$

bu ýerde e - elektronyň zarýady. Bu güýjün täsiriniň ugry burawjygyň düzgüni bilen kesgitlenilýär. Haçan-da V_{dr} bilen B-niň arasyndaky burç 90° bolsa onda Lorensiň güýjüniň moduly,

$$F_L = \pm e\, V_{dr}\, B \qquad (4.13)$$

Lorensiň güýjüniň täsiri astynda elektronlar plastinkanyň daşky gapdal üstüne gyşarar we bu üst otrisatel zarýadlanar. 1-nji suratda görkezilen nusganyň garşylykly üstünde kompensirlenmedik položitel zarýadlar toplanýar. Bu bolsa C nokatdan D-e ugrukdyrylan $E_H = U_H/a$ elektrik meýdanynyň ýüze çykmagyna getirýär. (U_H - Holluň e.h.g.).

Öz gezeginde E_H – elektrik meýdany elektrona $F = -e \cdot E_H$ güýç bilen Lorensiň güýjüne garşylykly ugura täsir eder. Eger $F=F_L$ bolsa, onda zarýadlaryň garşylykly üstlere toplanmagy tamamlanýar. Deňagramlyk şerti esasynda

$$e\, V_{dr}\, B = -\, e\, E_H \qquad (4.14.)$$

bu ýerden

$$E_H = -\, V_{dr}\, B \qquad (4.15.)$$

Geçirijidäki toguň dykyzlygyny hasaba alyp, ýagny i=enV_{dr} (n-elektronlaryň konsentrasiýasy), alarys V_{dr} = i / (en). Onda ýatlanylyp geçilen deňlikleri ulanyp U_H tapalyň.

$$U_H = E_H\, a = +\, V_{dr}\, B\, a = (1/ (en))\, i\, Ba \qquad (4.16.)$$

Şeýlelikde teoretiki usul bilen tapylan U_H tejribe (eksperiment) tarapyndan alnan formula getirýär.

Bu ýerde Holluň hemişeligi

$$R_H = -\, 1/(en) \qquad (4.17)$$

$$R_H = 1/(ep)$$

Haçan-da biz E_H-yň bahasyny tapanymyzda (4.13) elektronyň diňe ugrukdyrylan hereketiniň tizligini, ýagny V_{dr} göz öňünde tutduk. Ondan başga-da hemme tok geçirijileri (elektronlar) şol bir tizlik bilen hereket edýär diýip kabul etdik.

Emma, hakykatyna seredende esasan hem ýarymgeçiriji materiallary üçin, zarýad geçirijileriň dreýf tizliginiň onuň ýerleşen zonasyna baglylygyny we başga birnäçe fiziki häsiýetnamalary göz öňünde tutup, takyk hasaplamalar geçirilse, onda Holluň hemişeligini şeýle görnüşde ýazmak bolýar.

$$R_H = A\, /\, (en) \qquad (4.18)$$

bu ýerde A - hemişelik, elektronyň öz hereket energiýasyny ýitirşine bagly ululykdyr, ýagny ýylylyk yrgyldysy üçin 1,17, emma ionlaşan garyndyda dargasa onda 1,95 deňdir.

Deşikleriň hereketi toguň ugry bilen gabat gelýär, ýöne elektronlaryň hereketi ters ugra ugrukdyrylandyr. Şol sebäpli hem, Holluň e.h.g. ugury boýunça ýarymgeçirijiniň görnüşini kesgitläp bolýar. Onda Holluň hemişeligi

$$R_H = A\, /\, (ep)\,, \qquad (4.19)$$

p-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin we

$$R_H = - A / (en), \qquad (4.20.)$$

elektronlaryň konsentrasiýasy n-bolan n-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin. Haçan-da ýarymgeçirijiler garyşyk geçirijilige eýe bolsa, ýagny elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýalary gaty uly tapawutlanmasalar, Holluň hemişeligini şeýle hasaplamak mümkin.

$$R_H = A (u_p^2\, p - u_n^2\, n) / e (p\, u_p - n\, u_n)^2 \;, \qquad (4.21)$$

Bu ýerde u_n we u_p degişlilikde elektronlaryň we deşikleriň hereket edijiligi.

Holluň effekti ýärymgeçirijilerde zarýad geçirijileriniň häsiýetnamalaryny öwrenmek üçin örän uly eksperimental mümkinçilikdir. Holluň hemişeligini R_H kesgitläp, zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasyny, R_H alamaty boýunça olaryň görnüşini kesgitlemek mümkin.

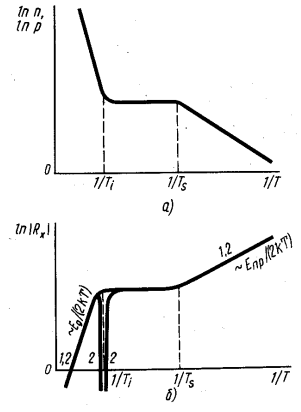
Holluň hemişeligini (R_H) udel elektrik geçirijilige ($\sigma = enu_n$) köpeldip, gatnaşygy alýarys:

$$R_H\, \sigma = Aenu_n / en \;;$$
$$R_H\, \sigma = Au_n \qquad (4.22)$$

Bu gatnaşykdan eger-de A belli bolsa, onda elektronyň hereket edijiligini kesgitlemek bolýar.

$$u_n = R_H\, \sigma / A$$

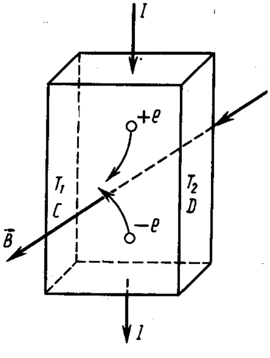
Soňky ýyllarda Holluň effektine esaslanan datçikler gaty köp ýerlerde tehnikada, radioelektronikada, magnit meýdanyny ölçemek bilen baglanşykly gurallary işläp düzmeklikde we taýýarlamakda giňden ulanylýar.



4.7. Surat. n-görnüşli (1 egri) we p-görnüşli (2 egri) ýarymgeçirijilerde zarýad geçirijileriň konsentrasiýasynyň (a) we Holluň hemişeliginiň temperatura baglylygy.

Ettingsgauzeniň effekti.

Ettingsgauzeniň effekti Holluň effekti bilen bilelikde ýüze çykýan effekt bolup, haçanda magnit meýdanyna ýerleşdirilen nusgaden tok goýberilende, magnit meýdanynyň we toguň ugruna perpendikulýar ugurda, temperaturanyň gradiýenti ýüze çykýar. (4.8-nji surat) Bu effekt hususy ýarymgeçirijilerde özüniň ýokary bahasyna eýedir.



4.8. Surat. Hususy ýarymgeçirijilerde Ettingsgauzeniň effektiniň ýüze çykyş shemasy.

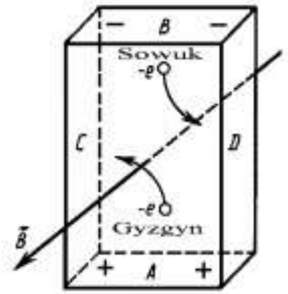
Öňki seredip geçişimiz ýaly, şeýle ýarymgeçirijilerde elektronlar we deşikler magnit meýdany tarapyndan şol bir ugra gyşardylýar. Şol sebäpli hem kristalyň bir gapdal üstünde elektronlaryň we deşikleriň sany deňagramlyk ýagdaýyndan artykmaç bolup rekombinasiýa prosesi ýylylyk generirlenme prosesinden ýokarydyr, emma gapma-garşylykly üstde generirleme prosesi ýokarydyr. Şol sebäpli hem nusganyň (ýarymgeçiriji plastinkanyň) bir gapdal üstünde ýylylyk elektronlary we deşikleri döretmäge harç bolýar, başga bir üstde bolsa olaryň rekombinasiýa prosesi esasynda ýylylyk bölünip çykýar. Şeýlelikde nusganyň gapdal üstlerinde temperaturanyň tapawudy ýüze çykýar.

$$T_1 - T_2 = \Delta T$$

<u>Termomagnit effektleri.</u>

Temperatura gradiýentli geçirijilere magnit meýdanynyň täsiri esasynda ýüze çykýan effektlere termomagnit effektleri diýilip at berilýär.

Goý nusganyň ýokarky (B) we aşaky (A) üstleriniň arasynda temperaturanyň gradiýenti ýüze çyksyn ($T_B<T_A$). (4.9. surat).



4.9. Surat. Rigi-Ledýugiň effektiniň ýüze çykyşynyň çyzgyda görkezilişi.

Onda A üstden B üste tarap elektronlaryň ugrukdyrylan hereketi ýüze çykar. Nusganyň gyzgyn tarapynda temperaturanyň ýokary bolmaklygy sebäpli elektronlaryň (deşikleriň) konsentrasiýasy sowuk tarapyndan uludyr (diffuziýa), şol bir wagtyň özünde ýokary

temperaturada zarýadlaryň haotiki hereketiniň ortaça tizligi hem ýokarydyr (termodiffuziýa). Erkin zarýadlaryň gyzgyn tarapdan sowuk tarapa akyp geçmegi, nusganyň iki gutarýan ýeriniň arasynda potensiallaryň tapawudynyň ýüze çykmagyna getirýär - bu ýüze çykýan e.h.g - e termo e.h.g. diýilip at berilýär.

Bu emele gelen potensiallaryň tapawudy, öz gezeginde garşylykly ugra zarýad geçirijileriniň dreýfini ýüze çykarýar. Emma şeýle-de bolsa nusganyň gyzgyn tarapyndan sowuk tarapyna hereket edýän tokly zarýadlaryň ortaça tizligi ýokarydyr. Şol sebäpli hem gyzgyn üstden sowuk üste hereket edýän zarýadlar magnit meýdany bilen C gapdal üste gyşarýar we bu üst garşylykly üstden gyzgyn bolýar.

Şeýlelikde dikleýin temperaturanyň gradiýentine bagly bolan temperaturanyň kese gradiýenti ýüze çykýar - bu effekte Rigi - Ledýukyň effekti diýilýär.

Umuman aýdanda temperaturanyň gradiýenti bolan nusga, magnit meýdany täsir edende başga-da köp sanly effektler ýüze çykýar.

5-nji bap. Ýarymgeçirijilerde deňagramlykdaky däl zarýadlar

5.1. Deňagramlykdaky we deňagramlykdaky däl zarýadlar. Ferminiň kwaziderejeleri

Deňagramlykdaky däl zarýadlar hakynda düşünje.

Ýarymgeçirijilerde, 0K temperaturadan ýokary temperaturalarda erkin zarýadlar oýandyrylyp başlaýar (generasiýa). Eger-de bu prosesiň diňe özi bolanda, onda wagtyň geçmegi bilen erkin zarýadlaryň konsentrasiýasy artmasyny dowam etdirerdi. Emma, generasiýa prosesiniň başlanmagy bilen bir wagtda rekombinasiýa prosesi hem başlanýar we generirlenen elektronlar öňki ýerlerine gelýärler. Bu iki prosesiň arasynda islendik temperaturada ýüze çykýan deňagramlylyk zarýadlaryň konsentrasiýasynyň deňagramlygyna getirýär we şeýle zarýadlara deňagramlykdaky zarýadlar diýilýär.

Ýarymgeçirijilerde ýylylyk oýandyrmasyndan başgada ýagtylygyň we başga täsirleriň esasynda erkin zarýadlaryň oýandyrmasy bolup geçýär. Şeýle täsirler deňagramlykdaky zarýadlardan artykmaç erkin zarýadlary döredýär. Elektronlaryň umumy konsentrasiýasyny n deşikleriň konsentrasiýasyny p diýip belläliň. Onda artykmaç, ýa-da deňagramlykdaky däl erkin zarýadlaryň konsentrasiýasy:

$$\Delta n = n - n_0 \qquad \Delta p = p - p_0, \qquad (5.1)$$

Bu ýerde n_0 p_0 - deňagramlykdaky zarýadlaryň konsentrasiýasy.

Eger daşky täsir şol bir ululykda belli bir wagtlap dowam etse, onda deňagramlykdaky däl zarýadlaryň konsentrasiýasy ilki çalt artýar, soňra wagtyň geçmegi bilen deňagramlyk ýagdaýa geçýär, şeýlelikde generirlenýän we rekombinirlenýän zarýadlaryň konsentrasiýasy deňleşýär.

Ferminiň kwaziderejeleri

Ýarymgeçirijilerde deňagramlyk ýagdaýyndaky elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy Ferminiň derejesiniň deňagramlyk ýagdaýy hem-de temperatura bilen kesgitlenýär, şu formulalar bilen aňladylýar.

$$n = N_e\, e^{\mu/(kT)}$$
$$p = N_v\, e^{-(\mu+Eg)/(kT)} \qquad (5.2)$$

Deňagramlylykda däl şertlerde elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy deňagramlykdaky ýagdaýdan tapawutlanýar:

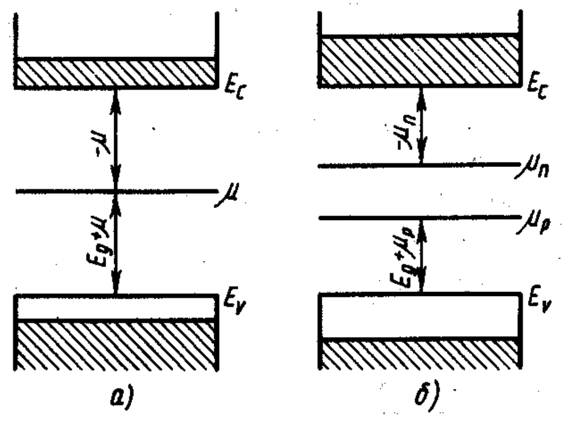
$$n = \Delta n + n_0 \qquad p = \Delta p + p_0, \qquad (5.3)$$

Ýagtylygyň, ionlaşdyryjy bölejigiň täsiri bilen elektron geçiş zonada nähili ýokary derejä ýetenligine garamazdan, gaty çalt (10^{-11} - 10^{-12} s) geçiş zonasynyň düýbüne düşýär, we deňagramlykdaky zarýadlar ýaly energiýasy boýunça paýlanýar. Deňagramlykdaky däl deşikler degişlilikde walent zonasynyň depesine galýar. Şol sebäpli hem artykmaç dörän zarýadlar häsiýetleri boýunça deňagramlykdaky zarýadlardan tapawutlanmaýar. Emma diňe Ferminiň derejesiniň bahasy μ-ni artykmaç dörän zarýadlary göz öňünde tutup özgertmeli.

$$n = \Delta n + n_0 = N_e \exp[\mu_n/(kT)] \qquad (5.4)$$

$$p = \Delta p + p_0 = N_v \exp[-(\mu_p + Eg)/(kT)] \qquad (5.5)$$

Bu ýerde μ_n, μ_p Ferminiň kwaziderejeleri bolup, elektronlar we deşikler üçin Ferminiň derejesiniň roluny (ornuny) ýerine ýetirýär.



5.1-nji surat. a) - diňe deňagramlykdaky zarýadlary bar bolan ýarymgeçirijiler üçin Ferminiň derejesi, b) - artykmaç elektronlary we deşikleri bar bolan ýarymgeçirijiler üçin elektronlaryň we deşikleriň kwaziderejeleri

5.2. Erkin zarýadlaryň ýaşaýyş wagty

Erkin zarýadlaryň generirlenme prosesi, birlik göwrümde her sekuntda generirlenýän zarýadlaryň sany bilen, ýagny generirlenmegiň tizligi bilen häsiýetlendirilýär.

Rekombinirlenme prosesi onuň tersine birlik göwrümde her sekuntda rekombinirlenýän erkin zarýadlaryň sany bilen, ýagny rekombinirlenme tizligi bilen häsiýetlendirilýär.

Her erkin zarýad, generirlenme sebäpli baran zonasynda, rekombinirlenýänçä, ortaça belli bir wagt durýar. Bu wagta erkin zarýadyň ýaşaýyş wagty diýilip at berilýär. Rekombinirlenme tizligi, zarýadlaryň konsentrasiýasy we olaryň ýaşaýyş wagty şeýle gatnaşyk bilen baglanyşýar

$R_n = n/\tau_n$; $R_p = p/\tau_p$; (5.6)

Bu ýerde R_n, τ_n; $R_p \tau_p$; elektronlaryň we deşikleriň degişlilikde rekombinasiýa tizligi we ýaşaýyş wagtlary.

Eger ýarymgeçirijilerde elektronlar we deşikler jübütleýin ýüze çykýan bolsa, onda olar jübütleýin rekombinirlenýärler we olaryň rekombinasiýa tizlikleri bir-birine deňdir

$n/\tau_n = p/\tau_p$ (5.7.)

Köplenç $n \neq p$, degişlilikde, $\tau_n \neq \tau_p$, (5.7)-nji deňlikden görnüşi ýaly esasy zarýadlaryň ýaşaýyş wagty, esasy däl zarýadlaryň ýaşaýyş wagtyndan uludyr. Ondan başga-da zarýadlaryň ýaşaýyş wagty deňagramlykdaky däl zarýadlaryň üýtgemegi bilen üýtgeýär. Eger-de $\Delta n = \Delta p$ bolsa, (5.7) deňligi şeýle görnüşde ýazyp bolýar :

$(n_0 + \Delta n)/ \tau_n = (p_0 + \Delta p)/ \tau_p$ (5.8)

Eger-de deňagramlykdaky elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasyny (n_0,p_0), τ_n , τ_p ýaşaýyş wagtlaryndan aýratyn seretseň, ýagny

$R_0 = n_0/\tau_n = p_0/\tau_p$; (5.9)

bolar, haçanda, τ_n we τ_p deňagramlykdaky zarýadlaryň rekombinasiýa tizliklerini deňagramlykda däl zarýadlaryň konsentrasiýasyna (Δn) bagly däl diýip alnan ýagdaýynda. Onda,

deňagramlykda däl zarýadlaryň ýaşaýyş wagtyny τ diýip, zarýadlaryň rekombinasiýa tizligini tapalyň.

$$R = - d (\Delta n) / dt = \Delta n/\tau \qquad (5.10)$$

Minus alamat rekombinasiýa wagtynda zarýadlaryň konsentrasiýasynyň azalýandygyny görkezýär.

Ýagtylyk şöhlesiniň täsiri bilen ýarymgeçirijide $\Delta n_0 = \Delta p_0$ bolan artykmaç zarýadlar generirlensin. Ýagtylygyň täsiri bes edilenden soň zarýadlaryň konsentrasiýasy wagta baglylykda eksponenta boýunça azalýar. 5.10 deňligi integrirläp alýarys.

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp(-t/\tau) \qquad (5.11)$$

Şeýlelikde artykmaç zarýadlaryň ortaça ýaşaýyş wagty, rekombinasiýa sebäpli zarýadlaryň e gezek azalýan wagtyna deňdir.

$\Delta n = \Delta n_0 / e$ haçanda $t = \tau$.

Elektronlaryň rekombinasiýasy, ýagny geçiş zonadan walent zona geçiş prosesi esasan iki görnüşde bolup bilýär. Birinji görnüşi zonalaryň arasyndaky rekombinasiýa, ikinji görnüşi garyndy derejeleriniň üsti bilen geçýän rekombinasiýa (5.2-nji surat)

5.3. Zonaara rekombinasiýa. Aýratyn derejeleriň üstünden rekombinasiý

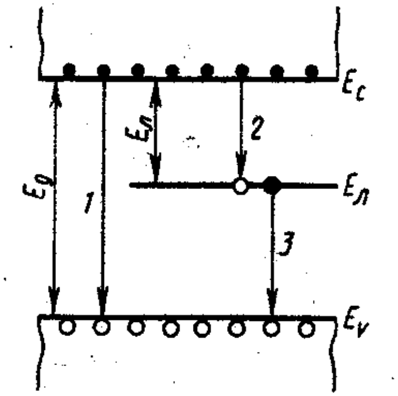
Termodinamiki deňagramlylyk ýagdaýynda zonaara rekombinasiýanyň tizligi R_0 elektronlaryň (n_0) we deşikleriň (p_0) konsentrasiýasyna proporsionaldyr we generasiýa tizligine deňdir g_0

$$R_0 = \gamma n_0 p_0 = \gamma n_i^2 = g_0 \qquad (5.12)$$

Bu ýerde proporsionallyk koefisiýenti

$$\gamma = g_0 / n_i^2 \qquad (5.13)$$

γ - ululyga rekombinasiýa koeffisiýenti diýilýär.



5.2. Surat. Ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynda zonaara rekombinasiýa we aýratyn derejeleriň üstünden rekombinasiýa.

Daşky täsiriň esasynda, ýarymgeçirijide generasiýa tizligi g ululyga artýan bolsa, onda rekombinasiýa tizligi hem R ululyga artar. Haçanda rekombinasiýa tizlikleriniň jemi R_0+R generasiýa tizlikleriniň jemine (g + go) deň bolsa, onda elektronlaryň $n = n_0 + \Delta n$ we deşikleriň $p = p_0 + \Delta p$ konsentrasiýasynyň durnukly ýagdaýy ýüze çykar.

$$R_0 + R = \gamma(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) = g_0 + g \qquad (5.14)$$

Şu deňlige γ -nyň bahasyny goýup alarys

$$g_0+g = (g_0 / n_i^2)(n_0p_0 + p_0\,\Delta n+ n_0\,\Delta p + \Delta n\,\Delta p) \qquad (5.15)$$

Ýarymgeçirijide goşmaça elektronlary we deşikleri oýandyrýan, daşky täsiriň uly bolmadyk ýagdaýynda, ýagny Δn, Δp << $(n_0 + p_0)$, hem-de $\Delta n = \Delta p$ we $n_0p_0 = n_i^2$ bolýandygyny göz öňünde tutup alýarys.

$$R = g = (g_0 / n_i^2)(n_0 + p_0)\,\Delta n \qquad (5.16)$$

(5.16)-njy deňlikden görnüşi ýaly, şeýle şertler ýerine ýetende artykmaç dörän zarýadlaryň rekombinasiýa tizligi olaryň konsentrasiýalaryna göni proporsionaldyr. Deňagramlykda däl zarýadlaryň ýaşaýyş wagty:

$$\tau = \Delta n/R = \Delta n/g = n_i^2 /[\, g_0 (n_0 + p_0)] \qquad (5.17)$$

Deňagramlykda däl zarýadlaryň ýaşaýyş wagty, zarýadlary oýandyrmagyň derejesine bagly bolman, ýarymgeçirijidäki garyndylaryň konsentrasiýasyna ters proporsionallykda baglydyr. Erkin zarýadlaryň ýaşaýyş wagty hususy ýarymgeçirijilerde şeýle şert ýerine ýetende $n_0 = p_0 = n_i$ iň uly bahasyna eýedir.

$$\tau_i = n_i / (2g_0) \qquad (5.18)$$

Has ýokary derejede oýandyrma bolan ýagdaýynda ýagny

$\Delta n = \Delta p >> n_0 + p_0$ bolanda

$$R = g = (g_0 / n_i^2) (\Delta n)^2 \qquad (5.19)$$

$$\tau = \Delta n/R = \Delta n/g = n_i^2/g \cdot 1/\Delta n$$

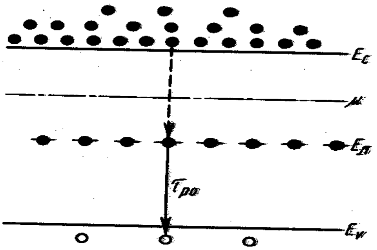
Ýagny, zarýadlaryň rekombinasiýa tizligi artykmaç, deňagramlykda bolmadyk zarýadlaryň konsentrasiýasynyň kwadratyna göni proporsionaldyr.

Zonaara rekombinasiýasy prosesinde energiýanyň bölünip çykmagy ýagtylygyň kwanty görnüşde $h\upsilon$ ýa-da ýylylyk görnüşinde (fononlar) bolýar. Birinji ýagdaýda rekombinasiýa ýagtylyk goýberilýän (izluçatelnyý), ikinji ýagdaýda bolsa ýagtylyk goýberilmeýän (bezizluçatelnyý) rekombinasiýa diýilip at berilýär.

Indi aýratyn energetik derejeleriň üsti bilen bolup geçýän rekombinasiýa seredip geçeliň.

Aýratyn energetik derejeleriň üsti bilen rekombinasiýanyň geçiş mehanizmi şeýle proseslerden durýar, ýagny elektron geçiş zonasyndan ilki bilen, gadagan zonada ýerleşen aýratyn derejä geçýär, soňra walent zona boş ýere geçýär. (5.3-nji surat).

Şeýle lowuşkanyň üsti bilen geçiş köplenç ýagdaýda göni geçiş zonasyndan walent zona geçmekden ýokary ähtimallyga eýedir.



5.3. Surat. Ýokary n-geçirijiligi bolan ýarymgeçirijilerde, aýratyn saklap galyjy (lowuşek) derejeleriň üstünden, rekombinassiýanyň çyzgyda görnüşi.

5.3-nji suratda n-görnüşli ýarymgeçirijilerde rekombinasiýanyň gadagan zonada ýerleşen aýratyn derejeleriň üsti bilen geçiş ugurlary görkezilen.

Ýarymgeçirijilerde gadagan zonada ýerleşen aýratyn energetik derejeler effektiw rekombinasiýa merkezi bolup bilýär, haçan-da olar, walent zonasynyň depesinden we geçiş zonasynyň düýbünden uzakda ýerleşen bolsalar. Eger-de şeýle şert ýerine ýetmese onda aýratyn merkezler tarapyndan saklanylan zarýadlar belli bir wagtdan soň öňki zonasyna zyňylýarlar. Rekombinasiýa merkezleri köplenç “Lowuşka” diýilip atlandyrylýar. Geçiş zonadan walent zonasyna geçýän elektronyň rekombinasiýa merkezinde saklanylmagyna, lowuşka tarapyndan elektronyň tutulmagy diýilýär.

6-njy bap. Galtaşma (kontakt) hadysalary

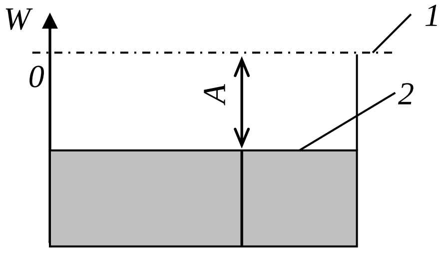
6.1. Iki metalyň galtaşmasy

- *Dürli hilli gaty jisimleriň biri – birine degip duran ýerinde döreýän fiziki hadysalara galtaşma hadysalary diýilýär.*

Olar kesgitli atoma "baglanylmadyk" elektronlary bar bolan metallarda we ýarymgeçirijilerde uly amaly gyzyklanma döredýär. Galtaşma (kontakt) hadysalary üçin elektronlaryň energiýasy möhüm rol oýnaýar. Elektronyň energiýasynyň nol bahasyna derek zarýadsyzlanmadyk metal jisimden *daşdaky* erkin hereketsiz elektronyň energiýasyny kabul etmek amatlydyr. Onda metalyň içindäki geçiriji elektronlar $e\varphi$ çuňlugy bolan potensial gutuda bolýarlar, bu ýerde $\varphi > 0$ - metalyň potensialy. Zarýadsyz metaldan daşda potensial $\varphi^{/} = 0$. Elektronyň metaldan çykyş işi A Ferminiň derejesinden hasaplanylýar. 6.1 çyzgyda bu hemme energiýalar bellenendirler (1 – erkin hereketsiz elektronyň energiyasynyň derejesi; 2 –elektrohomiki potensialyň derejesi). $\mu - e\varphi$ ululyga elektrohimiki potensial diýilýär.

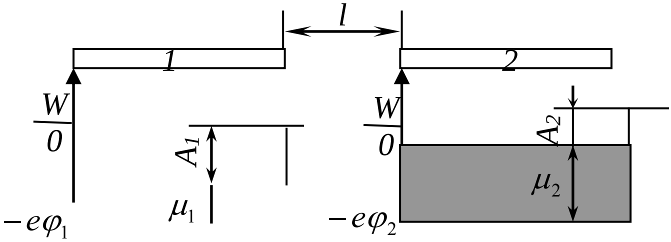
- Elektrohimiki potensiallary we A_1 we A_2 çykyş işleri bilen tapawutlanýan,

dürli hilli iki metala seredeliň. Goý $A_1 < A_2$ (7.2-nji yzgy). Birinjä garanda ikinji metalda



elektronlar tarapyndan ýokarrakky energetiki derejeler doldurylandyr. Ilki başga metallar kristalliki gözenegiň periodyndan birnäçe esse köp aralyga biri-birinden uzaklaşdyrylan. Eger metallar biri-birine degirilse, onda geçiriji elektronlar bölekleýin ikinji metaldan birinji metala geçýýärler. Bu ýagdaýda olaryň

elektrohimiki potensiallary deňleşýärler: metal 1 otrisatel zarýadlanýar, metal iki bolsa položitel (6.3 çyzgy).

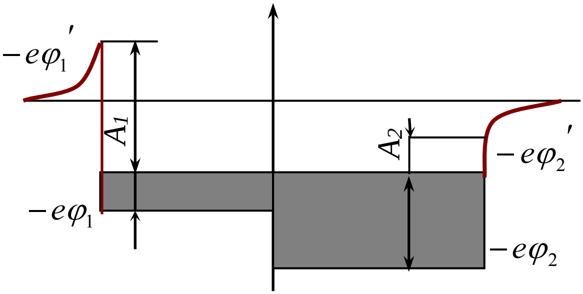


6.2. surat

Şol bir wagtyň özünde galtaşýan (biri-birine degip duran) metallarda elektronlaryň energetiki derejeleriniň özara süýşmeleri bolup geçýär. Otrisatel zarýadlanan metalda hemme derejeler ýokary süýşýärler, položitel zarýadlanan metalda bolsa – aşak (6.3 çyzgy).

Deňagramlylyk ýagdaýda elektro – himiki potensiallar deňleşýärler:

$$-e\varphi_1 + \mu_1 = -e\varphi_2 + \mu_2 \tag{6.1}$$



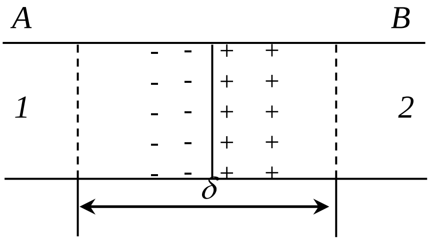
6.3. surat

Biri-birine degip duran metallardaky Ferminiň derejesiniň dürlilige **potensiallaryň içki galtaşma tapawudynyň** döremegine getirýär:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (\mu_1 - \mu_2)/2. \tag{6.2}$$

- Potensialyň φ_1 – den φ_2 - ä çenli üýtgemegi galyňlygy δ bolan örän ýuka

gatlakda bolup geçýär (6.4 çyzgy). Metallaryň biri-birine degip duran gatlagyny δ galyňlykly tekiz kondensator ýaly seredeleiň we bu gatlakda metallaryň galan göwrümleri bilen deňeşdirilende tok äkidijileriň sanynyň mümkin bolan üýtgemesine baha bereliň. Tekiz kondensatoryň obkladkalarynyň arasyndaky potensiallaryň tapawudynyň for-



6.4. surat

mulasyndan peýdalanalyň:

$$\Delta\varphi' = \frac{q}{c} = \frac{\sigma S}{C} = \frac{\sigma S}{\varepsilon_0 S}\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\delta . \qquad (6.3)$$

Bu ýerde q zarýad bilen σ üst dykyzlygyny we obkladkalaryň S meýdanyny baglanyşdyrýan we tekiz kondensator üin C sygymyň formulalary ulanylan. (6.3) formuladan $\sigma=\varepsilon_0\Delta\varphi'/\delta$. Haçanda $\delta \sim 3\cdot 10^{-10}$ m we $\Delta\varphi'=1eW$ bolanda $\sigma \sim 0.03$ Kl/m^2. Metallaryň galtaşma gatlagynda birlik meýdançanyň içinde tok äkidijileriň sanynyň üýtgemegi $\Delta n=\sigma/e \sim 2\cdot 10^{17}$ m^{-2} . Galtaşma gatlakda birlik meýdançanyň içinden geçýän tok äkidijileriň sany $n \sim \delta n_0 \sim 3\cdot 10^{-10}\cdot 10^{29}$ $m^{-2}= 3\cdot 10^{19}$ m^{-2}. Şeýlelikde, $\Delta n/n=1/150$. Bu iki metal galtaşanda örän ýuka galtaşma gatlakda metallaryň galan göwrümlerinde elektronlaryň n_0 sanynyň has az üýtgemesi bolup geçýär. Diýmek, iki metalyň galtaşýan ýeriniň udel elektrik geçirijiligi γ we udel garşylygy ρ bu metallaryň öz häsýetlerifden tapawutlanýarlar.

Şu wagta çenli aýdylanlar $T=0K$ temperatura degişlidir. Bilişimiz ýaly, metallardaky elektron gazy üçin himiki potensial $\mu=\mu(T)$ temperatura baglydyr. Bu (6.2) formula laýklykda φ_1-φ_2

ululygyň temperatura baglydygyny aňladýar. Ýöne $\mu(T)$ baglylyk örän gowşakdyr. Metal gyzdyrylanda Ferminiň derejesi aşakdaky formula boýunça örän az süýşýär

$$\mu(T)=\mu(0)[1-(1/12)(\pi RT/\mu(0))^2].$$

Diýmek metallaryň galtaşýan ýeri gyzdyrylanda içki galtaşma potensiallaryň tapawudy ujypsyz üýtgeýär we ýokarda getirilen netijelere täsir edip bilmeýär.

- Içki galtaşma potensiallaryň tapawudyndan başga elektronlaryň 1 we 2

metallardan çykyş işine bagly bolan **daşky galtaşma potensiallaryň tapawudy** hem bardyr:

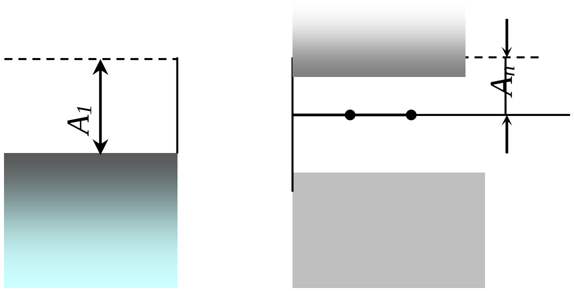
$$\varphi'_1-\varphi'_2=-(A_1-A_2)/e. \quad (6.4)$$

Bu potensiallaryň tapawudy metallaryň dürli jübtleri üçin woltyň onlardan bir böleginden bir wolta çenli aralykda bolýar we üstüň arassalygyna we ýagdaýyna güýçli baglydyr. Ýokatda getirilen bahalamalar şular ýaly $\Delta\varphi'$ potensiallaryň tapawudynyň alnan netijeleri üýtgetmeýändigini görkezýär.

6.2. Metal bilen ýarym geçirijiniň galtaşmagy

- Inde metal bilen ýarymgeçiriji galtaşanda bolup geçýän hadysa seredeliň.

Kesgitlilik üçin n – görnüşli ýarymgeçiriji saýlap alalyň. Mundan beýläk üçin möhüm bolan pikir öňe atalyň, ýagny elektronyň metaldan çykyş işi A_1 n – görnüşli ýarymgeçirijiden çykyş işinden (A_n) uly. 6.5. *a* suratda metalyň geçiriji zonasynyň, ýarymgeçirijiniň walent zonasynyň we onyň donor derejeleriniň galtaşma çenli özara ýerleşişleri görkezilen. Metal bilen ýarymgeçiriji galtaşanda donor derejelerden elektronlar metala geçip başlaýarlar



a) b)

6.5. surat

(6.5. *b*). *n*- ýarymgeçirijiniň galtaşma golaý gatlagynda elektronlar azalýar we polojitel zarýadlanýar, metal bolsa otrisatel zarýad alýar. Metal bilen ýarymgeçirijiniň aeasynda goşa elektrik gatlagy emele gelýär. Ýöne bu gatlagyň döremegi üçin şert iki metalyň gatlaşmasyndakydan bütinleý başgadyr. Bu *n* – görnüşli ýarymgeçirijide geçiriji elektronlaryň sanynyň metal bilen deňeşdirilende ($10^{29}m^{-3}$ – ň ýerine 10^{20} m^{-3}) örän azdygy bilen baglydyr. Ýarymgeçirijiniň meýdany $1m^2$ we galynlygy 10^{-12} bolan üst gatlagyndan 10^7 elektron bardyr. Eger goşa gatlak kondensator ýaly seredilse, onda metal bilen ýarymgeçirijiniň araçäginde tertibi takmynan *1mkW* bolan, galynlygy 10^{-8} m -e deň goşa gatlakda örän kiçi potensiallaryň tapawudy $\Delta\varphi'$ dörärdi. Şunuň bilen bir hatarda tejribelerden $\Delta\varphi'$ -ň birnäçe woltlarda deňdigi mälim boldy. Bu $\delta \approx 1\,mkm$ galyňlykly gatlaşma gatlaga laýyk gelýär. Şunlukda, ýarymgeçirijide geçiriji elektronlaryň sanynyň azlygy sebäpli ondaky gatlaşma gatlagyň galyňlygy metallardaka garanda takmynan 10000 esse ulydyr.

- Ýarymgeçirijiniň galtaşma gatlagynda erkin elektronlar ýok diýen ýalydyr we onuň elektrik garşylygy ýarymgeçirijiniň galan göwrüminiňkiden örän ulydyr. Muňa “bekleýji” gatlak diýilýär. Munuň ýaly gatlagyň metal bilen ýarymgeçirijiň galtaşma gatlagynyň üýtgeýän toga göneldiji täsir etmegine sebäp bolýar.

Daşky elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň galtaşma gatlagyň ölçegine we garşylygyna täsirine jikme-jik seredeliň eger ***E*** wektor metaldan ýarymgeçirijä ugrukdyrylan bolsa (metal çeşmäniň polojitel polýusy bilen, ýarymgeçiriji bolsa otrisatel bilen birikdirilen), onda elektronlar ýarymgeçirijiniň göwrüminde

galtaşma gatlaga *sorulýarlar*, bu gatlagyň δ galynlygynyň kiçelmegine we geçirijileriniň artmagyna getirýär. **Goýberiji** diýlip atlandyrylýan bu ugurda elektrik togy metal bilen ýarymgeçirijiniň gatlaşma gatlagy geçip bilýär. Eger **E** wektor ýarymgeçirijiden metala ugrukdyrylan bolsa, onda elektronlar goşa gatlakdan ýarymgeçirijiniň göwrümine *gysylyp çykarylýarlar,* bu ýagdaýda bekleýji gatlagyň galynlygy we onuň garşylygy artýar. Gatlak arkaly bu ugurda tok geçmeýär. Şeýlelik, bilen metal bilen ýarymgeçirijiniň gatlaşma gatlagy togy *birtaraplaýyn* geçirýär we üýtgeýän togy göneldýär.

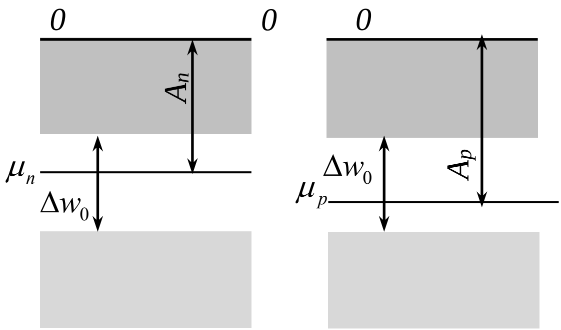
Elektronyň metaldan çykyş işiniň *n* – ýarymgeçirijiden çykyş işinden uly ýagdaýyndan başga *n* – ýarymgeçirijiniň metaldan uly çykyş işe eýe bolýan ýagdaýy hem mümkindir ($A_n > A_1$). Bu ýagdaýda elektronlar metaldan ýarymgeçirijä geçýarler we gatlaşma goşa gatlagyň garşylygy ýarymgeçirijiniň galan göwrüminiňkiden kiçi bolýar. Metalyň munuň ýaly ýarymgeçiriji bilen gatlaşmasy bekleýji gatlagy emele getirmeýär we üýtgeýän toga güneldiji täsir etmeýär.

6.3. Elektronly we deşijekli ýarymgeçirijiniň gatlaşmasy (p-n-geçiş)

- Häzirki zaman elektronikasynyň köp ýerlerinde dürli *n* – we *p*- görnüşli

gejirijikli iki ýarymgeçirijiniň gatlaşmasy uly rol oýnaýar. Munuň ýaly gatlaşma **elektron - deşijik geçişi** ýa-da *p-n* – geçiş diýilýär.

Bular ýaly geçişler diňe üýtgeýän toklary göneltmek üçin däl-de, eýsem ýokary ýygylykly toklary işläp çykarmak we güýçlendirmek üçin hem ulanylýar. *P-n* – geçiş amaly taýdan ýarymgeçirijiniň göwrüminde dürli usullar bilen bir geçirijilik beýlekä geçirilýän ýerde amala aşyrylýar.



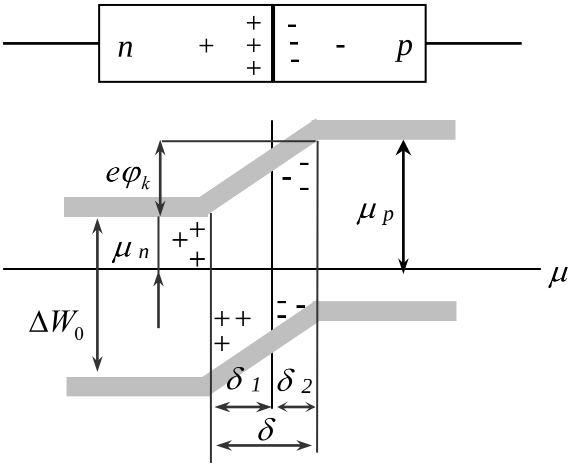
6.6. surat

Goý elektronyň çykyş işi A_n we Fermi derejesi μ_n bolan donor ýarymgeçiriji çykyş işi A_p we Fermi derejesi μ_p bolan akseptor ýarymgeçiriji bilen galtaşdyrylan (6.6-njy surat). Munuň ýaly ýarymgeçirijileriniň galtaşmasy elktronlaryň *n* – ýarymgeçirijiden *p* – ýarymgeçirijä, deşijekleriň bolsa ters ugra bu bölejikleriň *n* – we *p* – ýarymgeçirijilerdäki ýokary sanlaryna laýyklykda geçmegine getirýär. Şol bir wagtyň özünde ýarymgeçirijileriň arasynda deňagramlylyk ýüze çykýar we himiki potensiallaryň deňleşmegi bolup geçýär.

- δ_1 galyňlykly galtaşma gatlagynda *n* – ýarymgeçirijiniň polojitel göwrüm

zarýady emele gelýär, *p* – ýarymgeçirijiniň δ_2 galyňlykly galtaşma gatlagynyň bolsa otrisatel zarýad döreýär. Ýarymgeçirijilerde akseptorlaryň we donorlaryň sanlary deň bolanda zarýadlary ýygnan δ_1 we δ_2 gatlaklaryň galyňlyklary bir meňzeşdir ($\delta_1 = \delta_2$) (6.7-nji surat). δ_1 we δ_2 gatlaklaryň aeasynda donor ýarymgeçirijiden akseptor ýarymgeçirijide ugrukdyrylan **galtaşma potensiallaryň tapawudy** döreýär. Galtaşma potensiallaryň tapawudy bilen bagly bolan elektrik meýdany elektronlaryň *n* – den *p*- ýarymgeçirijä geçmegi kynlaşýar we olaryň *p* – den *n* – ýarymgeçirijä geçmesi aňsatlaşýar. φ_k - ň käbir bahalarynda tok äkidijileriniň biri-birine garşylykly ugrukdyrylan akymlary deňleşýär we ýarymgeçirijeleriň arasynda deňagramlaşma hadysasy tamamlanýar – **deňagramlyk** ýüze çykýar.

Elektron n – den p – ýarymgeçirijä geçende φ_k potensialy ýeňip geçýär we



6.7. surat

elektronyň potensial energiýasyna geçýän iş edýär. Netijede galtaşma gatlagyň δ galynlygynyň çäginde p yarymgçinjidäki elektronlaryň hemme energetik derejeleri n ýarymgeçirijidäki elektronlaryň derejeler bilen deňleşende $e\varphi_k$ "beýiklige" galýar (6.7- nji surat).

- Galtaşýan ýarymgeçirijilerde iki äkidijileriň iki alamatlysy hem bardyr.

Elektron ýarymgeçirijisinde esasy äkidijiler elektronlar bolup, esasy dälleri deşijeklerdir. Deşijekli ýarymgeçirijide tersine, esasy äkidijiler deşijekler bolup, esasy dälleri elektronlardyr. Elektronlaryň n – den p – ýarymgeçirijä akymynyň aşakdaky aňlatmanýň üst bilen kesgitlenýändigini subut etmek mümkindir

$$I_{0_{n-p}} = B\,exp\left[-\left(\mu_n + e\varphi_k\right)/\,kT\right] \tag{6.5}$$

Bu ýerde B – temperatura bagly hemişelik; μ_n - n – ýarymgeçirijide Ferminiň derejesinden geçiriji zonanyň düýbine çenli aralyk. Elektronlaryň p – den n – ýarymgeçirijä akymy

$$I_{0_{n-p}} = B\,exp\left[-\,\mu_p\,/\,kT\right] \tag{6.6}$$

bu ýerde μ_p- p – ýarymgeçirijide Ferminiň derejesinde geçiriji zonanyň düýbine çenli aralyk. 6.8-nji çyzgy deňagramlylyk ýagdaýda $\mu_p = \mu_n + e\varphi_k$ bolýandygynyň görkezýär. 6.5- nji we 6.6- njy çyzgylardan

$$I_{0_{n-p}} = I_{0_{n-p}} \tag{6.7}$$

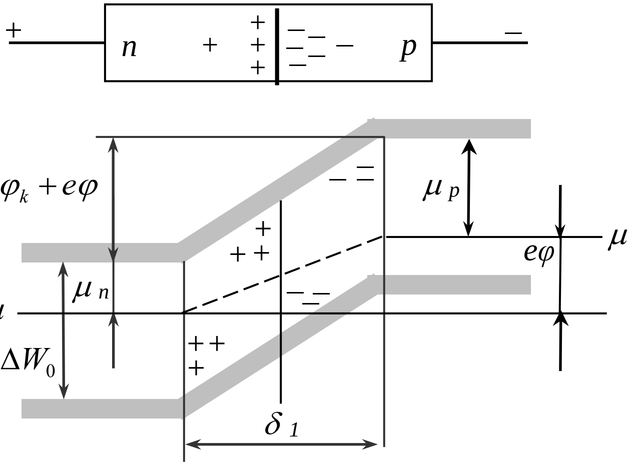
bolýandygy gelip çykýar. Şuňa meňzeşlikde deşijekleriň *p* – den *n* – *e* we *n* – den *p* – ýarymgeçirijä geçýän garşylykly akymlary biri-birlerine deňdir. Diýmek, ýarymgeçirijiler deňagramlaşanlarynda toguň esasy äkidijileriniň akymy bilen ýok edilýär (kompensirlenýär) we äkidijileriň *p* – *n* – geçiş arkaly jemleýji akymy nola deň.

6.4. Daşky potensiallaryň tapawudynyň p – n – geçişe täsiri

- Goý *p* – *n* – geçişe galtaşma potensiallaryň tapawudy φ_k -nyň ugry bilen

gabat gelýän daşky potensiallaryň tapawudy φ goýlan bolsun. Toguň çesmesiniň plýusy *n* minusy bolsa *p* – ýarymgeçirijä dakylan. Bu *n* donor ýarymgeçirijiden *p* akseptor ýarymgeçirijä geçýän elektronlar üçin potensial böwediň beýikligini $e\varphi$ ululyga (6.8- nji surat) artdyrýar we *p* – *n* – geçişiň deňagramlygyny bozýar. Elektronlaryň *n* – den *p*- ýarymgeçirijä akymy I_{n-p} deňagram lykly akym (6.5) bilen deňeşdirilende azalýar, sebäbi $e(\varphi_k + \varphi)$ beýiklikli böwedi, beýikligi $e\varphi_k$ bolan böwede garanda $exp[-e\varphi / kT]$ esse az elektron geçip bilýär. Elektronlaryň *n* – den *p* – ýarymgeçiriji ugurda akymy.

$$I_{n-p} = I_{o_{n-p}} \, exp[-e\varphi / kT] \tag{6.8}$$



6.8. surat

Böwediň beýikliginiň üýtgemegi p – den n – ýarymgeçirijä geçýän, (6.6) formula boýunça Ferminiň deňlemesiniň p akseptor ýarymgeçirijiniň geçiriji zonasynyň düýbünden μ_p aralygy bilen kesgiitlenýän elektronlaryň akymyny üýtgetmeýär.

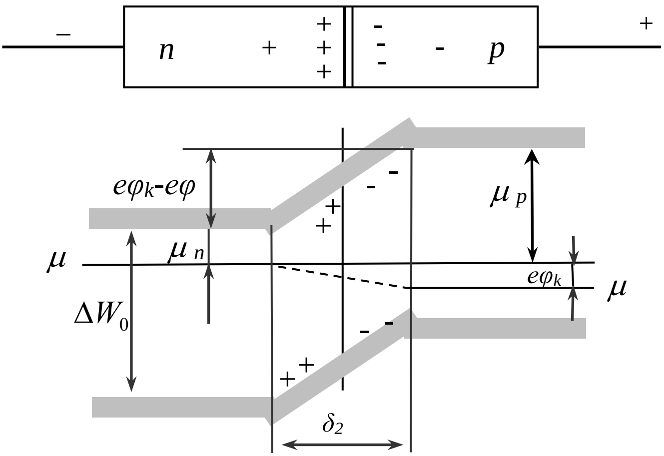
Netijede zynjyrda elektronlaryň p-den n-yarymgeçrijä jemleýji akymy, ters ugurda bolsa elektirik togy döreýär. Bu toguň güýji

$$I_n = I_{n-p} - I_{o_{n-p}} = I_{o_{n-p}} exp[-e\varphi / kT] - I_{o_{n-p}} = I_{o_{n-p}} \left(e^{-e\varphi/kT} - 1\right) \quad . \tag{6.9}$$

p-n geçişde bu tok ulalan δ galyňlykly galtaşma gatlak arkaly akýar. Bu ýagdaýda daşky potensiallaryň tapawudynyň ugruna **bekleýän** ugur diýilýär.

- Indi daşky potensiallaryň tapawudyny toguň çeşmesiniň minusy n

ýarymgeçirijide, plýusy bolsa p –ýarymgeçirijide bolar ýaly çatalyň (6.9-njy surat). Bu ýagdaýda potensial böwediň beýikligi $e\varphi_k$ ululyga kiçelýär we $e(\varphi_k\text{-}\varphi_1)$ ululyga deňdir we



6.9. surat

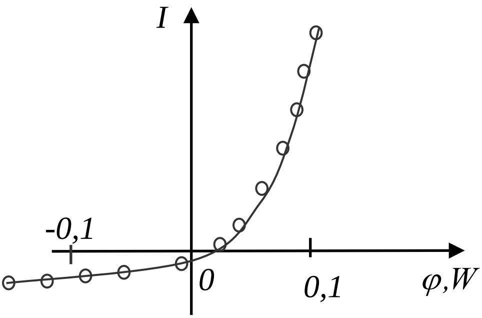
elektronlaryň çepden saga akymy *exp(eφ*$_k$*/kt)* esse artýar, çepden saga ugrukdyrylan jemleýji tok kemelen δ_2 galyňlykly galtaşma gatlak arkaly akýar we aşakdaka deňdir

$$I_n = I_{n-p} - I_{o_{n-p}} = I_{o_{n-p}} exp[e\varphi / kT] - I_{o_{n-p}} = I_{o_{n-p}} \left(e^{e\varphi / kT} - 1\right) .$$

(6.10)

Munuň ýaly elektrik akymyna getirýän daşky potensiallaryň tapawudynyň ugruna **goýberýän** ugur diýilýär. Goýberýän ugruň elektrik akymynyň bekleýän ugruňkydan tapawudy eksponentadaky daşky potensiallaryň tapawudynyň alamatyna täsir edýär.

(6.10) formula *p* –ýarymgeçirijidäki *esasy däl äkidijiler* girýär. Bu formulalar daşky potensiallaryň tapawudynyň täsiri astynda *p-n* –geçiş arkaly elektrik akymynyň elektron düzüjisini aňladýär. Ondan başga elektrik akymynyň deşijekli ýarymgeçirijilerden biri-birine tarap ugrukdyrylan akymlary bilen bagly bolan deşijekli düzüjisi hem bardyr. Bu I_p düzüjiler üin formulalar (6.9) we (6.10) formulalara meňzeşlikde alynýar, ýöne olara *n* –ýarymgeçiriji üçin elektrik akymynyň esasy däl äkidijiler bolan deşijekleriň elektrik akymy döreýär.



6.10. surat

- $p-n$ – geçiş arkaly doly elektrik akymy elektronly we deşijekli elektrik

akymlarynyň jemidir. Eger daşky potensiallaryň tapawudy φ bekleýän ugurda goýlan bolsa, onda φ- niň artmagy bilen zynjyrdaky elektrik akymy özüniň $\varphi \approx 0{,}1\,W$ – da amala aşýan doýgun çägine ymtylýar. Doýgun elektrik akymynyň güýji esasy däl äkidijileriniň galtaşma gatlak arkaly bir sekundyň dowamynda galtaşma gatlagyň iki tarapynda emele gelýän akymy bilen kesgitlenýär. Ýarymgeçirijilerde elektrik akymynyň esasy däl äkidijileriniň sany uly däl, şu sebäpli doýgun elektrik akymy uly däldir. Beklenýän ugurda $p-n$ – geçiş elektrik akymyny goýbermeýär diýen ýalydyr.

Eger $p-n$ – geçişe daşky potensiallarynyň tapawudy göni, goýberýän ugurda goýlan bolsa, onda elektrik akymynyň güýji $p-n$ – geçiş arkaly eksponenta boýunça artýar we φ- niň kiçi bahalarynda uly bahalara ýetýär. (6.10)- njy suratda $p-n$ – geçişiň wolt-amper häsiýetnamasy (WAH) görkezilen.

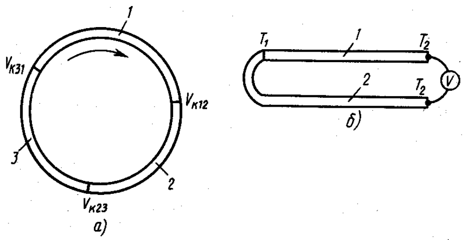
Oňat $p-n$ – geçişlerde göneltme koeffisiýenti ýüz müňlere ýetýär. $p-n$ – geçişiň göneldiji häsiýeti tehnikada giňden peýdalanylýar. Önümçilik $p-n$ – geçişe esaslanan selenli, germaniýli we kremniýli göneldijileri öndürýär. $p-n$ – geçişiň göneldiji häsiýeti ýokary ýygylykly elektromagnit yrgyldylaryny detektirlemek üçin niýetlenen kristalliki diodlary gurnamak üçin ulanylýar. Olaryň kömegi bilen radiolokasiýada ulanylýan santimetirler zolagyndaky tolkunlar detektirlenýär. Kristallik diodlar çyraly (lampaly) diodlardan mehaniki berklikleri, arzanlygy, kiçi

ölçegleri, uly işleýiş möhleti we başga möhüm aýratynlyklary bilen tapawutlanýarlar.

6.5. Termo-e.h.g. Zeýebekiň effekti. Peltýeniň effekti

Ýapyk zynjyryň hemme ýerleri şol bir temperaturada bolsa, onda sepleşikde ýüze çykýan elektrigi hereketlendiriji güýçler bu zynjyrda elektrik toguny ýüze çykarmaýar.

Mysal üçin üç sany dürli jişimlerden duran ýapyk zynjyra seredeliň (6.1 - surat). Položitel diýip , sagat strelkasinyň ügruna zynjyrda togy ýüze çykarýaň ugra aýdalyň. Seredilýan materiallaryň termodinamiki çykyş işini degişlilikde χ_{01}, χ_{02} we χ_{03} diýip belläliň.



6.1. Surat. Termo-e.h.g. düşündirilişine degişli.

Onda

$$eU_{k\,12} = \chi_{01} - \chi_{02} \qquad eU_{k\,23} = \chi_{02} - \chi_{03} \qquad eU_{k\,31} = \chi_{03} - \chi_{01} \qquad (6.1)$$

Eger (6.1) deňlikleriň sag we çep taraplaryny jemläp seretseň, onda sepleşikde ýüze çykýan e.h.g. jemi nola deň bolar. Indi, mysal üçin 1-2 sepleşigiň temperaturasyny üýtgedeliň. Ferminiň derejesinin hem-de termodinamiki çykyş işimiň temperatura baglylygy sebäpli, $U_{k\,12}$ hem üýtgeýär. Beýleki ikisi ($U_{k\,23}$ we $U_{k\,31}$) üýtgemän galar. Şeýlelikde U_k potensiallaryň jemi

nola deň bolman, netijileýji potensiallaryň tapawudy $U_{T\text{-e.h.g.}}$ ýüze çykyp, oňa termoelektro-hereketlendiriji güýç diýilýär.

Termo-e.h.g. ýüze çykmagynyň esasy sebäbi diňe bir temperatura bilen sepleşikdäki potensiallaryň tapawudynyň ýüze çykmaklygy bolman, geçirijiniň ugryna temperaturanyň üýtgemesi barlygy sebäpli erkin zarýadlaryň diffuziýasynyň we termodiffuziýasynyň ýüze çykmaklygydyr. Mundan beýläk iň ýönekeý zynjyryň mysalynda, ýagny bir tarapy birleşdirilen iki geçirjä seredeliň. Geçirijileriň sepleşmedik uçlaryna woltmetri birleşdireliň (6.1b surat). Bu effektden başga ýüze çykýan goşmaça effektleri hasaba almazdan seredeliň.

Teoretiki analizlerden görünişi ýaly, haçanda bir sepleşigiň temperaturasy T_2 beýleki sepleşikleriň temperaturalaryndan tapawutlanýan bolsa, onda termo-e.h.g.

$$U_{T\text{-e.h.g.}} = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_2 - T_1) \qquad (6.2)$$

Bu ýerde α_1 we α_2 koeffisiýentler 1-nji we 2-nji materiallaryň häsiýetnamalaryna baglydyr. Olar differensial termo-e.h.g. diýilip atlandyrylýar. Wyroždeн däl n-tipli ýarymgeçirijiler üçin:

$$\alpha_n = -k/e \cdot (r + 2 - \mu/kT), \qquad (6.3)$$

Bu ýerde r - erkin hereket aralygynyň uzunlygynyň (λ) elektronyň energiýasyna baglylygynyň formulasyndaky dereje görkeziji :

$$\lambda \sim E^r \qquad (6.4)$$

Dereje görkeziji r dargama mehanizmine baglydyr; meselem gözenegiň akustiki ýylylyk yrgyldysyna dargasa $r = 0$, garyndynyň ionlaryna dargasa $r = 2$ we ş. m.

Wyrožden däl p - tip ýarymgeçirigi üçin

$$\alpha_p = k/l \cdot (r + 2 - \mu^p/kT), \qquad (6.5)$$

bu ýerde - μ^p - ferminiň derejeşinden walent znanyň depisine çenli aralyk.

Elektrik togy elektronlar we deşikler tarapyndan bilelikde geçirilýän ýarymgeçirijiler üçin, termo-e.h.g. indiki gatnaşygyň üsti bilin kesgitlenilýär:

$$\alpha_{n,p} = (\alpha_n U_n n + \alpha_p U_p\, p)/(nU_n + pU_p) \qquad (6.6)$$

husasy ýarymgeçirijiler üçin, haçanda $n = p = n_i$ bolanda :

$$\alpha_i = (\alpha_n U_n + \alpha_p U_p) / (U_n + U_p). \qquad (6.7)$$

Termoelektrik effekti praktikada, şol bir sanda radioelektronikada hem geňden peýdalanylýar. Bu effektin, ýylylyk energiýasyny göni elektrik energiýasyna owurmeklik mümkinçiligi termogeneratorlarda peýdalanylýar. A. F. Ioffäniň teoriýasyna laýyklykda ýarymgeçiriji termoelementleriň ýylylyk energiýasyny lektrik energiýasyna öwrüşiniň peýdaly täsir koeffisienti (p.t.k), şeýle ululyk bilen kesgitlenilýär $(a^2\sigma)/\lambda$, bu ýerde λ - ýarymgeçirijiniň ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti; σ - udel elektrik geçirijiligi.
$(a^2\sigma)/\lambda$ - ululygyň, şeýle fiziki manysy bar.

Termogeneratorlarda, az ýylylyk energiýasyny harç edip, gyzgyn we sowuk uçlaryň arasynda, temperaturanyň tapawudyny ulaltmaga ymtylynýar. Şol sebäpli hem pes ýylylyk geçirijilikli ýarymgeçirijini peýdalanmak amatly bolup durýar, emma şeýle ýarymgeçirijileriň udel elektrik geçirijiligi kiçi bolup, p.t.k. kiçelýär. Şeýle nukdaý nazardan seredende udel elektrik geçirijiligi näçe ýokary bolsa, şonçada gowy. Şol bir wagtyň özünde ýarymgeçirijide garyndynyň konsentrasiýasynyň artmagy bilen termo-e.h.g. koeffisiýenti α hem kiçelýar. A.F.Ioffäniň teoriýasyna laýyklykda, maksimal p.t.k.-almalyk üçin, her ýarymgeçiriji üçin, ýokarda agralan ululyklaryň belli bir amatly ululyklary bar.

Termoelektrik effekti termoparalarda temperaturany ölçemeklik üçin hem giňden ulanylýar.

Peltýeniň effekti.

Haçanda iki sany dürli materialyň sepleşiginden elektrik togy geçende joul ýylylygyndan başga şepleşikde goşmaça ýylylyk bölünip çykýar, ýada ýuwdulýar. Bu effekte - Peltýeniň effekti diýilýär. Bölünip çykýan, ýuwdulýan ýylylygyň mukdary Q_p sepleşikden geçýän zarýadyň ululygyna I·t göni proporsionaldyr.

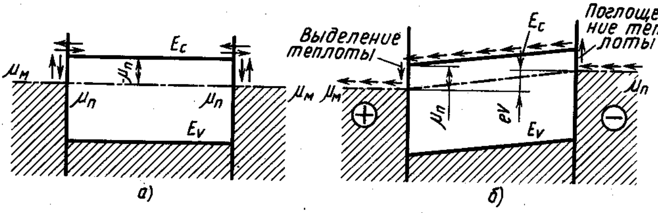
$$Q_p = \pm \Pi \cdot I \cdot t \qquad (6.8)$$

Proporsionallyk koeffisiýenti Π - Peltýeniň koeffesiýenti diýilýär.

Bu effektiň tabigatyna metal bilen ýarymgeçirijiniň mysalynda seredip geçeliň (6.2 surat). Ýönekeýlik üçin bu iki materialyň (metalyň we ýarymgeçirijiniň) sepleşigini neýtral diýip alalyň. Şeýle sepleşikde zarýadlara baýlaşdyrylan ýa-da garyplaşdyrylan gatlak bolmaýar hem-de zonalaryň egremi ýok. 6.2

suratda metal bilen n-ýarymgeçirijiniň aralygyndaky neýtral sepleşigiň energetiki diagrammasy görkezilen.

6.2. Surat. Peltýeniň effekti düşündirilişi.



a) m-ý-m - zynjyryň energetiki diagrammasy.

b) Bu zynjyr elektrik togy göýberilende.

Deňagramlykdaky ýagdaýda metal üçin hem-de ýarymgeçiriji üçin Ferminiň derejesi birmenzeş beýiklikde durýar, emma ýarymgeçirijiniň geçiş zonasynyň düýbi metalyň Fermi derejesinden $-\mu_n$ ululyk ýokorda ýerleşendir. Şeýlelikde metaldan ýarymgeçirijä geçýän elektronlar üçin beýikligi $-\mu_n$ bolan potensial barýer bardyr.

Şeýle sepleşige daşky potensiallaryň tapawudyny birleşdireliň. Ýarymgeçirijide daşky potensialyň täsiri esasynda (täsir edýän napryýaženiýäniň aglabasy ýarymgeçirijide çökýär) çep sepleşikden saga tarap Ferminiň derejesi ýuwaş-ýuwaşdan *eU* ululyga ýokary galýar. Metal ýarymgeçiriji gurluşda çepden saga urukdyrylan tok ýüze çykýar, elektronlar ters ugra sagdan çepe urukdyrylandyr. Suratdan görünişi ýaly, çep sepleşikde ýarymgeçirijiden metala geçýän elektronlaryň, ýarymgeçirijide metaldakydan energiýasy

$-\mu_n + < E_n >$ ululyga artykdyr. Bu ýerde $-\mu_2$ - elektronyň ýarymgeçirijiden metala geçendäki, aşak gaçýan potensial päsgelçiliginiň beýikligi; $< E_n >$ - ýarymgeçirijide tokuň ýüze çykmagyna gatnaşýan elektronlaryň ortaça energiýasy. Elektronyň konsentrassiýasy ýokary bolmadyk n - tipli ýarymgeçiriji üçin, hasaplamalar esasynda $< E_n >$ tapýarys.

$$< E_n > = (r + 2) kT, \qquad (6.9)$$

$$\lambda \sim E^r$$

bu ýerde r – zarýadyň erkin ylgawynyň uzynlygynyň λ elektronyň energiýasyna baglanşygyny görkezýan formuladaky dereje görkeziji. r – 4-nji deňlikdäki dereje görkeziji.

Şeýlelikde çep sepleşikde ýarymgeçirijiden metala geçýän her elektron, ΔE artyk energiýny alyp geçýär.

$$\Delta E = -\mu_n + (r + 2)\,kT \quad , \qquad (6.10)$$

ΔE - energiýa bu sepleşikde goşmaça ýylylyk görnüşinde bölünip çykýar. Bu bölunip çikýan ýylylyga bolsa - Peltýeniň ýylylygy diýilýär. (6.10) - nji deňligi elektronyň zarýadyna (e) bölüp Peltýeniň koeffisiýentini alaryş

$$|\Pi| = k/e\,(r + 2 + \mu_n/kT)\,T \qquad (6.11).$$

Sag sepleşikde elektron, metaldan ýarymgeçirijä geçende, -μ_n potensial barýeri ýeňip geçýär. Ondan başgada metaldan geçen elektron ýarymgeçirijidäki elektronlar bilen deňagramlygy saklamak üçin ýenede $<E_n>$ ululyga energiýasyny artdyrýar. Bu energiýalaryn baryny elektron, sag sepleşikden kristallik gözenekden alyp gaýdyp ony sowadýar.

Metal-ýarymgeçiriji sepleşikden tok geçende onuň sowamak hadysasy gaty wajypdyr, sebäbi bu hadysa termoelektrik holodilniklerini, radioapparaturalary sowadygy holodilnikleri hem-de mikroholodilnikleri döretmäge mümkinçilik berýar.

Şeýle sowadyjy we ýyladyjy (priborlaryň) gurallaryň artykmaçlygy, olarda toguň ugruny üýtgetmeklik bilen, sowadyjynyň deregine ýyladyjy we tersine özgertmeklik mümkin.

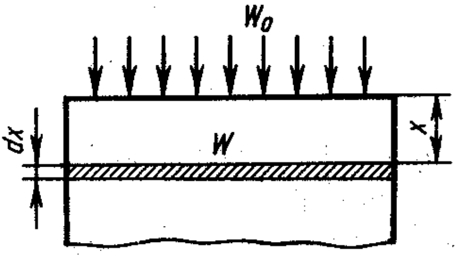
7-nji bap. Ýarymgeçirijilerde optiki hadysalar

7.1. Gaty jisimlerde (ýarymgeçirijilerde) ýagtylyk şöhlesiniň ýuwdulmagy we geçmesi

Ýarymgeçirijilerde optiki effektler dürli fotopriýomniklerde, ýagtylyk energiýasy elektrik energiýasyna öwürjilerde, ýagtylyk şöhlesini goýberiji priborlarda-swetodiodlarda ulanylýar. Bu mowzukda ýarymgeçirijide bolup geçýän esasy optiki hadysalara - ýagtylygyň ýuwdulma we jisimiň içinden geçiş hadysasyna hem-de ýagtylygyň şöhlelenme hadysasyna seredip geçeris.

Birhilli ýarymgeçiriji plastinkasynyň üstüne kuwwaty W_0 bolan ýagtylyk şöhlesi gelip düşsin (7.1 surat). Ýagtylyk şöhlesi ýarymgeçirijiniň içine aralaşdygyça önüň kuwwaty azalýar.

7.1. Surat. Gaty jisimde ýagtylygyň ýuwdulma kanunyna düşündiriş.



Ýarymgeçirijiniň göwrüminde, onuň üstünden *x* aralykda, d*x* gatlagy bölüp alalyň. Bu d*x* gatlakda ýuwdulýan dW ýagtylyk energiýasynyň mukdary üste gelip düşýän ýagtylygyň kuwwatyna we gatlagyň galyňlygyna göni proporsionaldyr:

$$dW = -\alpha \cdot W \cdot dx \qquad (7.1)$$

Deňlikdäki minus alamat ýagtylygyň ýaýraýan ugryna, onuň kuwwatynyň kemelýandigini aňladýar. Bu ýerde α koeffisiýente, ýuwdulma koeffisiýenti diýilip at berilýar. Haçanda d*x*=1 bolan ýagdaýynda α=-dW/W. Şeýlelikde, ýuwdulma koeffisiýenti ýagtylygyň kuwwatynyň sredanyň birlik gatlylygyndan geçendäki üýtgemesine san taýdan deňdir. Ýuwdulma koeffisiýentiniň birligi uzaklyk birligine ters ululykdyr (m^{-1}, sm^{-1}).

Ýagtylygyň jisimiň üstünden serpilmesini hasaba alyp (7.1) deňligi integrirläp alarys.

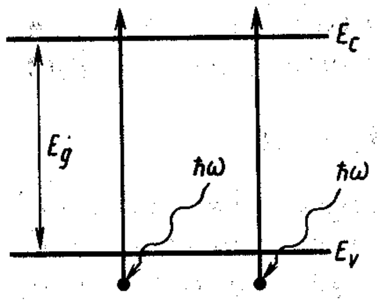
$$W = W_0(1-r)e^{-\alpha x} \qquad (7.2)$$

bu ýerde r - ýagtylygyň şerpilme koeffisiýenti. Köplenç ýagtylyk sredadan geçende diňe bir ýuwdulma hadysasy bolup geçmän, ýagtylygyň ýaýrama hadysasy hem bolup geçýär. Emma biz

ýönekeýlik üçin ýagtylygyň geçýän sredasynda diňe ýüwdulma hadysasyna seredeliň.

Hususy ýuwdulma.

Hususy ýuwdulmada, ýarymgeçirijilere gelip düşýän ýagtylyk energiýasy, elektronlary walent zonasyndan geçiş zonasyna gesirmeklige harç bolýar (7.2 surat).



7.2. Surat. Ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň hususy ýuwdulmasynyň görkezilişi.

Energiýanyň saklanmak kanunyna laýyklyda, walent zonadan elektronlary geçiş zona geçirmeklik (oýandyrmaklyk), haçanda ýagtylyk kwantynyň energiýasy hν ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň giňliginden E_g kiçi bolmadyk ýagdaýynda mümkindir:

$$h\nu \geq E_g$$

Bu şertden hususy ýuwdulmanyň ýerine ýetýan ýagdaýynyň maksimal tolkun uzynlygyny tapýarys:

$$\lambda_{max} = 2\pi \cdot \frac{c}{\nu} = 2\pi c \cdot \frac{\hbar}{E_g}$$

(7.3)

bu ýerde c - ýagtylygyň tizligi.

Mysal üçin kremniý ýarymgeçiriji materialynyň gadagan zonasynyň giňligi E_g = 1.1 onda $\lambda_{max} \cong 1.13$ mkm.

$$\lambda_{max} = \frac{1.24}{h\nu}$$

(7.4)

Ýuwdulma hadysasyna kwant mehanikasy nukdaý nazardan seretseň, energiýanyň saklamak kanunyndan başgada impulsyň saklanmak kanuny ýerine ýetmelidir:

$$P_n = P_p + P_{fot} \qquad (7.5)$$

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 öňünde tutsaň onda elektronyň geçiş zona geçmegi bilen onuň impulsy deşigiňkä seredende üýtgemän galýar:

$$\hbar k_n \approx \hbar k_p \qquad (7.6)$$

Energetiki diagrammada şeýle geçişi göni geçiş diýilip atlandyrylyp, wertikal strelka bilen görkezilýär (7.2.3a surat).

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

$$\alpha_s = \frac{e^2\left[2m_n m_p/\left(m_n + m_p\right)\right]^{\frac{3}{2}}}{4\pi \cdot \bar{n} \cdot c \cdot \hbar^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot m_e} \cdot \left(\hbar\nu - E_g\right)^{\frac{1}{2}}$$

(7.7)

bu ýerde, $\overline{n}$ - ýarymgeçirijide ýagtylygyň döwülme koeffisiýenti. Haçanda $\overline{n}$ = 4 diýip, m_n we m_p - elektronyň we deşigiň effektiw massalaryny, erkin elektronyň massasyna deň diýip alsaň onda α_s-niň bahasyny ýönekeý deňlikden tapyp bolýar.

$$\alpha_s \cong 2.7 \cdot 10^5 \left(h\nu - E_g\right)^{\frac{1}{2}}$$

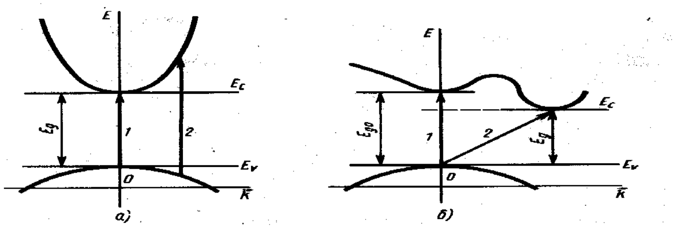
Hakykatdanam, hususy ýuwdulmada, $\alpha_s \approx 10^4 \div 10^5$ sm^{-1} baha ýetip bilýär. Ýagtylyk kwanty ýarymgeçirijide ýagtylygyň düşýän üstünde ~1.0÷0.1 mkm aralykda ýuwdulýar.

Haçanda ýarymgeçirijide geçiş zonanyň düýbi E_c walent zonanyň depesi E_v bilen, k wektoryň dürli bahalarynda ýerleşen bolsa (13.3b surat), 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

$$\hbar\nu \geq E_{g0} \tag{7.8}$$

E_{g0} ululyga optiki gadagan zonanyň ginligi diýilp at berilýär. Şeýle ýarymgeçirijilerde göni geçişden başgada göni däl geçiş ýüze çykyp bilýär, 7.3b suratda gytak strelka bilen görkezilen.

7.3. Surat. Göni (a) we göni däl (b) zonara geçişli ýarymgeçirijileriň



zona diagrammasy. Görkeziji çyzyjaklar bilen zona-zona geçişiň ugry 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.

$$E_n = E_p + \hbar\nu \pm E_{fon};$$
(7.9)

$$P_n = P_p + P_{fot} \pm P_{fon};$$
(7.10)

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 öňünde tutsan, haçanda fotonyň energiýasy hν ≈ 1 eV töweregi bolanda, onda fononyň energiýasyny hasaba almasaň hem bolýar. Fononyň impulsy $\hbar k_{fon}$ elektronyň impulsy ýaly Brillýuen birinji zonasynda ýatýar.

7.2. Ýarymgeçirijilerde şöhlelenme (lýuminessensiýa) hadysasy

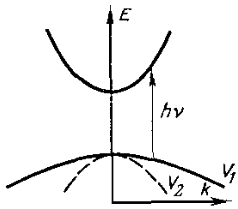
Oýandyrylan ýagdaýyndaky ýarymgeçirijilerde elektromagnit tolkunlarynyň şöhlelenmesiniň (göýberilmesiniň) ýüze çykmagy mümkin. Bu hadysa lýuminessensiýa diýlip at berilip, ol ýuwdulma hadysa ters hadysadyr. Ýarymgeçirijiniň şeýle oýandyrylan ýagdaýyny birnäçe usul bilen almak mümkin. Haçanda lýuminessensiýa 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 şöhlesi tarapyndan oýandyrylyp bilýär, şeýle Lýuminissensiýa rentgenolýuminissensiýa diýilýär. Ýokarda aýdylanlary göz öňünde tutup lýuminissensiýa şeýle kesgitleme berilýar. Lýuminissensiýa bu jisimiň ýylylyk şöhlelenmesinden artykmaç energiýanyň hasabuna ýüze çykýan şöhlelenme bolup, adaty elektromagnit şöhlesi ýaly häsiýetlenirilýär. 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 oýandyrma bes edilenden soň hem lýuminissent şöhlelime belli bir wagt dowan ediýär

Geçiş zonasy bilen walent zonasynyň arsyndaky göni geçiş.

Goni geçişli gadagan zonaly ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň ýuwdulmagy erkin elektronyň we erkin deşigiň emele gelmegini ýüze çykaryp, olaryň tolkun wektorlary birmeňzeşdir (k=k'). Yagtylyk energiýasy ýuwdulandan soň, belli bir wagtdan erkin elektron geçiş zonanyň düýbýne gelýär, erkin deşik walent zonanyň depesine barýar (şeýle hadysa relaksasiýa diýulýär). Gaty jisimlerde şeýle ýagdaý köplenç 10^{-10}-10^{-12}c töweregi wagtda amala aşýar. Haçanda relaksasiýadan soň erkin elektronyň we deşigeň birmeňzeş tolkun wektorlary bar meňzeş bolan ýagdaýynda, rekombinassiýa prosessiniň ähtimallygy ýokarydyr (7.4 surat).



7.4. Surat. Göni şöhlelenmeli (izluçatelnyý) geçişler.

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

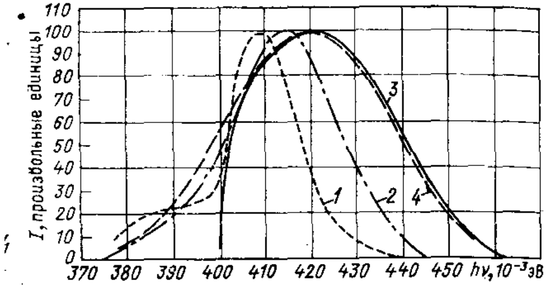
$$I(\hbar\nu) = B(\hbar\nu - E_g)^{1/2}$$

(7.11)

bu ýerde B - hemişelik san.

Bu aňlatmadan görünişi ýaly, erkin zarýadlaryň rekombinassiýasy 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 zonasynda ýokardaky derejeleriň doldurylmagyna getirýär. Bu bolsa energiýasy gadagan zonanyň giňliginden (E_g) uly bolan ýagtylyk fotonlarynyň şöhlelenmegine we lýuminessensiýanyň spektrinde gysga tolkun uzynlykly (ýokary energiýaly) «guýrugyň» emele gelmegine getirýär. 7.5. suratda n-tipli InAs ýarymgeçiriji kristalynyň fotolýuminessensiýa şöhlelenmesiniň spektri görkezilen. Suratdan görnüşi ýaly garyndylaryň konsentrasiýanyň artmagy bilen spektrde ýokary energiýa tarap gyranyň we spektriň maksimumynyň uly energiýa süýşmegi Ferminiň derejesiniň geçiş zonanyň düýbine şüýşmegi bilen düşündirilýär.



7.5. Surat. n-görnüşli antimonid indiýniň (InSb) şöhlelenmesi, 77 K.

<u>Geçiş zona we walent zona aralykdaky göni däl geçiş.</u>

Geçen sapakdan belli bolyşy ýaly göni däl gadagan zonaly ýarymgeçirijide, ýagtylygyň ýuwdulmasy fononyň ýuwdulmagy we

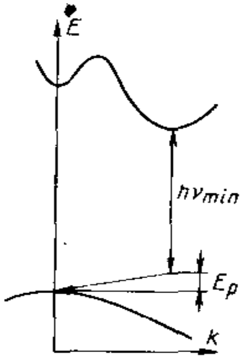
göýberilmegi bilen bolup geçýär. Onda şeýle ýarymgeçirijilerde elektronyň rekombinasyýasy hem fononyň ýuwdulmagy ýada göýberilmegi bilen bolup geçýär. Bu geçişde, ýagny elektronyň rekombinasiýasynda fononyň göýberilmegi ýokary ähtimallyga eýedir. Onda göni däl geçişli ýarymgeçirijilerde fotolýuminessensiýa şöhlelenmesiniň spektrini şeýle ýazyp bolýar.

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

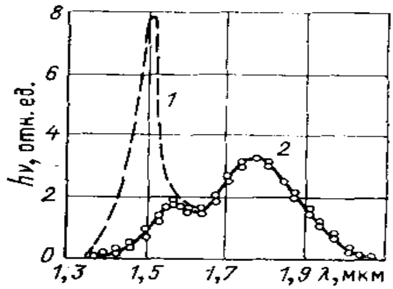
(7.12)

bu ýerde E_{fon} - fononyň energiýasy.

Eger-de ýarymgeçirijide göni we göni däl geçişiň bolmagynyň mümkinçiligi bar bolsa onda, lýuminessensiýa iki aýratyn bölekden durýar. Lýuminessensiýa spektriniň uzyn tolkun uzynlyklysy göni däl geçişe degişli, gysga tolkun uzynlyklysy göni geçişe degişlidir. 7.6 suratda göni däl geçiş we 7.7 suratda germaniý kristalynyň lýuminessensiýa şöhlelenmesiniň spektri görkezilen.



7.6. Surat. Göni däl şöhlelenmeli geçişler.



7.7. Surat. Germaniý kristalynyň şöhlelenme spektri: tejribe 2 egri, öz-özünden ýuwdulma hasaba alnanda 1 egri.

Ýarymgeçirijilerde lýuminessensiýa şöhlelenmesiniň relaksasiýasy.

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

$$I_l \approx \left(\frac{dn}{dt}\right) \qquad (7.13)$$

Haçanda şöhlelenme monomolekulýar bolsa, ýagny fotonyň ýuwdulmasy we şöhlelenme bir merkezde bolup geçýän bolsa, onda oýandyrylan elektronlaryň konsentrasiýasynyň wagtyň geçmegi bilen kemelmegi şeýle tapylýar.

$$n = n_0 \cdot e^{-t/\tau} \qquad (7.14)$$

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

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

$$I_l \sim e^{-t/\tau} \qquad (7.15)$$

bu gatnaşykdan:

$$I_l = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \qquad (7.16)$$

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

2-NJI BÖLÜM
BIPOLÝAR ABZALLAR

8-nji bap.Ýarymgeçiriji diodlar

8.1. Ýarymgeçiriji diodlar. Olaryň alnyşy. Diffuziýa usuly, epitaksiýa usuly

Elektrik signalyny göni däl öwürme üçin niýetlenen ýarymgeçiriji diodlar gaty jisim elektronikasynyň iň bir giňden peýdalynýan priborydyr. Şeýle diodlara, goneldiji diodlar, ýagtylygy duýujy we göýberýän diodlar (fotopriýomnikler we swetodiodlar) girýär. Diodlaryň aglaba köpüsu iki sany dürli tipli, ýagny n- we p-tipli ýarymgeçirijileriň sepleşiginiň ajaýyp häsiýetini ulanylyp işläp düzülendir we taýýarlanandyr. Şeýle sepeşikde ýüze çykýan geçişe p-n geçiş, ýa-da elektron - deşikli geçiş diýilýär. p-n-diodlaryň alynyşyna, gurluşyna we işleýiş prinsipine seredip geçeliň.

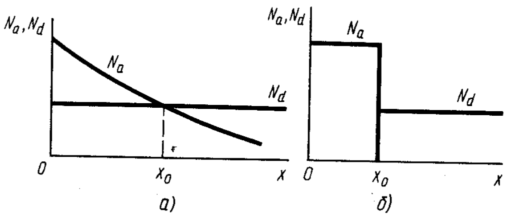
P-n-geçişiň alnyşy.

Ýarymgeçiriji diodlaryň tehnologiýasynda, dürli tipli ýarymgeçirijileri bir birine galtaşdyryp p-n-geçiş almaklyk mümkin däl. Sebäbi ýarymgeçiriji plastinkasynyň üstüniň ideal tekiz bolmagyny gazanmaklyk mümkin däl, üstesinede islendik gaty gisimiň üsti defektler, dislokasiýalar, daşky hapalar we okis bilen örtülendir. Şol sebäpli ýarymgeçirijiniň içinde (üstki gatlakdan belli bir çukurlykda) p-n-geçiş almaklygyň tehnologiýasy işlenilip düzülenden soň bu ugurda gaty uly öňegidişlikler gazanyldy.

Diffuziýa usuly.

Elektron-deşikli geçiş p-tipli ýarymgeçirijä donor garyndysyny ýa-da n-tipli ýarymgeçirijä akseptor garyndysyny diffuziýa etdirmek bilen alynyp biliner. Diffuziýa prosesi plastinkanyň üstüne çaýylan gaty diffuzantlaryň üsti bilen, ýa-da ýarymgeçiriji plastinkasynyň üstünden akyp geçýän gaz geçirijilere (meselem wodorod) garyndylary goşmaklyk bilen, ýokary temperaturada (800-1300°C) amala aşyrylýar. 8.1-nji suratda n-tipli ýarymgeçirijä akseptor garyndysy diffuziýa edilenden soňra donor

we akseptor garyndylarynyň koordinata boýunça paýlanyşy görkezilen.



8.1-Surat. Diffuziýa (a) we epitaksiýa (b) usullary
p-n-geçişlerde garyndylaryň paýlanylyşy.

8.1-nji suratdan görünişi ýaly ýarymgeçiriji plastinkanyň üstünde geçişin tipi akseptor garyndy bilen kesgitlenilýär, bu ýerde N_a>N_d. Ýarymgeçiriji plastinkanyň üstünden uzaklaşdygynça N_a azalyp, x_0 uzaklykda (çuňňurlykda) N_a=N_d bolýar. Şu tekizlikde hem p-n-geçiş emele gelýär. Bu tekizlikden uzaklaşdygygynça akseptor garyndylaryň konsentrasiýasy N_a kiçelýär we N_a<N_d şert ýerine ýetýär. Şeýle geçişle ýuwaş-ýuwaşdan «plawnyý» geçiş diýilip at berilýär.

Epitaksiýa usuly.

Bu usulyň mazmuny monokristallik ýarymgeçiriji plastinkasynyň üstünde geçirijiliginiň görnüşi gabat gelmeýän (ters tipli) ýarymgeçiriji gatlagy çökdürilýär. Çökdürilen ýarymgeçiriji gatlak bilen esasy, düýp plastinkanyň arasynda p-n-geçiş emele gelýär. ýarymgeçiriji gatlagy çökdürmek prosesi suwuk ýa-da gaz fazadan amala aşyrylyp bilinýär.

Suwuk fazadan amala aşyrylýan epitaksiýanyň mysaly bolup, GaAs esasyň üstünde ergin galliýnin suwuk gatyndysyny ulanyp, GaAs - gatlagyny almaklyk bolup biler.

8.1 - suratda p-tipli esasda alynan n - epitaksial gatlakly p-n - geçişde akseptor (N_a) we donor (N_d) garyndylaryň (ýagny elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasynyň) ideal görnüşdäki paýlanyşy birilen.

Garyndylaryň şeýle görnüşde paýlanmasyna, ýagny iki tipli (dürli tipli) geçirijiligi bolan ýarymgeçirijileriň dik «rezkiý» araçäginiň bolmagyna - «rezkiý» p-n- geçiş diýilýär. Hakykatda

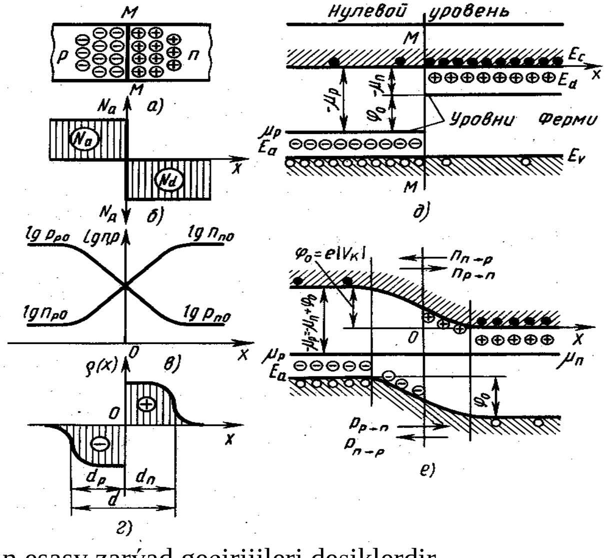
bolsa bu araçäk garyndylaryň özara diffuziýasy esasynda belli bir derejede ýaýraňňydyr.

Soňky döwürde epitaksial p-n-geçişi almagyň dürli usullary, ýagny, suwuk we gaz fazasyndan epitaksiýa usuly, metalorganiki birleşmeleri peýdalanmak, molekulýar-şöhle epitaksiýasy giňden peýdalanylyp başlady.

8.2. P-n-geçişiň deňagramlyk ýagdaýy

Goý MM’ tekizlik dürli tipli geçirijiligi bolan iki sany ýarymgeçirijiniň içki araçägi bolsun (14.2 surat); çep tarapda - akseptorlaryň konsentrassiýasy N_a bolan p-tipli ýarymgeçiriji (p-germaniý); sag tarapda - donorlaryň konsentrassiýasy N_d bolan n-tipli ýarymgeçiriji (n-germaniý).

Ýönekeýlik üçin $N_a=N_d=10^{16}$ sm^{-3}. Suratdan görünişi ýaly (14.2b surat), donorlaryň we akseptorlaryň konsentrasiýasy MM’ tekizlikde (iki görnüşli ýarymgeçirijinin araçaginde), has çalt, birbada üýtgeýär. Meselem, birbada akseptorlaryň konsentrasiýasy N_a nola gelip, şol bir wagtda donorlaryň konsentrasiýasy N_d ululyga çenli ösýär. n-oblast üçin esasy zarýad geçirijileri elektronlar bolup,



p-oblast üçin esasy zarýad geçirijileri deşiklerdir.

8.2. Surat. p-n-geçiş deňagramlyk ýagdaýynda.

Esasy zarýadlaryň hemmesi diýen ýaly donor we akseptor garyndylarynyň ionlaşmagy esasynda emele gelýär. Şol sebäpli hem eger donorlar doly ionlasan bolsalar onda n-ýarymgeçirijidki elektronlaryň konsentrasiýasyny n_{n0} donor atomlarynyň konsentrasiýasyna deň diýip bolar (n_{n0}~N_d), p-tarapdaky deşiklerin konsentrasiýasyny (p_{p0}) akseptor atomlarynyň konsentrasiýasyna deň diýip bolar (p_{p0}~N_a).

p- we n-ýarymgeçirijilerde esasy zarýad geçirijilerinden başgada esasy däl zarýadlar hem bar, meselem n-ýarymgeçirijide deşikler (n_{p0}), p-ýarymgeçirijide elektronlar (p_{n0}). Massanyň saklanmak kanunyny ulanyp olaryň konsentrasiýasyny tapmak bolýar.

$$n_{n0}\cdot p_{n0}=p_{p0}\cdot n_{p0}=n_i^2, \qquad (14.1)$$

bu ýerde n_i- hususy ýarymgeçirijidäki zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasy.

Haçanda $n_{no}=p_{po}=10^{22}$ m^{-3} we $n_i=10^{19}$ m^{-3} bolsa onda $p_{no}=n_{po}=$
10^{16} m^{-3} bolar.

Görüşimiz ýaly, deşikleriň konsentrasiýasy p-bölekde we elektronlaryň konsentrsiýasy n-bölekde, esasy däl zarýadlaryň konsentrasiýasyndan alty dereje uludyr. Şeýle konsentrasiýanyň uly tapawudy elektronlaryň n-oblastdan p-oblasta, deşikleriň bolsa p-oblastdan n-oblasta diffuzion akymyny emele getirýar. n-oblastdan p-oblasta geçen elektronlar uzaga gitmän p-oblastyň deşikleri bilen rekombinirlenýär. p-oblastdan n-oblasta geçen deşikler, n we p oblastyň araçäginden uzaga gitmän rekombinirlenýar. ňetijede n-oblastda, araçäginiň ýakynynda, erkin elektronlar ýok diýen ýalydyr, onda ionlaşan göwrüm zarýadlarynyň (ionlaşan donorlaryň göwrüm položitel zarýady emele gelýär) (14.2a surat).

Sepleşigiň ýakynynda p-oblastda deşik ýok diýen ýaly bolup, ionlaşan akseptorlaryň otrisatel göwrüm zarýady emele gelýär. 14.2d suratda geçişde emele gelen göwrüm zarýadlary görkezilendir. Hereketsiz göwrüm zarýatlary p-n-geçişde potensiallaryň tapawudy U_k bolan, sepleşik elektrik meýdanyny emele getirýär. Şol sebäpli hem sepleşigiň meýdanyndan daşarda erkin zarýadlar haotiki hereket edýarler.

Şeýlelikde termodinamiki deňagramlaşyk ýagdaýynda p-n-geçişden bir-birine ululygy boýunça deň bolan elektronlar we deşikler n-tarapdan p-tarapa we tersine geçip bilerler. Beýle deňligi sepleşikdäki potensiallaryň tapawudy emele getirip, esasy zarýadlaryň akymyny esasy däl zarýadlaryňka çenli azaldýar.

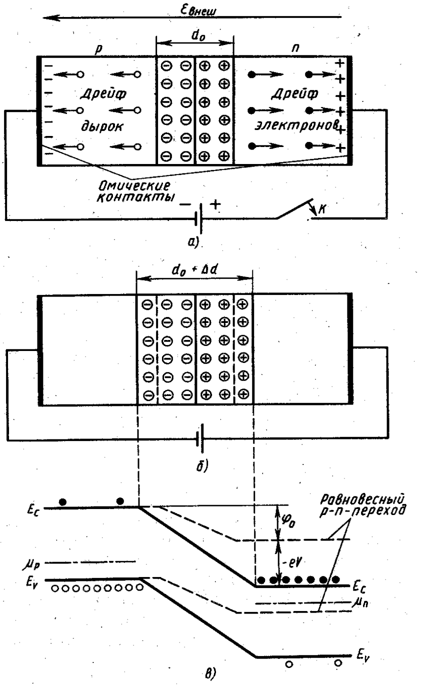
8.3. Deňagramlykda däl p-n-geçiş. P-n-geçişiň barýer sygymy. P-n-geçişdäki göni we ters toklar

Elektron-deşikli geçiş, dürli görnüşdäki ýarymgeçiriji priborlar üçin esasy bölüp durýar. Konstruksiýasy boýunça iň ýönekeý ýarymgeçiriji pribora diod giýilip at berilýar. Diodyň n- we p-taraplaryna metal elektrodlarynyň kömegi bilen sep emele getirlip üstünden tok göýberilýär. Ýarymgeçiriji bilen metalyň sepleşiginiň oiki garlyşygy kiçi we göniçyzykly bolup, p-n-geçişiň garşylygyndan has azadyr.

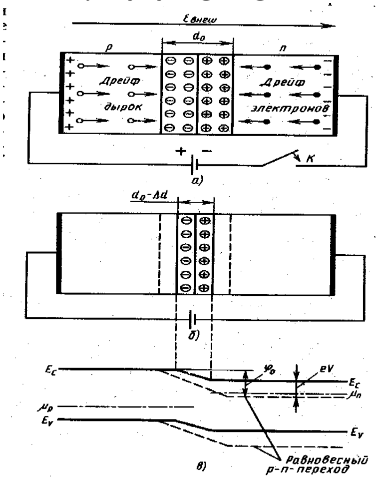
P-n- geçişi daşky meýdanyň täsiri esasynda seredip geçeliň. Haçanda daşky elektrik meýdanyň položitel polýusy (+) p-n-geçişiň n-tarapyna birikdirilse, hem-de minus (-) p-tarapyna birikdirilse şeýle ugra ters ugur giýilýär (8.1 Surat). P-n-dioda ters ugra daşky elektrik meýdany (ε_d) täsir etse, onda bu meýdan esasy zarýad geçirijileriniň strelka bilen görkezilen ugurlara dreýfini ýüze çykýar. Şeýlelikde n-oblastdaky elektronlaryň we p-oblastdaky deşikleriň aglabasy p-n-geçişden yza çekilip, ionlaşan akseptorlar we donorlar üçin täze ýer açylýar we göwrüm zarýadynyň giňligi $d_o+\Delta d$ ululyga giňelýär.

Elektronlaryň we deşikleriň omiki kontaktlara tarap akymy daşky goýulan e.h.g. doly kompensirlenýançä dowam eder. Soňra umumy goýulan naprýaženiýanyň aglabasy p-n-geçişde çöker.

8.3. Surat. p-n-geçişdäki geçiş hadysalary, (a) durnukly ýagdaýynda, (б,в) diod ters elektrik meýdanynda.



Ters tarapa berilen daşky elektrik meýdanynda otrisatel ugur diýilip, şeýle meýdanyndaky wolt-amper harakteristika - wolt-amper harakteristikanyň ters şahasy diýilýär. Suratdan görünişi ýaly potensial päsgelçiliginiň beýikligi daşky täsir edýan napryaženiýa baglylykda - eU ululyga artýar. Göni ugur boýunça daşky elektrik meýdany täsir edende (plýus - p-oblasta, minus - n-oblasta) n- we p-oblastlardan elektronlaryň we deşikleriň p-n-geçişiň göwrüm zarýadlaryna tarap hereketi ýüze çykýar (15.2. Surat). Bu proses p-n-geçişdäki potensiallaryň tapawudy U_k-U ululyga kemelýänçä dowam eder. Göwrüm zarýadynyň giňligi d_o-Δd ululyga çenli daralýar.Suratdan görünişi ýaly potensial barýeriň beýikligi göni ugra meýdanyň täsiri esasynda eU ululyga peselýär.



15.2. Surat. Dioddaky geçiş hadysalary (a), durnukly ýagdaýynda (b), göni ugra elektrik meýdany täsir edende.

Şeýlelikde, dioda daşky elektrik meýdany

täsir edende, ilki bada iki sany ýarymgeçirijiniň araçäginde (p-n-geçişde) göwrüm zarýadynyň giňelmegine ýa-da daralmagyna getirýän togyň impulsy ýüze çykýar. Şol sebäpli hem p-n-geçiş özüni sygym ýaly alyp barýar. Bu sygyma barýer (ýa-da zarýad), sygymy diýilýär, sebäbi ol p- we n-oblastlaryň aralygyndaky potensial barýeriň üýtgemegi bilen baglydyr. Barýer sygymynyň ululygy C_b:

$$C_b = \frac{dQ}{dU}, \qquad (15.1)$$

bu ýerde dQ - p-n-geçişde zarýadyň üýtgemegi; dU - barýerde potensiallaryň tapawudynyň üýtgemesi. Çyzgydan (15.1-Surat) görünişi ýaly tekiz p-n-geçiş, tekiz kondensatora meňzeş. Şol sebäpli hem barýer sygymynyň bahasyny, tekiz kondensatoryň formulasyny ulanyp kesgitlemek mümkin.

$$C_b = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot s}{d}$$

(15.2)

bu ýerde s - p-n-geçişiň meýdany; ε - ýarymgeçirijiniň otnositel dielektrik syzyjylygy; d - göwrüm zarýadynyň gatlagynyň giňligi.

P-n-geçişiň barýer sygymynyň kondensatoryň sygymyndan tapawudy, olam göwrüm zarýadynyň giňliginiň (d), daşky elektrik meýdanynyň ululygyna we ugruna baglylygydyr.

$$d \approx \left[\frac{2\varepsilon \cdot \varepsilon_0 (\varphi_0 - eU)}{e^2 N_d} \right]^{1/2}$$

(15.3)

haçanda $N_a >> N_d$ bolanda. Barýer sygymynyň bahasyny (C_b), (15.3) deňligi (15.2)-ä goýup alarys.

$$C_b = s \left[\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot e^2 N_d}{2(\varphi_0 - eU)} \right]^{1/2}$$

(15.4)

Bu formula p-n- geçiş gaty dik (birbada) bolan ýagdaýynda dogrydyr. Haçanda p-n-geçiş ýaýraňňy (plawnyý) bolan ýagdaýda sygym:

$$C_b = s\left[\frac{(\varepsilon\cdot\varepsilon_0)^2 e^2\cdot a}{12(\varphi_0 - eU)}\right]^{1/3}$$

(15.5)

P-n- geçişde göni we ters toklar.

Daşky elektrik meýdanynyň täsiri esasynda barýer sygymynyň zarýadlanmagynyň tamamlanmagy bilen, p-n-geçişden toguň geçmesi tamamlanmaýar , daşky täsir esasynda p-n-geçişiň barýerinden bir taraplaýyn artykmaç tok geçmegini dowan etdirýär.

Esasy däl zarýad geçirijileri, meselem diodyň p-böleginde elektronlar, haotiki hereket esasynda, öz emele gelen ýerinden ortaça duffuziýa aralygyna deň bolan aralyga çenli ýetip bilýärler . Bu aralyk *L* zarýad geçirijileriniň ýaşaýyş wagtyna göni baglydyr

$$L = \sqrt{D\cdot\tau} \qquad (15.6)$$

bu ýerde D - diffyziýa koeffisiýenti, τ - erkin zarýadyň ýaşaýyş wagty . Hakykatda zarýadlar öz ýaşaýyş wagtynyň dowamynda, diffuziýa uzynlygy bolan *L* - den gaty köp aralyga ýetip bilýärler.

Eger erkin zarýadyň emele gelen nokadyndan göwrüm zarýadyna çenli aralyk, diffuziýa aralygyndan kiçi bolsa, onda bu zarýadyň hiç bolmanda bir gezek göwrüm zarýadynyň gatlagyna girip, onuň meýdany tarapyndan çekilip alynjakdygynyň ähtimallygy bire deňdir. Şeýle zarýadlar p-n-geçişiň ters togyny emele getirýär. Şeýlelikde ters toguň ululygy hasaplanylanda, galyňlygy L bolan gatlakdaky emele gelen zarýadlar hasaba alynyp, olaryň bary hem p-n-geçişe ýetýär diýip hasap edilýär.

Umuman aýdanda p-n-geçişden akýan (geçýän) ters toguň ululygy I_s şeýle hasaplanylýar.

$$-I_s = -I_{ns} - I_{ps} = eS\left(\frac{n_{po}}{\tau_n}\cdot L_n + \frac{p_{no}}{\tau_p}L_p\right) = eS\left(\frac{n_{po}\sqrt{D_n}}{\sqrt{\tau_n}} + \frac{p_{n0}\sqrt{D_p}}{\sqrt{\tau_p}}\right)$$

(15.7)

Bu ýerde S-p-n geçişiň meýdany. Togyň n-tarapdan p-tarapa akýanlygy sebäpli, ters toguň alamaty minusdyr. P-n-geçişiň meýdany tarapyndan ters tarapa geçirilen zarýad, bu tarapda esasy zarýadlara goşulyp, zarýadlaryň daşky elektrik zynjyryna geçmegi sebapei, gaty çalt ýitýer.

Bu tokuň ululygynyň (I_s) uly naprýaženiýada daşky meýdana bagly dälligi sebäpli, oňa köplenç doýdun tok, ýa-da ýylylyk generasiýa togy diýilip aýdylýar.

Ýarymgeçirijide ýylylyk generasiýasy esasynda döreýän zarýad- laryň sany, haçanda daşky meýdanyň täsiri ýok bolan ýagdaýynda (U = 0), ters ugra täsir meýdanyň ululygy U > 0 ýagdaýynda-da, ululygy U > 0 bolan meýdan göni ugra täsir edendede üýtgemän galýar. Şol sebäpli hem deňagramlyk ýagdaýynda esasy däl zarýadlaryň togy, garşylyklaýyn esasy zarýadlaryň togy bilen kompensirlinýär we jemliýji tok

$$-I_s + I_s = 0$$

(15.8)

Emma essasy zarýadlaryň akymy, potensial päsgelçiligiň beýikligine (U) baglydyr. Päsgelçiligiň deňagramlykdaky ýagdaýy üçin φ_0 esasy zarýadlaryň akymy $e^{-\varphi/(kT)}$ proporsionaldyr;

Eger potensial päsgelçilige göni ugra U daşky meýdan goýulsa, onda potensial päsgelçiligiň ululygy φ_0 - eU ululyga çenli kiçelýär we esasy zarýadlaryň akymy $e^{eU/(kT)}$ gezek artýar. Onda esasy zarýadlaryň togy

$$I_{esasy} = I_s \cdot e^{eU/(kT)}$$

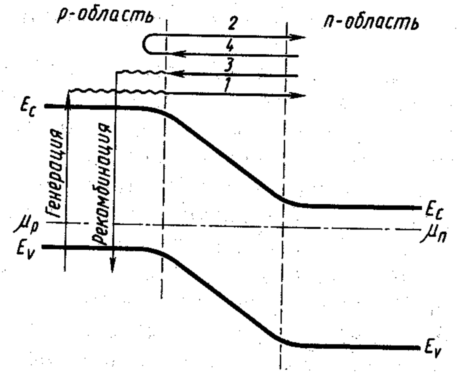
(15.9)

bolýar. Jemleýji tok

$$I = -I_s + I_s \cdot e^{eU/(kT)} = I_s(e^{eU/(kT)} - 1)$$

(15.10)Esasy zarýadlaryň togy , olaryň akymyna garanyňda elmydama kiçidir, sebäbi toga goşant diňe päsgelçilikden geçip, garşylykly tarapda rekombinirlenýän zarýadlar berýär.

Esasy zarýadlaryň bir bölegi, öz ýaşaýyş wagtynyň dowamynda, täzeden p-n-geçişi yzyna kesip geçip ýetişýär (meselem, elektronlar - n - tarapa, deşikler bolsa - p - tarapa yzyna geçýärler). Bu proses 15.3 - nji suratda dörkezilendir .



15.3. Surat. Deňagramlykdaky p-n-geçişde elektronlaryň akymy.

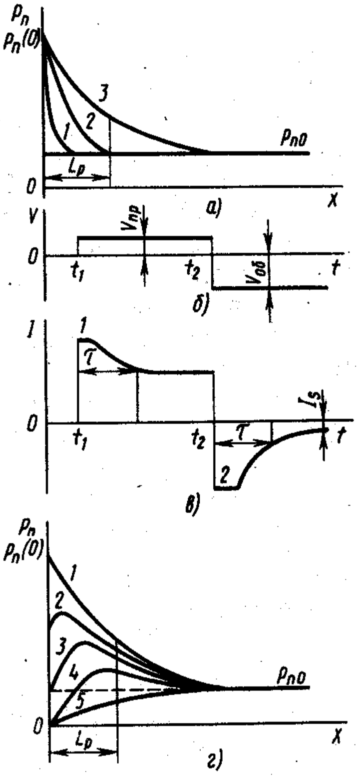
15.3 suratda deňagramlykdaky p - n - geçişden geçýän elektronlaryň akymlary görkezilen. p - tarapdan ýylylyk generasiýasy esasynda ýuze çykan elektronlaryň akymy (1) göwrüm zarýady kesip geçýär. Onüň garşysyna n - tarapdan gaýdyp p - tarapda rekombinirlenýaň elektronlar gelýarler (3). Ondan başgada elektronlaryn bir topary (4) n - tarapdan p - tarapa geçip, birnäçe gežek çaknyşma sezewar bolup, yzyna n - tarapa gaýdyp barýar (2).

p- n - diodlaryň wolt-amper häsiýetnamalary, (15.10) deňlikden görünişi ýaly, käber üýtgeşikliklere (I_s) seretmezden, metal- ýarymgeçiriji ýa-da Şottki barýeri diodlarynyňka meňzeşdir.

P-n-geçişiň impuls we ýygylyk häsiýetleri.

Elektronikada, radioelektronikada, hasaplaýyş tehnikasynda we awtomatikada impuls shemalarda ýarymgeçiriji diodlar giňden peýdalanylýar. Diodlaryň bu maksat üçin işe ukyplydygyny kesgitleýän esasy häsiti olaryň çaltlygydyr. Diodlaryň çaltlygy p-n-geçişde göni utgaşma ýagdaýyndan, ters ytgaşma ýagdaýyna geçişi we tersine geçişiň wagtynyň uzaklygy bilen kesgitlenilýär.

Wagtyň geçmegi bilen n-tarapa, inžektirlenen deşikleriň paýlanyşynyň üýtgeýşi 15.4a suratda görkezilen. Göni ugra daşky meýdanyň birleşmeginiň başlangyç momenti (15.4б surat, t_1 moment), deşikleriň konsentrasiýasynyň gradiýenti gaty ýokarydyr (15.4a surat, 1egri).



15.4. Surat. p-n-geçişde impuls häsiýetiniň ýüze çykyşy.

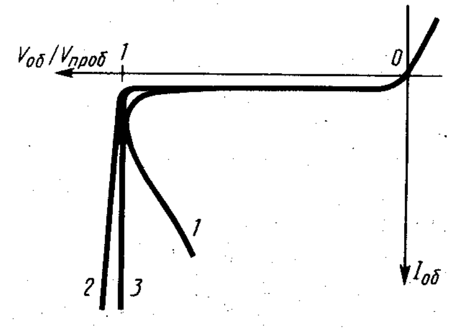
Sebäbi n-tarapa inžektirlenen deşikler araçakde ýuka gatlakda toplanandyr. Artykmaç deşikleriň ýaşaýyş wagtyna deň wagtda τ_p, olaryň n-tarapda paýlanyşy stasionar ýagdaýa ýetýär, göni tok özüniň adaty ýagdaýyna gelýär.Şeýlelikde, utgaşmada dioda geçiş hadysasy bolup geçýär (göni utgaşmada esasy däl zarýadlaryň toplanmasy we ýaýramagy ters utgaçmada). Bu geçiş hadysasy diodyň çatlygyny çäkleýär. Geçiş hadysasynyň, esasan artykmaç zarýadlaryň ýaşaýyş wagtynda τ tamamlanýandygy sebäpli, bu wagt hem impuls diodlarynyň çaltlygyny kesgitleýär.

8.4. P-n-geçişiň böwsülmegi. Tunnel diodlary

Daşky elektrik meýdany ters ugur boýunça p-n-gurluşlara (diodlara), täsir eden ýagdaýynda bolup geçýän fiziki proseslere seredip geçeliň. Haçanda p-n-geçişe daşky elektrik meýdany ters ugura täsir etse, onda p-n-geçişden geçýan esasy zarýadlaryň akymy deňagramlykdaky ýagdaýdan kiçidir, emma esasy däl zarýadlaryň akymy üýtgemän galýar. Şeýlelikde ters ugra goýulan naprýaženiýanyň artmagy bilen jemleýji tok ilki bilen biraz artýar, soňra, doýgun tok diýilip atlandyrylýan ululyga ymtylýar. Şeýlelikde diod göni däl wolt-amper harakteristika eýedir.

P-n-geçişden akýan ters toguň naprýaženiýa baglylykda üýtgeýşi 16.1 suratda görkezilendir. Ters naprýaženiýanyň belli bir ululygynda, ýagny U_{ters} = $U_{böws,}$ ters toguň gaty çalt (rezkiý) üýtgemesi ýüze çykýar. Bu hadysa p-n-geçişiň böwsülmegi diýen ada eýe bolup, böwsülme bolup geçýan naprýazeniýa, böwsülme naprýaženiýasy diýilip at berilýär.

Böwsülmede bolup geçýan fiziki prosesleriň häsiýetnamalary boýunça, böwsülme esasy dört görnüşe bölünýär: tunnel, lawina, ýylylyk we üst boýunça.



16.1. Surat. p-n-geçişiň bösülmegi. 1 – ýylylyk, 2 – tunnel, 3 – lawina.

Ýylylyk böwsülmesi.

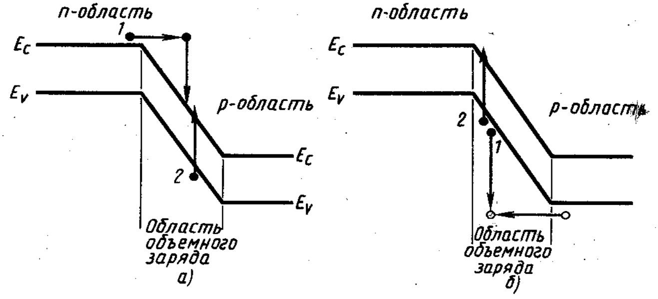
P-n-geçişden ters tok akanda ýylylyk bölünip çykýar we onuň temperaturasy ýokarlanýar. Temperaturanyň artmagy ýylylygy äkitmegiň hiline bagly bolup, ýylylyk garşylygy bilen häsiýetlendirilýär (R_0). Bu garşylyk bölünip çykýan birlyk kuwwata (W) baglylykda temperaturanyň artdyrmasyna (ΔT) deňdir, ýagny $\Delta T=R_0W$. Öz gezeginde, temperaturanyň artmagy, ters toguň artmagyna getirýar, şeýlelikde ýenede temperatura artýar we tok artýar.

Kuwwatyň belli bir ululygynda W, näçe uly bolsa şonçada priboryň ýylylyk garşylygy kiçi R_0, tok lawina boýunça artyp başlaýar we p-n-geçişiň yýlylyk böwsülmesi ýüze çykýar.

Ýylylyk böwsülmesi bolan ýagdaýynda wolt-amper häsiýetnamanyň ters şahasynda otrisatel garşylykly bölek ýüze çykýar, ters toguň artmasy naprýaženiýanyň kemelmegine getirýär (16.1-surat, 1-egri).

Lawina boýunça böwsülme.

Haçanda p-n-geçiş giň bolan ýagdaýynda ters naprýaženiýanyň ýokary bahasynda, esasy däl zarýadlar p-n-geçişiň meýdanynda, gaty ýokary kinetik energiýa eýe bolup, olar urgu ionlaşdyrmany ýüze çykarmaga ukuply bolýar (16.2surat).

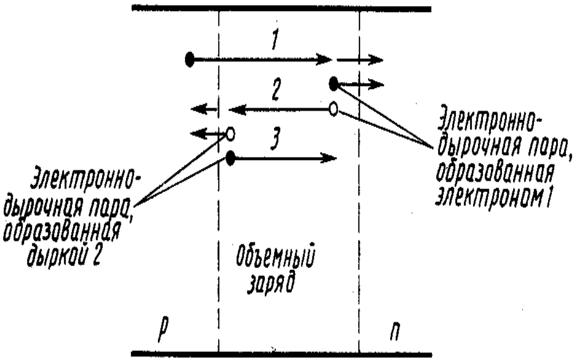


16.2. Surat. p-n-geçişde urgy (udarnyý) ionlaşmasy.

Urgu ionlaşdurmany elektron bilen bir hatarda deşikler hem ýüze çykaryp bilýärler. Iki ýagdaýda hem elektronlar öňki energetik zonasynda galyp, energiýasyny ýitirýär (1). Ol öz ýitiren energiýasyny walent zonadaky 2 elektrona bermeklik bilen ony geçiş zonasyna geçirýär, şeylelikde täze elektron-deşik jübüti emele gelýär. Bu ýagdaýda ters toguň lawina boýunça artmagy ýüze çykyp, onuň lawina boýunça böwsülmegine getirýär.

Şeýlelikde p-n-geçişiň meýdanyna giren bir elektrona derek, ondan birnäçe elektron-deşik jübütleri çykyp-ters tok gaty çalt ösýär (16.3 surat). Böwsülme ýüze çykýan oblastda ters toguň napryaženiýanyň artmagy bilen üýtgemesi gaty kert (krutoý) bolýar.

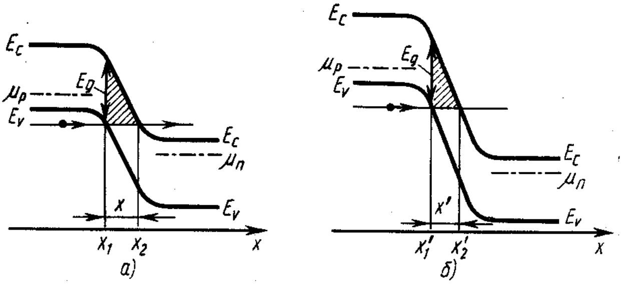
16.3. Surat. Lawina boýunça böwsülmäniň emele gelişi we ösuüşi.



Bu effekt naprýaženiýany stabilizirlemek üçin ulanylýar. Şeýle režimde işleýän diodlara, wolt-amper häsiýetnamasynyň ters şahasy lawina boýunça böwsülýän diodlara ýagny, stabilitronlar diýilip at berilýär. Stabilitronlar köplenç kremniý materialynyň esasynda oňarylyp, olaryň böwsülme naprýaženiýasy n- we p-böleklerde (oblastlarda) garyndylaryň konsentrasiýasy bilen kesgitlenilýär. Konsentrasiýanyň artmagy bilen böwsülme naprýaženiýasy kiçelýär.

Tunnel böwsülmesi.

P-n-geçişe ters goýulan naprýaženiýanyň belli bir ýokary bahasynda, p-oblastyň walent zonasy, n-oblastyň doly bolmadyk geçiş zonasynyň garşysynda ýerleşýär (16.4 surat). Bu ýagdaýda p-oblastyň walent elektronlarynyň n-oblastyň geçiş zonasyna



galyňlygy x bolan potensial barýerden syzyp geçmegi mümkin.

Ters naprýaženiýanyň artmagy bilen (U_{ters}) p-n-geçişiň göwrüm zarýadynyň «giňligi kiçelip», ondaky meýdanyň güýjenmesi artýar. Bu ýerde şeýle zady belläp geçmeli,ýagny umumy göwrüm zarýadynyň giňligi ulalyp, elektronlaryň önündaki barýeriň giňligi kiçelýär. Haçanda p-n-geçişiň gaty ýuka bolan ýagdaýynda, U_{ters} naprýaženiýanyň gaty uly bolmadyk bahasynda hem, elektrik meýdany ε, p-n-geçişden effektiw tunnelirlenme başlanýan bahasyna ýetip bilýär we bösülme başlanýar. Meselem germaniý üçin tunnel böwsülmesi $E_{böws}= 3\cdot10^7$ V/m=30 V/mkm başlasa, kremniý üçin $E_{böws}=10^8$ V/m=10^2 V/mkm başlaýar. Şeýle bösülmä tunnel bösülmesi diýilip at berilýär. Şeýle böwsülme bolýan p-n-diodyň wolt-amper häsiýetnamasynyň ters şahasy 1-nji suratda görkezilen.

16.4. Surat. Diodlarda tunnel geçişi ters elektrik meýdanynda.

P-n-geçişin böwsülme napryazeniýasynyň nämä baglydygyna seredip geçeliň. P-n-geçiş birbada (kert) bolan ýagdaýynda elektrik meýdanynyň güýjenmsini şeýle kesgitläp bolýar.

$$E = -\frac{dU}{dx} = \frac{1}{e} \cdot \frac{d\varphi}{dx} \qquad (16.1)$$

Elektrik meýdanynyň (ε) maksimal bahasy p- we n-taraplaryň araçäginde ýetilýär. Bu ýerde

$$E_{max} = -\frac{eN_d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot d_n = -\frac{eN_a}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot d_p$$

(16.2)

Haçanda p-n-geçiş asimmetrik diýlip hasap edilende, ýagny az garyndyly tarap n-tipli bolsa, onda d_n=d diýip, alarys.

$$E_{max}^2 = \frac{2(\varphi_0 + eU_{ters})}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_d}$$

(16.3)

Haçanda ε_{max} böwsülme meýdanyna ε_{bows} (deň) diýilip kabul edilse onda bösülme napryaženiýa:

$$U_{bows} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_d \cdot E_{bows}^2 - \varphi_0}{e}$$

(16.4)

(16.4) deňlikden görünişi ýaly tunnel böwsülmaniň napryaženiýasynyň ululygy az garyndyly tarapyň garyndysynyň konsentrasiýasynyň artmagy bilen çyzykly kemelýär.

Ust böwsülmesi.

P-n-geçişe çykylýan ýerde, ýarymgeçirijiniň üstünde çäklendirilen zarýad, geçişde meýdanyň güýjenmesiniň güýçli

üýtgemesine getirip bilýär. Bu ýagdaýda p-n-geçişiň üstündäki gatlagyň böwsülmesi has ähtimal bolýar.

Tunnel diodlary.

Tunnel diodlary gaty ýokary konsentrasiýa çenli garyndyly ýarymgeçirijileriň esasynda taýýarlanyýar. Şeýle ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesi gadagan zonanyň içinde ýerleşmän, n-tarapda geçiş zonanyň içinde, p-tarapda bolsa walent zonanyň içinde ýerleşýär (16.4 surat). 16.4 suratda tunnel geçişiň deňagramlyk ýagdaýynyň energetiki shemasy görkezilen. Çyzgydan görünişi ýaly, p-tipiň walent zonasy, n-tipiň geçiş zonasy bilen bir-birine tarap bölekleýin geçýärler (частично перекрываются).

Daşky meýdan täsir etmedik ýagdaýynda, tunnel toguň akymy (1) (ters tok) we göni toguň akymy bir-birine deňdir. Haçanda ters naprýaženiýa täsir eden wagtynda zonalaryň bir-birini örtmesi artyp, çepden saga geçýän elektronlaryň sany artýar. Şeýlelikde ters toguň ululygy artýar, onuň artmasy ters elektrik meýdanyna göni proporsionaldyr. P-n-geçişe göni ugra elektrik meýdany birikdirilende, zonalaryň bir-birini örtmesi keçelip, göni ugra elektronlaryň akymy artyp başlaýar, onuň tersine ters ugra elektronlaryň akymy kiçelýär. Haçanda p-n-geçişiň n-tarapynyň geçiş zonasynyň düýbi p-tarap üçiň Ferminiň derejesi bilen deňleşen ýagdaýynda, göni ugra tok maksimuma ýetýär. Mundan beýläk göni ugra daşky meýdanyň artmagy bilen, tok kiçelýär, sebäbi p-tarapyň boş energetik derejeleriniň garşylynda duran n-tarapyň derejelerinde elektronlaryň sany azalýar. Şeýlelikde haçanda n-tarapyň geçiş zonasynyň düýbi, p-tarapyň walent zonasynyň depesi bilen bir derejede bolan ýagdaýynda göni tok özüniň minimal bahasyna ýetýär (16.4б surat).

Mundan beýläk göni ugra täsir edýän daşky meýdanyň (naprýaženiýanyň) artmagy, umuman belli diodlarda boluşy ýaly, p-n -geçişden diffuziýa togunyň eksponenta boýunça artmagyna getirýar.

Suratdan görünişi ýaly tunnel diodlaryň volt-amper häsiýetnamasynyň (VAH) esasy aýratynlygy, onuň VAH - nyň göni şahasynda naprýaženiýanyň artmagy bilen toguň kemelýan böleginiň ýüze çykmagydyr, ýagny diod otrisatel differensial garşylyga eýedir. Tunnel diodlarynyň bu häsiýetini, elektromagnit tolkunlaruny generirleme üçin, elektrik toguny aýyryp çatyjylar (pereklýuçatel) üçin peýdalanmak mümkin.

Tunnel diodlarynda, tunnel togy ýüze çykýanlygy sebäpli, p-n -geçişde zarýadlaryň toplanma we ýaýrama prosessi ýok diýen ýaly, şol sebäpli hem bu diodlaryň ýygylyk häsiýetnamalary gaty kämil we çaltlygy beýleki diodlaryňkydan ýokarydyr.

9-njy bap. Ýarymgeçiriji diodlaryň görnüşleri

9.1. Ýarymgeçiriji geterogeçişli diodlar

Geterogeçiş diýilip, dürli elektrik we optiki häsiýetlere eýe bolan iki sany dürli materialyň (ýarymgeçirijiniň) şepine aýdylýar. Biz bu temada iki sany dürli ýarymgeçirijiniň arasyndaky geterogeçişe (mysal üçin arsenid-galliý we germaniýniň arasyndaky geterogeçişe) seredip geçeliň.

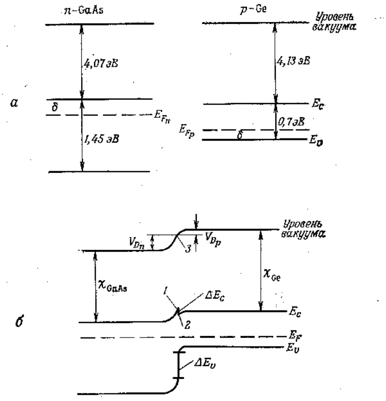
Energetik zonalaryň gabat gelmezligi sebäpli (ΔE_c we ΔE_v), geterogeçişin energetik zonasynyň diagrammasy ýönekeý gomogeçişiňkä seredende çylşyrymly bolýar. Bu gabat gelmezlik, ýagny energetiki zonanyň üzügi, sepleşýan ýarymgeçirijileriň gadagan zonasynyň giňliginiň we çykyş işiniň dürliligi bilen baglydyr.

Haçanda GaAs we Ge ýarymgeçirijileriň göwrüminde geterogeçiň ýakynyna çenli esasy häsiýetnamalar üýtgemeýän ýagdaýynda, geterogeçişiň energetik diagrammalaryna seredip geçeliň. GaAs we Ge ýarymgeçirijileriň gadagan zonalarynyň giňligini degişlilikde 1.45 we 0.7 eV diýip kabul edeliň. Öňden belli bouşy ýaly, çykyş işi elektrony Ferminiň derejesinden wakuum derejesine çykarmak üçin gerek bolan energiýa deň bolup, Ferminiň derejesiniň ýerleşişiniň üýtgemegi bilen üýtgäp durýar. Çykyş işiniň Ferminiň derejesine baglylygy sebäpli, ol garyndynyň konsentrasiýasynyň üýtgemegi bilen üýtgäp durýar. Şol sebäpli hem, elektron srodstwosy diýen ululykdan peýdalanmaklyk amatly bolýar. Sebäbi elektron srodstwosy diýen ululyk, elektrony geçiş zonanyň düýbünden wakuum derejesine geçirmek üçin gerek bolan energiýa deň bolup, garyndynyň konsentrasiýasynyň üýtgemegi bilen üýtgemeýär.

Köp sanly almaz gurluşyna eýe bolan ýarymgeçirijiler, geterogeçiş almaklyk üçin has amatlydyrlar. Bu gurluşlar kubiki elementar gözenegiň (ýaçeýkanyň) ululygy (a) bilen häsiýetlendirilýär. Almaz gurluşynda, atomyň onuň iň ýakyn goňşy 4

atom bilen aralygy $a\sqrt{3}$ deňdir. Otag temperaturasynda (300 K) GaAs we Ge ýarymgeçirijileriniň gözeneginiň hemişeligi (a) gaty golaý (takmyndan 0,08% töweregi takyklyk); bu ýarymgeçirijileriň giňelmek koeffisienti hem gaty ýakyn, şol sebäpli bu materiallar gaty oňat geterojübüt emele getirip bilýär.

Arsenid galliý we germaniýniň arasyndaky geterogeçişiň zona diagrammasyny gurmak üçin, n-GaAs donorlar bilen 3×10^{16} sm^{-3} çenili garyndyly diýeliň, p-Si akseptor garyndylary bilen 3×10^{16} sm^{-3} çeni garyndyly bolsun. 1-nji tablisada geterogeçişiň zona diagrammasyny gurmak üçin gerek bolan häsiýetnamalar bu ýarymgeçirijiler üçin berilen.



9.1. Surat. n-GaAs-p-Ge geterogeçişiň energetiki derejeleriniň diagrammasynyň gurluşy (masştab saklanylmaýar).

9. 1-nji tablisa.

GaAs-Ge arasyndaky p-n-geterogeçişiň energetiki diagrammasyny gurmak üçin gerek bolan häsiýetnamalaryň ululygy

No	Häsiýetnamalar	GaAs	Ge
1	Gadagan zonanyň giňligi, E_g	1,45 eV	0,7 eV
2	Elektronnoýe srodstwo, χ	4,07 eV	4,13 eV
3	Kompensirlenmedik donorlaryň konsentrasiýasy, N_D-N_A	10^{16} sm^{-3}	-
4	Kompensirlenmedik alseptorlaryň konsentrasiýasy, N_A-N_D	-	3×10^{16} sm^{-3}
5		0,1 eV	-
6	$E_g - E_f = \delta_{GaAs}$	-	0,14 eV
7	$E_v - E_f = \delta_{Ge}$	5,654 Å	5,658 Å
8	Gözenegiň hemişeligi, a	11,5	16
	Otnositel dielektrik hemişeligi, ε		

Geterogeçişiň energetiki diagrammasyny gurmaklyk üçin ilki bilen, wakuum derejeleri gabat gelýan ýagdaýda bu iki materialyň energetik diagrammasyny aýratynlykda çyzalyň (9.1 surat).

9.1a suratdan görünişi ýaly elektronyň energiýasy E_{fp} derejede E_{fn} derejä seredeniňde kiçidir. Şol sebäpli hem, ýarymgeçirijiler sepleşenden soň, Ferminiň derejesiniň deňleşmegi üçin n-GaAs-den p-Ge elektronlaryň belli bir sany geçýär. Elektronlaryň şeýle geçişi (hereketi) ýarymgeçirijileriň araçäginde zonalaryň egreýmesine getirýär. Arsenid galliýniň geçiş zonasy E_c ýokary gyşarar. Zonalaryň gyşarmagynyň ululygyny U_{Dn} we U_{Dp} diýip belläliň.

Ferminiň derejesiniň süýşmesiniň ululygy, şeýle deňligiň üsti bilen tapylýar.

$$E_{fp} - E_{fn} = (\chi_{Ge} + E_{gGe} - \delta_{Ge}) - (\chi_{GaAs} + \delta_{GaAs}) = U_{Dn} + U_{Dp} \quad (9.1)$$

Bu tapawut şu mysal üçin 0,52 eV deň bolup zonalaryň egreminiň jemine deňdir $U_{Dn} + U_{Dp}$. Edil gomoperehotdaky ýaly, geçiş serhedinde giňligi χ_n we χ_p bolan göwrüm zarýady emele gelip, zarýadyň saklanmak kanuny esasynda kompensirlenmedik donorlar we akseptorlaryň konsentrasiýasy bilen şeýle gatnaşykdyr.

$$\frac{\chi_n}{\chi_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

(9.2)

Puassonyň deňlemesini ulanyp alýarys

$$U_{Dn} = \frac{N_D x_n^2}{2\varepsilon_{GaAs}}$$

we

$$U_{Dp} = \frac{N_A x_p^2}{2\varepsilon_{Ge}},$$

Bu ýerde

$$\frac{U_{Dn}}{U_{Dp}} = \frac{N_A \varepsilon_{Ge}}{N_D \varepsilon_{GaAs}}$$

(9.3)

Biziň mysalymyzda U_{Dn}/U_{Dp} takmyndan 4:1 deňdir, şeýlelikde, U_{Dn}=0,42 eV we U_{Dp}=0,1 eV.

Energetiki diagrammany gurmagy dowam etdirip, 9.1b suratdaky çyzgyny alarys.

Geometriki nukdaý nazardan içikin seretseň, energetiki diagrammadaky üzülmäniň ululygy üçin (ΔE_c), deňlemäni şeýle görnüşde ýazmak bolýar.

$$\Delta E_c = \delta_{GaAs} + U_{Dn} - (E_{gGe} - \delta_{Ge}) + U_{Dp} \qquad (9.4)$$

Bu deňlige (17.1)-nji deňikden bahalary goýup, amatly görnüşde ýazýarys:

$$\Delta E_c = \chi_{Ge} - \chi_{GaAs} \qquad (9.5)$$

(9.5)-nji deňligiň dogrydygyny 9.1b suratdan hem görmek mümkin, sebäbi 3-1 arasyk χ_{GaAs} deňdir we 3-2 aralyk χ_{Ge} deň. Şol sebäpli hem biziň mysalymyz üçin ΔE_c = 4,13 - 4,07 = 0,06 eV.

Walent zonasyndaky energetik üzülmäni ΔE_v şu aşakdaky deňlik den tapmak mümkin.

$$\Delta E_v = (E_{gGaAs} - E_{gGe}) - (\chi_{Ge} - \chi_{GaAs}) \qquad (9.6)$$

(5) we (6) geňlikleriň esasynda alarys.

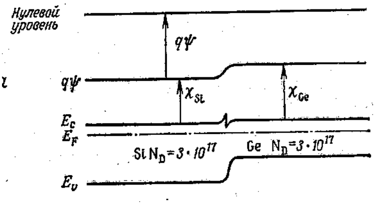
$$\Delta E_c + \Delta E_v = E_{gGaAs} - E_{gGe} \qquad (9.7)$$

Geterojübütlere seredilende alynan deňlikleriň, ýagny (9.5, 6, 7) deňlikleriň gymmaty uludyr n-GaAs-p-Ge geterogeçiş üçin energetik zonanyň üzülmesi degişlilikde ΔE_c = 0,06 eV we ΔE_v = 0,69 eV deňdir.

Izotip (n-n we p-p) geterogeçişler.

Izotip geterogeçişde dürli ýarymgeçirijileriň geçiş zonasynyň arasyndaky energetiki päsgelçilik, bu iki ýarymgeçirijiniň elektron srodstwalarynyň ululyklarynyň tapawudy bilen kesgitlenýär ($\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1$). Mundan başgada energetik päsgelçiligiň ululygyna ýarymgeçirijilerdäki garyndylaryň konsentrasiýasynyň täsiri bar. 9.2-nji suratda iki sany n-tipi ýarymgeçirijiniň arasyndaky geterogeçişiň energetik diagrammasy getirilen. Suratdan görünişi ýaly n-n-geterogeçişde geçiş zonasynda elektronlaryň 2-nji bölekden 1-nji bölege geçýän araçäginde elektronlaryň oňunde potensial päsgelçilik emele gelýär. Edil şonuň ýaly p-p-geterogeçişde (9.2b surat) 2-nji bölekden 1-nji bölege geçýän deşikleriň öňünde päsgelçilik emele gelýär. Şeýlelikde, bu iki geterogurluş hem (n-n we p-p) bir taraplaýyn geçirijilik häsiýetine eýe bolup bilýär.

Izotip geterogeçişde esasy däl zarýadlaryň inžeksiýasy bolmaýar, şonuň üçin hem şeýle gurluşlardan taýýarlanylan diodlar gaty kiçi goşulyş (wklýuçeniýe) wagtyna eýedir. Umuman aýdanda has ýokary ýygylykda işläp bilýär.



9.2. Surat. Birtipli (izotipli) n-Ge-n-Si geterogeçişiň deňagramlyk ýagdaýyndaky energetiki diagrammasy.

Elektron srodstwa baradaky ululyklara laýyklykda n-n Ge-Si geterogeçişde energetiki üzülmäniň ululygy ΔE_c = 0,12 eV (4,13 eV - 4,01 eV). Bu n-n Ge-Si geterogeçişi birmeňzeş garyndyly ýagdaýynda, ýagny garyndynyň konsentrasiýasy $\sim 3 \cdot 10^{17}$ sm^{-3} bolanda seredeliň (9.3 surat). Zona diagrammasynyň görnüşi zarýadlaryň jeminiň nola deň bolmalydygyndan gelip çykýar.

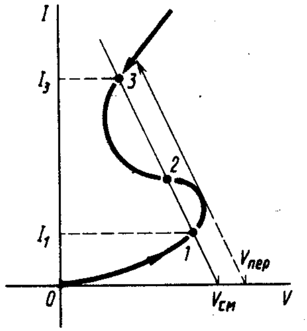
9.3. Surat. n-p-geterogeçişlerde toguň geçişiniň alty sany mümkin bolan görnüşleri. а – Andersonyň modeli; б – Redikeriň modeli; в – Dolegiň modeli; г – n-Ge-pGaAs geçişde peýdalanylýan model; д – n-Ge-p-GaAs we p-Ge-n-Si

geterogeçişlere peýdalanylýan model; e – д-model serdende ony çalyşýan model.

Geterogeçiş araçäginde zarýadyň ýok ýagdaýynda Şottkiniň adaty çäklendirme şertiniň esasynda, elektrostatiki potensialyň ψ üznüksizligi ücin geçiş zonasynda iki jisimiň (germaniý - kremniý) elektron srodstwalarynyň tapawydyna deň bolan üzük emele gelýär. Geteroserhetde kremniniň göwrüm zarýadyndaky položitel zarýad germaniniň otrisatel zarýad bilen baýlaşmasyny kompensirleýär.

9.2. Dinistorlar we tiristorlar

Awtomatikanyň käbir gurluşlarynda we hasaplaýyş tehnikasynyň zynjyrlarynda s-görnüşli wolt-amper häsiýetnamaly ýarymgeçiriji priborlara uly orun berilýär (9.1 surat). Şeýle



priborlarda, belli bir çykyş garşylygynda we daşky naprýaženiýanyň bahasynda U_d iki sany durnykly ýagdaý emele gelýär (9.1 suratdaky çyzgyda 1 we 3 nokat durnukly ýagdaý, emma 2-durnuksyz ýagdaý). Wolt-amper häsiýetnamanyň 1-nji nokadynda daşky naprýaženiýanyň esasy bölegi diotda çökýär, emma 3-ýagdaýda I_3 tok akyp çykyş garşylykda çökýär. Diodyň uly garşylykly 1-ýagdaýdan, kiçi garşylykly 3-ýagdaýa geçişi, daşky naprýaženiýanyň utgaşma (pereklýuçeniýe) naprýaženiýa çenli ýokarlanmagy bilen baglanşyklydyr. Şeýlelikde, S-görnüşli wolt-amper häsiýetnamaly priborlar, elektron utgaşdyryjylary bolup durýarlar.

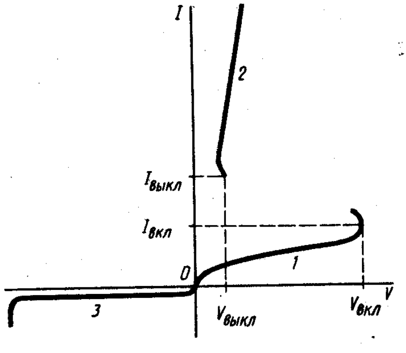
9.1. Surat. S-görnüşli wolt-amper häsiýetnama.

Şeyle S-görnüşli wolt-amper häsiýetnamaly diodlaryň iň ýönekeý görnüşi, uzun bazaly diodlardyr (uzun bazaly diodlarda ýokary garşylykly gatlagyň galyňlygy esasy däl zarýadlaryň diffuziýa aralygyndan ulydyr). P-n-geçişden inžektirlenen esasy däl zarýadlar, haçanda göni ugra elektrik meýdany täsir edende, diodyn p we n-böleklериniň garşylygyny peseldýar, bu bolsa p-n-geçişe goýulan naprýaženiýanyň artmagyna getirýär. Öz gezeginde p-n-geçişe goýulan naprýaženiýanyň artmagy p-n-geçişden inžeksiýany artdyrýar we p we n-bölekleriň ýenede garşylygy kiçelýär. Emma geçirilen derňewlerden görnüşi ýaly, WAH-da otrisatel differensial gärşylykly bölegiň ýüze çykmagy üçin, diodyň baza gatlagynyň geçirijiligi inžeksiýa toguna proporsional artman, has çalt artmalydyr. Şeýle geçirijiligiň gaty çalt artmagynyň birnäçe mehanizmi bar. Birinjiden, inžeksiýanyň artmagy bilen zarýadlaryň ýaşaýyş wagtynyň artmagy mümkin. Ikinjiden, zonara ýüze çykýan şöhläniň (rekombinasion şöhlelenmäniň) bazada ýuwdulyp artykmaç zarýady ýüze çykarýan bolmagy mümkin.

S-görnüşli WA häsiýetnamaly ýarymgeçiriji priborlaryň içinde, köp gatlakly ýarymgeçiriji gurluşlar, ýagny dinistorlar we tiristorlar köp ýaýrandyr.

Dinistorlar.

Daşdan elektrik meýdanyň täsiri bilen urukdyrylmayan



tiristora dinistor diýilip at berilýär. Dinistoryň WAH-sy 18.2 suratda, gurluşynyň struktura shemasy 18.3 suratda görkezilendir. Iki gyraky p-n-geçişlere, emitter geçişleri diýilýar, ortaky p-n-geçişe kollektor geçişi diýilýar. Dinistorlaryň üç sany p-n-geçişi bolup, onyň içki bölekleri az garyndylydyr. Onuň tersine iki daşky emitter bölekleri baza seredeniňde ýokary derejede garyndylydyr. Haçanda göni ugra naprýaženiýe berilende, plus daşky p_1 – gatlaga we minus daşky n_2 – gatlaga berilýär. Bu ýagdaýda iki daşky geçiş p_1-n_1 we p_2-n_2 – göni ugra utgaşyp, içki p_2-n_1 – geçiş ters ugra daşky täsiriň esasynda bolýar (9.3 surat). Göni ugra meýdan berilen daşky geçişlerde garşylyk kiçi bolup, naprýaženiýanyň aglaba bölegi içki p-n-geçişe goýlandyr. Şeýlelikde umumy toguň ululygy, içki p-n-geçiş tarapyndan kesgitlenilip, p_2-n_1 geçişden geçýän I_k togy tapmaklyk ýerliklidir.

9.2. Surat. Dinistoryň wolt-amper häsiýetnamasy.

u p_2-n_1 geçişden geçýän I_k tok, ýylylyk generasiýasy tarapyndan emele gelýän tokdan, we p_1-n_1, p_2-n_2 geçişlerden inžektirlenen zarýatlardan durýar. Inžektirlenen zarýadlaryň aglabasy kollektor geçişine ýetýär, sebäbi n_1 we p_2 gatlaklaryň galyňlygy esasy däl zarýadlaryň diffuziýa aralyklaryndan, degişlilikde L_n we L_p – den ýukadyr.

Şeýlelikde kollektor geçişinden geçýan tok, birnäçe düzüjiden, ýylylyk generasiýasy tarapyndan ýüze çykýan I_{ks} tokdan we emitter geçişlerinden generirlenip kollektor geçişine ýetýän elektronlaryň I_{kn} hem-de deşikleriň I_{kp} togundan durýar.

$$I_{kp} = \beta_1\gamma_1 I_1 \qquad (9.1)$$

$$I_{kn} = \beta_2\gamma_2 I_2 \qquad (9.2)$$

Bu ýerde γ_1 we γ_2 – emitter geçişleriň inžeksiýa koeffisiýenti, $\beta_1$we β_2 – elektronlaryň we deşikleriň emitter geçişinden kollektor geçişine ýetijilik (perenos) koeffisiýenti. I_1 we I_2 gegişlilikde p_1-n_1 we p_2-n_2 – geçişden geçýän umumy tok.

Kollektor geçişinden geçýan umumy togyň ululygy

$$I_k = I_{ks}+I_{kp}+I_{kn} = I_{ks}+\beta_1\gamma_1 I_1+\beta_2\gamma_2 I_2 \qquad (9.3).$$

Haçanda dinistoryň üç p-n-geçişinden geçýän toklar deň bolanda dinistor durnukly ýagdaýynda bolýar.

$$I_1 = I_k = I_2 = I \qquad (9.4)$$

Onda

$$I = I_{ks}+I(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2) \qquad (9.5)$$

Bu deňligi I göra çözüp alarys

$$I = \frac{I_{ks}}{1-(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2)}$$

(9.6).

Dinistor taýýarlanylanda onyň ýapyk ýagdaýynda (β1γ1+β2γ2) ululyk birden kiçi bolar ýaly edilip işlenilip düzülýär.

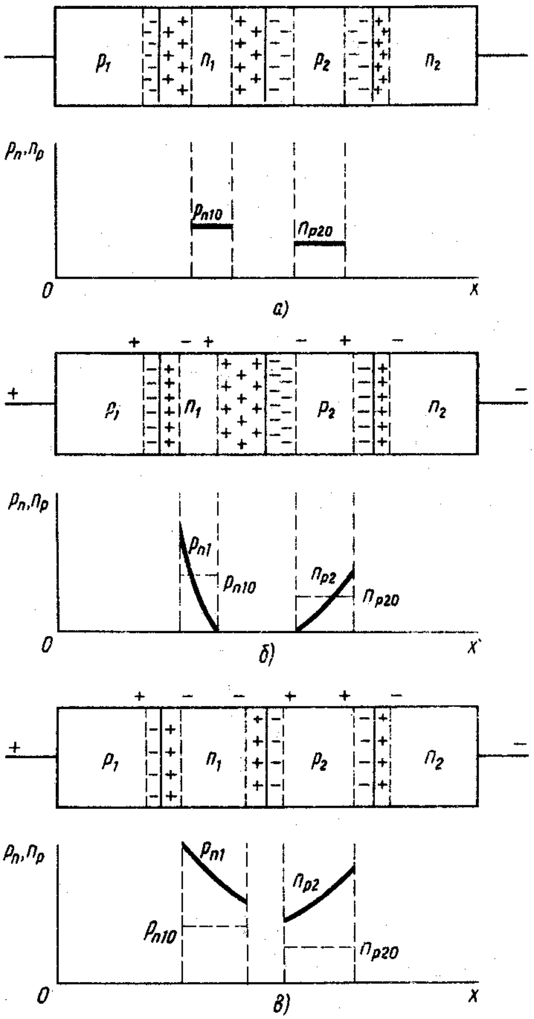
Dinistordan akýan I togyň ululygynyň artmagy bilen inžeksiýa koeffisiýentleri γ_1 we γ_2 artýar. Şeýlelikde dinistora goýlan naprýaženiýanyň artmagy bilen $(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2)$ ululyk artýar. Diýmek, (9.6) deňlige laýyklykda, daşky naprýaženiýanyň belli bir bahasyndan başlan $(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2)$ ululyk bire golaýlap, dinistordan geçýän tok tükeniksizlige ymtylyp bilýär.

Emma tok şeýle ýagdaýa ýetmänkä dinistoriň iş režimi durnuksyz ýagdaýa geçýar. Hakykatdan hem kollektor togunyň I_k ululygy emitter geçişlerinden geçýan tokdan artyklyk edýär.

$$I_k = I_{ks}+(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2)I_e > I_e \qquad (9.7)$$

Başga söz bilen aýdanda, kollektor p-n-geçişinden p_2 gatlaga tarap zyňylýan deşikleriň sony bu gatlaga inžektirlenýän elektronlaryň sanyndan agdykdyr, emma n_1 gatlaga artykmaç elektronlar zyňylýar.

Şeýlelikde n_1-p_2 geçişiň ýakynynda ters alamatly zarýadlar bilen kompensirlenmedik elektronlar we deşikler toplanyp başlaýar. Zarýadlaryň toplanmagy kollektor geçişinde potensial päsgelçiligiň has peselip, toguň artmagyna getirýär. Umuman aýdanda bu hadysa



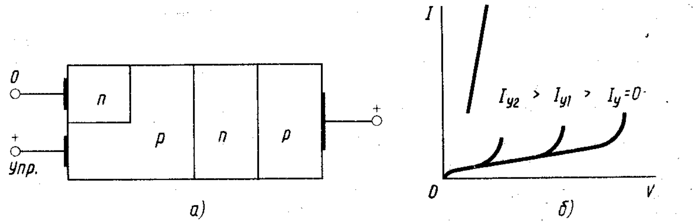
dinistoryň WAH-da otrisatel garşylykly bölegiň emele gelmegine getirýär.

9.3. Surat. Tiristoryň bazalarynda göwrüm zarýadlarynyň we esasy däl zarýadlaryňkonsentrassiýasynyňpaýlanyşy: denagramlyk ýagdaýynda (a); daşky meýdana birleşdirilmedik (б) we birleşdirilen ýagdaýynda (в).

Dinistoryň iş ýagdaýy (wklýuçonnoýe sostoýaniýe) durnukly ýagdaýdyr. Sebäbi bu ýagdaýda ýene-de ($\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2$) ululyklaryň jemi birden kiçidir. Utgaşan ýagdaýynda, ýagny iş ýagdaýynda dinistoryň umumy garşylygy kiçidir, şol sebäpli hem dinistorlara yzygider çäklendiriji garşylyk birikdirilýär. Utgaşan ýagdaýynda dinistoryň togy 9.2 suratda görkezilişi ýaly daşky meýdanyň naprýaženiýasynyň ululygy we çäklendiriji garşylyk bilen kesgitlenilýär.

Dinistorlar özboluşly elektron relesi bolup, ol daşky goýulan naprýaženiýa belli bir ululyga ýetende utgaşýar. Olar utgaşdyryjylar hökmünde radiotehnikada we awtomatikada giňden peýdalanylýar.

9.4. Surat. Dolandyrylýan tiristoryň gurluşy (a) we wolt-



amper häsiýetnamalary (b).

Dinistorlardan tapawutlylykda, tiristorlarda utgaşma naprýaženiýany goşmaça üçünji elektrodyň kömegi bilen urukdyrmak (dolandyrmak) mümkin (9.4 surat). Urukdyryjy elektroda elektrik meýdany şeýle polýarlykda berilýar, ýagny kollektor geçişiň ýakynyndaky emitter p-n-geçişden inžektirlenýan togyň ululygy artar ýaly. 18.4 suratda urukdyryjy togyň dürli bahasynda, tiristoryň WAH-nyň özgerişi görkezilen. Urukdyryjy elektrotdan geçýän toguň artmagy bilen, tiristoryň utgaşma naprýaženiýasy kiçelýär.

Tiristorlaryň iş režimini diňe bir daşdan berilýan goşmaça elektrik meýdanynyň üsti bilen urukdyrylman, tiristoryň baza bölegini ýagtylyk şöhlesi bilen şöhlelendirip, özgertmeklik mümkin. Şeýle tiristora fototiristor diýilip at berilýär.

9.3. Syrgyn-uçuşly diodlar

9.3.1. Statiki häsiýetnamalary

Syrgyn-uçuşly diodlaryň esasy görnüşleriniň biri Ridiň diody bolup, ol assimmetrik ýiti p-n geçişli, simmetrik p-n geçişli (iki dreýet çägi), iki gatlakly bazaly diody, üç gatlakly bazaly diodlardyr.

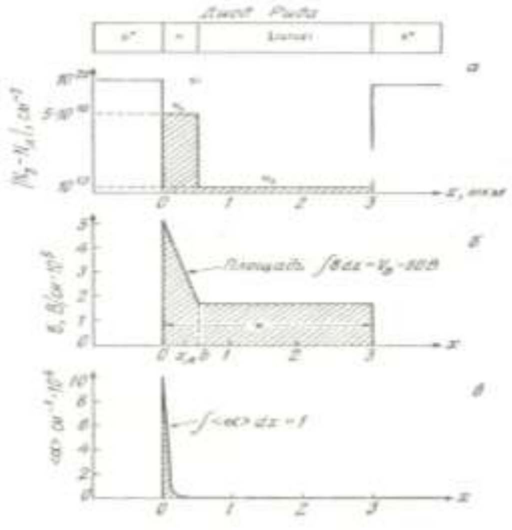
Surat 1-da Ridiň idealizirlenen diodynda (p^+-n-i-n^+ ýa-da n^+-p^-i-p^+ diodlary) elektrik meýdanynyň we urgy ionizasiýasynyň netijeliliginiň koeffisiýentiniň garyntgylarynyň dargaýşy görkezilendir. Urgy ionizasiýasynyň netijeleri koeffisiýenti deňdir:

$\langle\alpha\rangle=\alpha_n \exp [-_x\int^w (\alpha_n- \alpha_p)\, dx']$, (28.1)

nirede α_n we α_p deşikleriň we elektronlaryň orgy (zarby) ionizirlenmesiniň koeffisiýentidir.

W-güýçden gaçan oblastyň ini: Sargyn urgyny şeýle görnüşde ýazmak bolar:

$S_o^{11}(\alpha)dx=1$.

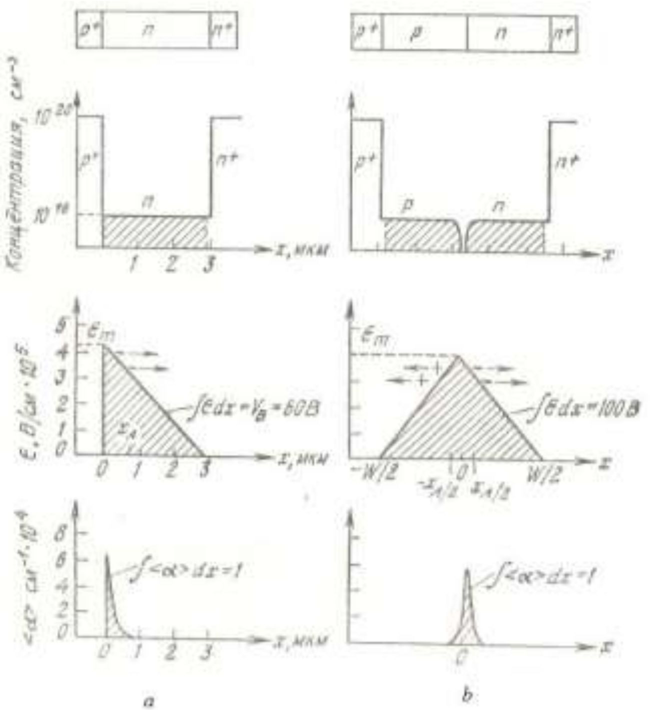


28.1-nji surat. *p^+ -n-i-n^+ diody dargadylandaky garyntgylandaky garyntgylaryň dargadylşy (a), elektrik meýdanyň dartgynlygy (b) we ionlaşma koeffisiýentiniň netijeliligi (ç).*

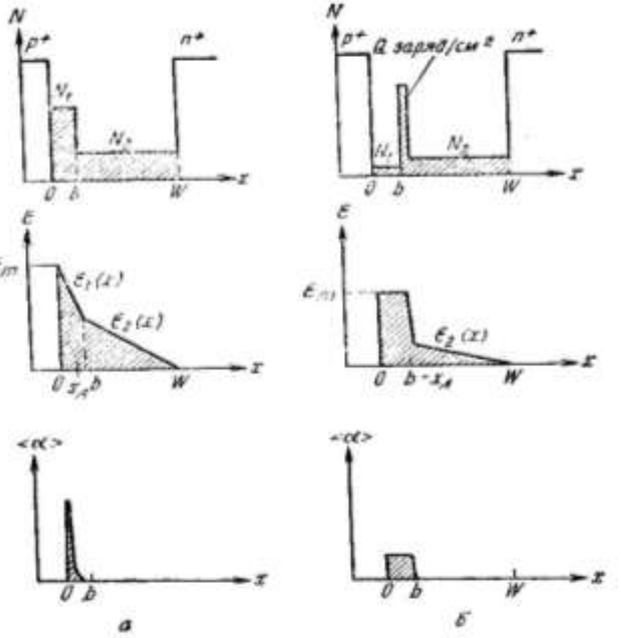
Elektrik meýdanynyň dartgynlygynyň urgy ionizirlemäniň koeffisiýentine güýçli baglylygy sebäpli syrgyn çäginiň güýçli

lokalizirlenendigini göz ýetirmek bolar. Äkidijileriň köpelmek prosessi ýokary meýdanyň dar gatlagynda bolup geçýär. Aşakda görnüşi ýaly toguň optimal dykyzlygy we PTK (КПD) üznüksiz akymly-aralyk diodlarynda has güýçli X_A we V_A baglydyr. Köpelme oblastyndan daşarky gatlaga dreýf çägi diýilýär.

Ridiň diodynda garyntgynyň iki sany dargaýan ýagdaýyny synlamak bolar. Egerde garyntgyly № 2 konsentrasiýaly çägi ýok bolsa, onda Ridiň diody p-i-n-diodyna öwrülýär, oňa käwagt Misawiniň diody diýilýar. Surat 2.a p-n asimmetrik ýiti geçişli diodyň statik häsiýetnamasy görkizilendir. Urgy ionizirlemesiniň nokada görä asimmetrik effektiwli.



28. 2-nji surat. *Garyntgylaryň, elektrik meýdanynyň dartgynlygynyň we dioddaky ionizasiýanyň netijeli koeffisiýentiniň asimmetrik ýiti p^+-n^- geçişli (bir dreýf oblastly diod) we p^+-p-n-n^+ simmetrik ýiti p-n geçişli görnüşlerindäki dargaýşy.*



28.3-nji surat. *Ridiň modifisirlenen diodynda garyntgylaryň, elektrik meýdanynyň dartgynlygynyň, ionizirleme koeffisiýentiniň effektiwligi: iki gatlykly bazaly (a) we üç gatlakly bazaly (b).*

gi elmydam α_n we α_8 kremniýdäkiden has tapawutlydyr.
Egerde $\alpha_n \approx \alpha_p$, onda ionizasiýanyň effektiw koeffisiýenti:
$(\alpha) = \alpha_n = \alpha_p$; (3) we ionizasiýanyň syrgyn akymly köpelýän oblasty nokada görä x=0; simmetrikdir.

9.3.2. Dinamiki häsiýetnamalar

Inzeksiýa bilen bagly bolan faza gijikmesine we idealizirlenen abzaldaky aralyk effektine seredileň. Goý geçirijilik togynyň impulsy x=0 bolanda doly toga gatnaşmasy boýunça fazaly burçy bilen inžektirlenýär. Üýtgeýän togyň j_c geçirijiligi, x=0 bolanda j-togyň doly dykyzlygyna deň we faza boýunça süýşirilen:
τ_c (x=0)= τ_{exp} (-j4) (16)

Dreýf oblastynyň islendik nokadynda doly üýtgeýän tok elmydam geçirijilik togynyň we süýşme togynyň jemine deňdir:

$\tau(x)=\tau_c(x)+\tau_d(x)=\tau_c(x=0)e^{-jwx/vs}+JWE_S E(x)$, (28.2)

nirede, E (x)-elektrik meýdanynyň dartgynlygynyň üýtgeýän komponenty

Ýokardakylardan taparys:

$E(x)=\tau(\frac{1-e^{-jwx/vs-j4}}{jwEs})$; (28.3)

şu deňlemäni integrirläp diodyň impedansyny taparys:

$$Z=\frac{S\xi(x)dx}{\tau}=\frac{1}{jws}[1-\frac{-j\mu(1-e-j\theta)}{j\theta}] \qquad (28.4)$$

nirede $c=E_s/N$ –meýdan birligindäki sygym; $\theta=\upsilon_s$-uguş burçy.Anlatmanyň hakyky we başdaky bölegini görkezip alarys:

$$R=\frac{GOS\mu-GOS(\varphi+\theta)}{\omega c\theta} \qquad (28.5)$$

$$X=-\frac{1}{\varpi c}+\frac{\sin(\theta+\varphi)-\sin\varphi}{\omega c\theta} \qquad (28.6)$$

Aşakdaky φ inzeksiýaly faza burçynyň üýtgeýän tok boýunça garşylyga baglylygy görkezilendir. Egerde . φ nola deň bolsa, onda garşylyk (1-COSθ)/θ proporsionaldyr. Egerde φ≠0 bolsa, onda garşylyk aralyk burçynyň birnäçe ulylyklarynda Aýyrmakdyr. Meselem, φ=Π/2 has uly garşylyk aralyk burçynyň θ_n-3Π/2 ululygyna laýykdyr. Edil şu esasda inžeksiýaly-aralyk diody işläp biler. Böwedir üsti bilen geçýän esasy däl äkidijileriň inžeksiýasy 90° gijikmäni girizýär, aralyk burçy bolsa 270° deň bolup abzalyň häsiýetnamasyny optimirleýär. Egerde φ=Π,θ=Π-de garşylyk maksimaldyr. Bu ýagdaý üznüksiz syrgyn-uçuşly režimine laýyk gelip, onda 180° faza süýşmesi gazanylýar. Abzaly döretmekde döreýän aralyk effekti, dreýf oblastynda inžeksiýa gijikmesini döretmeklik bilen baglydyr.

Inžeksiýaly fazanyň we aralyk optimal burçynyň jemi φ+ θ opt takmynan 2Π deňdir.

Az signally derňew.

Azsignally derňew ilkinji sapar Rid tarapyndan, soň bolsa Djilden we Maýnsom tarapyndan dowam edildi. Ýönekeýlik üçin diýele ionizirleme koeffisiýenti $\alpha_{n}=\alpha_{p}=\alpha$ we elektronlaryň we deşikleriň doýgunlyklarynyň tizligi deňdir. Diody üç oblasta böleneň: 1) Syrgyn köpelme; 2) dreýf oblasty-bu ýerde äkidijileriň generasiýasy ýokdyr; 3) passiw oblasty-ol bolsa gerek däl mugthor garşylyklaryny girizýar. Iki aktiw oblastlary özara täsir edişýärler, sebäbi olaryň çägindäki üýtgeýän elektrik meýdany üznüksizdir. Hemişelik ululyklary bellemek üçin peski indeks “O”, tildany (~) azsignally üýtgeýjileri üçin ulanarys. Köpeliji oblastyndaky üznüksiz akymly togyň dykyzlygy τ_A bu oblastdaky üýtgeýän togyň dykyzlygyna deňdir, emma üýtgeýän togyň doly dykyzlygy bolsa τ deňdir. Biziň teklip edişimiz ýaly köpelme oblasty has dar bolup, τ_A togy dreýf oblastyna gijikmezden gelip ýetýän. Egerde äkidijiler doýgunlyk tizligi bilen hereket etseler ..., geçirişeň $j_c(x)$ üýtgeýän togynyň dreýf oblastyndaky dykyzlygy doýgunlyk tizligi bilen hereket edýän öçmeýän tolkun ýaly bolup görüner, ol şeýle ýazylýar

$$\tau c(x) = \iota a e - jwx/\vartheta s \cong \psi \tau e - jwx/\vartheta s \quad (28.7)$$

nirede, $\psi \cong \tau \mathrm{A}/\tau$ –kompleks ululykdyr.

Islendik kese kesikde doly togyň dykyzlygy .. tok geçirijisiniň dykyzlygynyň we süýşme .... toklarynyň jemine deňdir:

$$\tau = \tau_e(x) + \tau d(x) \neq f(x)\,\mathrm{z}$$

Süýşirme togynyň dykyzlygy elektrik meýdanynyň üýtgeýän dartgynlygyna $\xi e(\mathrm{X})$ aşakdaky gatnaşykda baglydyr:

$$\tau d = j\omega\xi\xi(\mathrm{X})$$

Ýokarda görkezilen aňlatmalardan dreýf oblastyndaky elektrik meýdanynyň dartgynlyk komponentiniň aňlatmasyny alyp bileniş:

$$\xi(x) = \tau \frac{1 - \psi e - jwx/\vartheta s}{jw\xi s} \quad (28.8)$$

Integrirlemek netijesinde ξx bu oblastdaky güýçlenme pese gaçyşlygyna baglylykgy alaryş.

Syrgyn köpelmäniň oblasty.

Başda köpelme oblastyna seredileň. Hemişelik togyň dykyzlygy $J_o=jp_o+jn_o$ doýgunlygyň ters togynyň dykyzlygy bilen bagly bolup, ony termiki generasiýa bilen $J_s=J_n+Jps$ gatnaşygy bilen şertlendirilýär.

$$\frac{Js}{Jo} = 1 - \int < \alpha > dx \quad (28.9)$$

Döwülen wagty S_o üznüksizlige ymtylýar, emma $j < \alpha > dX = 1$; stasionar ýagdaýda ionizasiýanyň effektiwlik koeffisiýentindäki integral 1-den ýokary däldir. Ýöne şeýle ýagdaý has tiz üýgeýän meýdana degişli däldir. Aşakda biz abzalyň işini ýazýan esasy deňlemäni şeýle görnüşde alaryş.

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{\xi}{\xi s}(Np - Na + p - n); \quad \text{(Pudasonyň deňlemesi)}$$

(28.10)

$J_n= qV_s\, n,$

$J_p= qV_s\, P,$ (28.11);

$J = J_n + J_p$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial jn}{\partial x} + \alpha Vs\,(n+p), \quad (28.12)$$

Aňlatmalaryň sag tarapyndaky ikinji goşulmalar elektron-deşik generasiýasynyň tizligine deňdir. Bu ululyk termiki generasiýadan has uly bolup, ony hasaba almaşak hem bolar. Indi bolsa deňlemeleri goşup we ony .....dan ...... çenli integrirläp alaryş:

$$C_A\frac{dj}{} = - (Jp - Jn)_o^x A + 2J\int \alpha\, dx\,, \qquad (38.13)$$

dt

nirede, $\xi \mathrm{A}\dfrac{dj}{dt} = (Jp - Jn)$ τ a=xa/Vs köpelme oblastyndaky äkidijileriň aralyk wagty-uçuş wagty.Çäklenme şerti bolup, x=0 ters doýgun togynyň elektronlarynyň togynyň deňlemesi bolup gulluk edýär.Şonuň üçin tekizlilikde x=0; J_p-J_n=-2J_n+J=-2Jns+J tekizliginde deşigiň togy doýgunlygyň ters togyna ..... deňdir. Şeýlelikde, Jp-In=2Jp-J=2Jps-I. Bu çäklenme şertini hasaba alyp, ol deňlemäni aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

dt 2J 2Js
-----=------(ddx -1) + ------ ; (28.14)
dt Ca τ A

Stasionar şertde J we J_o hemişelik togy gabat getirýärler. Indi bolsa deňlemäni ýönekeýleşdirip, ýagny a-nyň deregine ionizasiýanyň orta koeffisiýenti α goýup, integrirläp, alarys:

$$\frac{dt}{dt} = \frac{2t}{\tau \mathrm{A}}(\alpha x - 1)$$
(28.15)

Üýtgeýän signalyň azlygyny göz öňünde tutup:

$$\alpha = \alpha + \alpha\,_{e}{}^{jwt} = \alpha_o + \alpha' \varepsilon_A{}^{e\ jwt}$$

$$\alpha_{xa} = 1 + xa\ \alpha' \varepsilon_A{}^{e\ jwt,}$$

$$J = J_o{}^{+} J_A{}^{ejwt},\ \varepsilon = \varepsilon + \varepsilon_A{}^{e\ jwt} \qquad (28.16)$$

Ýokardaky getirlen gatnaşmalary deňlemesinde goýup, we has ýokary tertipdäki çlenleri hasaba alman geçirijiniň üznüksiz akymdaky togynyň dykyzlygynyň üýtgeýän komponentleri üçin deňlemäni alarys:

$2\alpha' xa\ J_o \varepsilon_A$

J_A=--------------
(28.17)
jwta

Köpelme çägindäki süýşme togy deňdir: $\Im ad = j\omega\xi, \xi$ (28.18)

Bu iki komponent zynjyrda akýan doly tokdyr. Elektrik meýdanynyň dartgynlygynyň berilen ululygy üçin üznüksiz akym togy J_A reaktiw häsiýetleri bolup, W görä ters proporsionallykda üýtgeýär.Başga düzüji hem $T_{A\alpha}$ reaktiw häsiýetleri bolup ýygylyga göni proporsionallykda üýtgeýär.

Şeýlelikde köpelme oblasty zynjyra ekwiwalent bolup, onda induktinlik we sygym parallel çatylandyr we olaryň ululygy şeýle kesgitlenýär:

$L_A = C_A/2J_o\alpha A$ (36) Şeýle zynjyryň rezonans ýygylygy deňdir:

$C_A = \varepsilon_s A/xa$

wr 1
fr = --------= ------ $\sqrt{\alpha v}$ ’J_o (28.19) Köpelme çäginiň impendansy aşakdaky 2П 2П 2П
ε_A
ýönekeý

görnüşde bolup biler:

Xa 1 1 1
Za=--------- (---------------)=---------- (-----------)
(28.20)
jWε sA 1-w²/w² jwca 1-w²/w²

$$\gamma \equiv \frac{\bar{J}_A}{\bar{J}} = \frac{1}{1 - w^2/w_r^2}$$

(28.21)

Dreýf oblasty we doly impedans. $\gamma \equiv \frac{\bar{J}_A}{\bar{J}} = \frac{1}{1 - w^2 / w_r^2}$

we $\varepsilon_p(x) = \bar{J}\,\frac{1 - Ye^{-jwx/w_s}}{jw\varepsilon s}$, aňlatmalaryndaky ýerinde goýup we dreýf oblastynyň (W-Xa) urynlygy boýunça meýdany integrirläp, üýtgeýän güýjenmäniň pese gaçyşy üçin aňlatmany alarys:

$$vd = \frac{(w - X_A)}{jwc_s}\left[1 - \frac{1}{1 - w^2 / w^2}\left(\frac{1 - e^{-jöd}}{jöd}\right)\right], \qquad (28.22)$$

nirde Öz-dreýfiň oblastyndaky aralyk burçy:

$$Öd \equiv \frac{W(W - X_A)}{\sqrt{5}} \equiv w\tau d \quad (18.23)$$

$$\tau d \equiv \frac{W - X_A}{V_s} \qquad (28.23a)$$

dreýfiň oblasty hökmünde kesgitläliň. Onda biz (28.22) aňlatmasyndan bu oblast. üçin impedansy kesgitläliň

$$Zd = \frac{\bar{V}d}{\tau A} = \frac{1}{WCd}\left[\frac{1}{1 - w^2 / w^2}\left(\frac{1 - \cos\}Öd}{Öd}\right)\right] + \frac{1}{wcd}\left[-1 + \frac{1}{1 - w\ \ / w^2}\left(\frac{\sin Öd}{Öd}\right)\right] = R +$$

(28.24) nirede, R we X –impendansyň aktiw we reaktiw komponentleri. Görnüşi ýaly impedansyň hakyky bölegi ýygylygyň ählisi üçin otrisatel bolar, diňe Öd we 2Пn, nirde n-bütin sandyr, onuň üçin “-” bolmazlygy mümkindir.

Aktiw garşylyk $W < W_r$ bolanda goşmandyr, emma ýygylyk peselende bolsa nola tarap ymtylýar:

$$R(W \leq \rightarrow o) = \frac{\tau d}{2Cd} = \frac{(W - X_A)^2}{2AC_S V_S}$$

Diodyň doly impendansy üznüksiz syrgyn akymly köpelmesine, dreýf oblastynyň we passiw oblastynyň R_s garşylygynyň jemlerine deňdir:

$$Z = \frac{(W - X_A)^2}{2A\varepsilon_S U_S}\left(\frac{1}{1 - w^2 / w^2}\right)\frac{1 - \cos Öd}{Ö^2 d / 2} + Rs + \frac{1}{wçd}\left[\left(\frac{\sin Öd}{Öd} - 1\right) - \left(\frac{Öd}{1-\right.\right.$$

(28.25)

deňleme ýörite az uçuş burçy Öd bolan ýagdaýy üçin amatly bolup ýazylandyr. Egerde Öd<П/4 bolanda, aňlatma şeýle görnüşine geler:

$$Z = \frac{(W - xA)2}{2A\vartheta sEs(1 - \omega 2 / \omega 2r)} + Rs + \frac{j}{\omega c}\left[\frac{1}{(\omega 2r / \omega 2) - 1}\right] \qquad (28.26)$$

nirde, $C=E_sA/W$ –birleşmäniň ähli oblastynyň sygymy. Bellemeli zat birinji goşulanlara (28.26 aňlatmadaky) aktiw garşylyk bolup, ol $\omega.\omega r$ bolanda elmydam aýyrmakdyr.

Üçünji goşulma-parallel rezonans zynjyryndaky garşylyk komponentiniň reaktiw garşylygydyr. Reaktiw garşylygy induktiw häsiýetli bolup, $\omega\angle\omega r$ we sygynlysy $\omega.\omega r$ bolan ýagdaýynda ýerliklidir.

Başgaça aýdylanda garşylyk otrisatel, diňe reaktiw komponentleriniň alamaty çalyşylandaky ýygylyklarda bolup bilýär. Impedansy düzüjileriň aktiw we reaktiw baglylygynyň ekwialent we ýygylyk çatgylary surat 9, в we g görkizilendir.

Z diod impedansy Y admittansony bilen aşakdaky baglanşykdadyr:

$$Z \equiv \frac{\nu}{\tau A} = R + jx = \frac{1}{G + jB} = \frac{1}{\nu} \ (28.27)$$

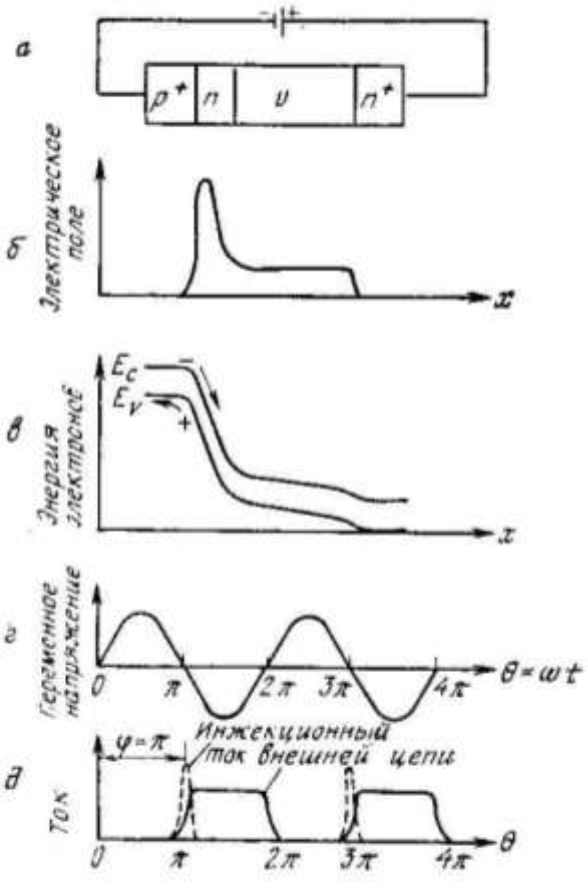
nirde G we B-admittansyň aktiw we reaktiw komponentleri. Bu diodlaryň birmeňzeş birleşme oblastlary bolup, olaryň üznüksiz akymdaky köpelme oblastynyň ini dürlidir (x_A/W=1/10, 1/3; ½; 2/3;

9/10, 1) . Üznüksiz akymly köpelmesiniň galyňlygy köpelende ýygylyk çägi giňelýär. Ridiň diody dar çäkdäki ýygylykda uly aýyrmak geçirijiliklidir. Tersine Misawy diodynyň otrisatel geçirijiligi (p-i-n diodyň $x_A/W=1$) has azdyr, ýöne ýygylyk möçberi, çägi uludyr we pes ýygylyklydyr.

9.3.3. Kuwwaty we peýdaly täsir koeffisiýenti

Uly signal režimindäki işi derňemek

Surat 28.4 Ridiň diodynyň uly signal režiminde işleýän häsiýetnamasy görkezilendir. Ýokary elektrik meýdany bilen üznüksiz akymly köpelmesi elektron-deşik jübti tarapyndan genizirlenip, ol p^+-n^- geçişiň golaýynda ýerleşendir. (Surat 28.4,b), emma gouşak legirlenen W-gatlygy bolsa birmeňzeş meýdanly dreýf oblastyny döredýär. Genirirlenen deşikler tizden p^+- oblastyna düşýär, emma genirirlenen elektronlar bolsa dreýf oblastynda inžektirlenýärler (surat 28.4,ç). Bu ýerde bolsa SUÇ (ÇAÝÝ) çenden aşa ýokary ýygylygynyň bölüp çykarýan kuwatyna deň işi edýär.
Şeýlelikde inžektirlenen äkidijileriniň konsentrasiýasynyň üýtgemegi üýtgeýän naprýaženiýa görä takmynan 90° deňlik. Ol ýokardaky (surat 28.4,d) çyzgyda görkezilendir. Elektrik meýdanynyň



28.4-nji surat. *Uly signal režiminde işlän mahalyndaky diodyň häsiýetnamasy.*

maksimumy П/2 faza laýykdyr, emma inžektirlenen äkidijileriniň uly bolmadyk gatyşygy- П fazasyny laýyk geler. Daşarky zynjyrda oýandyrylan elektrik togynyň şekili hem surat 28.4,d görkezilendir.
Diodyň ditalizirlenen häsiýetnamasyny uly signal režiminde işlänindäki gatnaşyk (27)-(29). Ol gatnaşyklaryň kömegi bilen we ýakynlaşdyrylan çäkli şertleriň üsti bilen almak bolar.

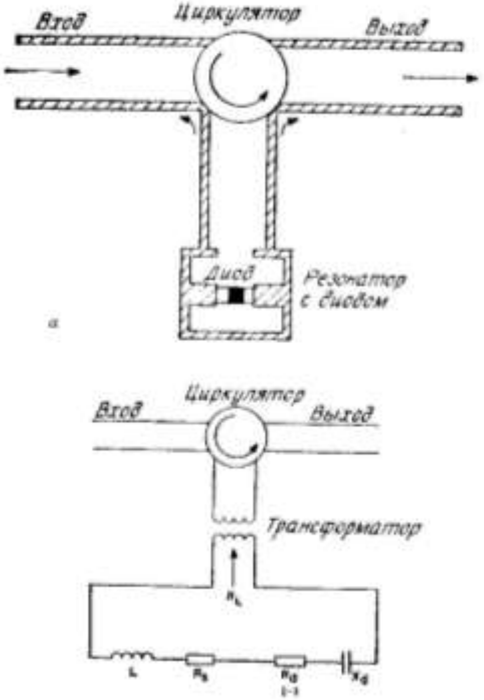
EHM-de hasaplanan elektrik meýdany elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy kremniý p^+-n-u-n^+ diodynyň birleşen oblastynyň x aralygyna belli bir wagtyň dowamynda dört döwür aralygyna bölünendir (haçanda $N_1=10^{16}sm^{-3}$, b=1mkm, $N_{2=10}{}^{15}sm^{-3}$ we W=6mkm).Belläniň
Elektronlaryň we deşikleriň generasiýasy maksimal güýjenmede başlar, emma impulsyň dörtden birinde zarýadyň impulslary doly döredilen bolup, olar dreýfiň degişli oblastlarynyň üsti bilen hereket edýärler; 2) deşik tizden aktiw oblasty taşlap, emma şol bir wagtda elektronlar takmynan ýarymperidyň dowamynda dreýflenýärler; 3) galan dörtden bir periodda galan elektronlar aktiw oblastdan çykarylýar; 4) süýşme togy ýeterlik uly we goşmakdyr ($p+^{11}$); 5) güýjenmäniň we togyň modulýasyýasynyň amplitudasy ulydyr, netijeligi ýokarydyr, egerde üznüksiz akymly syrgyn oblasty has giň bolan wagty. Diodyň zažimindäki güýjenmäniň we geçiş togynyň uçuş burça baglylygy surat 13 görkezilendir. Üýtgeýän togyň dürli ululyklaryndaky diodyň uly signal režimindäki reaktiw geçirijiligi we otrisatel aktiw geçirijiligi surat 14-de görkezilýär. Hasabyň netijesiniň görkeziji ýaly PTK (КПД) 18% çenli bolup biler. Bu baha edil eksperimental taýdan alynan kremniý syrgyn-uçuşly diodyň PTK (КПД) ýakyndyr. Ridiň modifisirlenen diodlarynda arsenid galliniň PTK 40% golaýdyr.

9.3.4. Syrgyn-uçuşly diodlardaky galmagallar

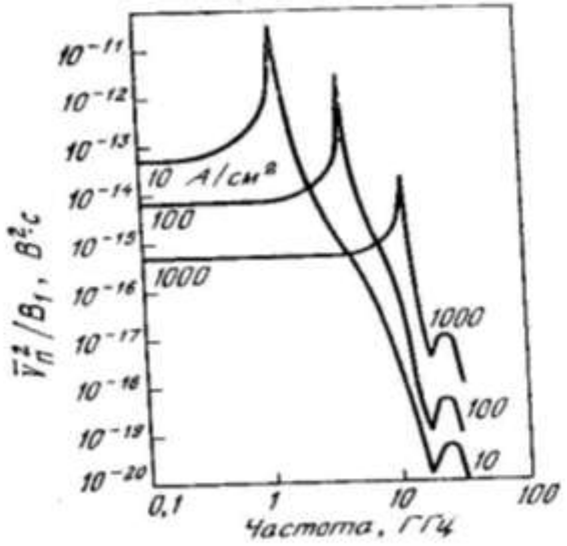
Syrgyn-uçuşly diodlardaky galmagallaryň esasy sebäbi syrgyn-uçuşyň köpelmäniň oblastyndaky elektron-deşik pajübütleriniň statiki generirlenme tebigatydyr. SWÇ-signalynyň minimal derejesini galmagallaryň kesgitleýänligi sebäpli, onuň köpelmegi mümkin bolup, syrgyn-uçuşly diodlaryndaky galmagallaryň teoriýasy örän wajyndyr.
Signaly güýçlendirmek üçin syrgyn-uçuşly diodyny geçiriji liniýa bilen bagly rezonatora ýerleşdirilýär.(surat 28.6, a). Surat 28.6, b az signally dernewde ulanylýan ekwiualent çatgysy görkezilendir. Aşakda biz iki häsiýetnamasy girizeliň:
Galmagalyň koeffisiýenti we galmagalyň gatnaşygy. Galmagalyň koeffisiýenti şeýle kesgitläliň:

$$NF=1+\frac{\text{Siziň çykyş kuwaty (güýçlendirijide döraýän)}}{\text{kuwatyň güýçlendiriş koeffisiýenti x (кToB1)}}=1+\frac{T2n\ Rl}{PgkToB1} \quad (28.28)$$

nirde P_G-kuwwatyň güýçlendiriji koeffisiýenti;



28.5-nji surat. *Rezonatora ýerleşdirilen SU diody (a). we ekwiwalent çatgysy (b).*



28.6-njy surat. *SU diody üçin zolagyň ininiň ýygylyga degişli galmagal V-niň orta kwadraty.*

R_L– ýüklenme garşylygy;
K-Bolsmanyň hemişeligi;
T_o=290 K; B-galmagal zolagy;
T_n^2 –diodyň galmagal togynyň orta kwadraty;
Galmagal gatnaşygy kesgitläliň:

$$M=\frac{V^2_n}{4KT_oGB'} \quad (28.29) \qquad \text{ýa-da} \qquad M=\frac{T^2_n}{4kT_o(-2real)B'} \quad (28.30)$$

nirde, G-admitransyň komponentiniň otrisatel hakykaty;
Z real-diodyň impedansynyň hakyky böligi;
V^2_n-galmagal güýjenmesiniň orta kwadraty;
Uly güýçlendirijili güýçlendirijidäki galmagal koeffisiýenti deňdir.

$\mathrm{N}F = 1 + \dfrac{\xi \nu \mathrm{A} / \kappa \mathrm{T} o}{\varphi \xi \xi \alpha \, (\varpi - \omega)}$ (28.31) nirde, $.\zeta$ - baglylyk dereje görkezijisi

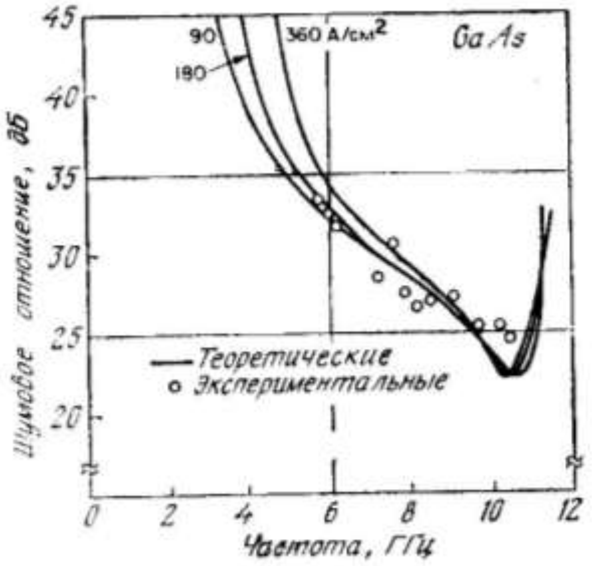
$\alpha \approx \xi, \tau \propto we \nu \propto$ – köpelme oblastynyň uçuş wagty; τr – rezonans ýygylygy. Egerde $\xi = 6$ (kremniý üçin) $\omega = 2\omega r$ we $\nu \mathrm{A} = 3\nu$ ýygylykdaky galmagal koeffisiýenti; f=10GGs hasap boýunça 11000 ýa-da 40,5 d/b deňdir.

Ionizirlemäniň dürli real ululyklarynda ($\alpha n \neq \alpha \rho$ kremniý üçin) pes ýygylyklardaky galmagal U-niň orta kwadraty şeýle görnüşde ýazylýär

$V^2 n = \dfrac{2\xi B1}{\tau A} \left(\dfrac{1 + W / xA}{\alpha 1} \right) \approx \dfrac{1}{\tau}$ (28.32) nirde, $\alpha 1 = d\alpha / d\xi$. Surat 28.6-da $\nu n / B$,

syrgyn-uçuşly kremniý diodynyň ýygylygyna baglylygy. $A=10^{-4}$ sm^2,W=5 mkm we x_A=1 mkm, baglylygy görkezilendir. (28.32) aňlatmasyndan görnüşi ýaly pes ýygylykda galmagal U-nyň orta kwadraty $V^{-2}n$ hemişelik toguň dykyzlygyna ters proporsionaldyr. Galmagalyň derejesiniň pes bolmagy mümkin bolup, ol wagt onuň az toklarda üznüksiz syrgyn ýygylykdan ýokarky ýygylyklarda işlemegi gerekdir.

28.7-nji suratda Arsenid galliýden edilen syrgyn-uçuşly diody üçin galmagal gatnaşygynyň tipli teoretik we eksperimental alynan baglylygy görkezilendir.



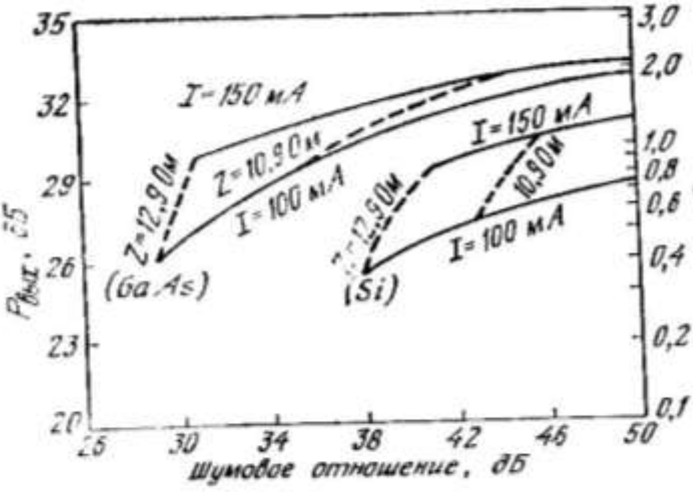
28.7-nji surat. *Uçuş ýygylygy 6 GGs bolan GaAs-syrgyn uçuşly diod üçin galmagallaryň gatnaşygy.*

Aralyk 6 GGs ýygylykda galmagal gatnaşygy takmynan 32 dB deňdir,maksimal galmagal gatnaşygy bolsa 22 dB, bolsa aralyk ýygylygyndan iki esse ýokarydyr. Arsehid-galliý syrgyn-uçuşly diodlary üçin galmagal gatnaşygy kremniý diodlarynyňkydan has pes.

GaAS-syrgyn-uçuşly diodlarynda galmagalyň derejesiniň pes bolmagynyň sebäbi, elektrik meýdanynyň berilen dartgynlygynda elektronlaryň we deşikleriň ionizirlenme koeffisiýenti arserid galliýde birdir-meňzeşdir, emma şol wagt kremniýde olar has tapawutlydyr.

Syrgyn köpelme integralyny ulanyp köpelmäniň uly koeffisiýentini almak üçin (M) ionizirlemäniň orta uzynlygy 1/<2> takmynan x_a-köpelmesiniň gatlygynyň inine deň bolmalydyr, egerde $\alpha_{n=}$ $\alpha_{p,}$ we X_A/lnM, $\alpha_n >> \alpha_{p;}$

28.7-nji suratda çykyş kuwwatynyň 6 GGs ýygylykdaky GaAs – syrgyn-uçuşly diody üçin galmagally gatnaşygyna 1mWt, ýagny 10 log (P*10^3) dB bolup, ol ýerde P kuwwaty Wt aňladylýar.



28.8-nji surat. *Sinhron fazaly generator üçin çykyş kuwwatynyň galmagallaryň gatnaşygyna baglylygy.*

Gözenek 2. Syrgyn-uçuşly diodlary üçin galmagal gatnaşygy.

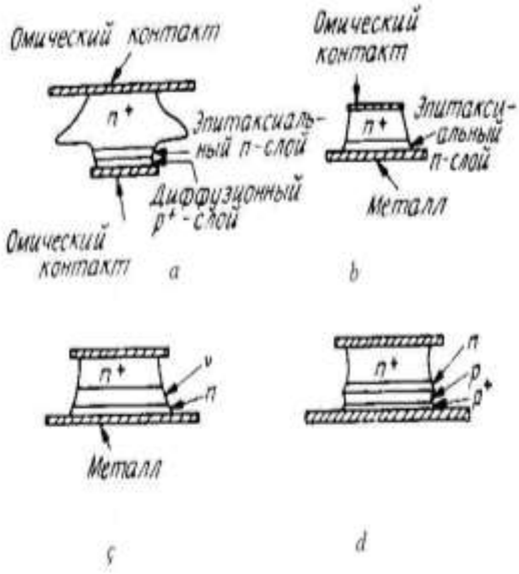
Ýarymgeçirijiler	Gi	Si	GaAs
Az signal režimindäki galmagal baglylyk, d/b ---	30	30	25
Uly signal režimindäki galmagal baglylyk, d/b ---	40	55	35

Diodlar belli bir ýygylyga sazlanan koaksial rezonatoryna ýerleşdirilip onuň ýüklenmesi impedans transtormatory arkaly üýtgelip duruldy. Maksimal çykyş kuwatlylygynda galmagal gatnaşygy örän azdyr.

9.3.5. Diodyň taýýarlanylşy

Ýokardaky aýdylan zatlara esaslanyp, syrgyn-uçuşly diodlary şeýle taýýarlanyp, olaryň çykyş kuwatlylygy we PTK mümkin boldagyça maksimal bolmalydyr. 28.9-njy suratda-da has güýçli syrgyn-uçuşly diodlaryň düzümleri görkezilendir. 28.9, a diodyň düzümi görkezilşi

ýaly ikilik epitaksiýa ýa-da epitaksial gatlygyna diffuziýanyň kömegi bilen alynýar. Yzygiderli garşylygy peseltmek üçin n^*-podložkasy ulanylýar. Epitaksial gatlagynyň galynlygyny barlap durmaly, ýokary ýygylykda işlenende, hatda n^*-görnüşli podložka hem diýseň ýuka bolmaly. 28.9-njy suratda, b syrgyn-uçuşly diodynyň Şoffki barýerli görkizilendir. Ol göneldiji kontakt metal-ýarymgeçirijidir. Şoffki barýerli diodynyň artykmaçlyklary: 1) elektrik meýdanynyň dartgynlygy bölünişiň metallurg çäginde maksimaldyr, şonuň üçin bölünip çykýan ýygylyk metal kontaktynyň üsti bilen aýrylýar.



28.9-njy surat. *Birnäçe syrgyn-uçuşly diodynyň düzümi.*

a- diffuziýa ýa-da ikilik epitaksiýa arkaly döredilen diod

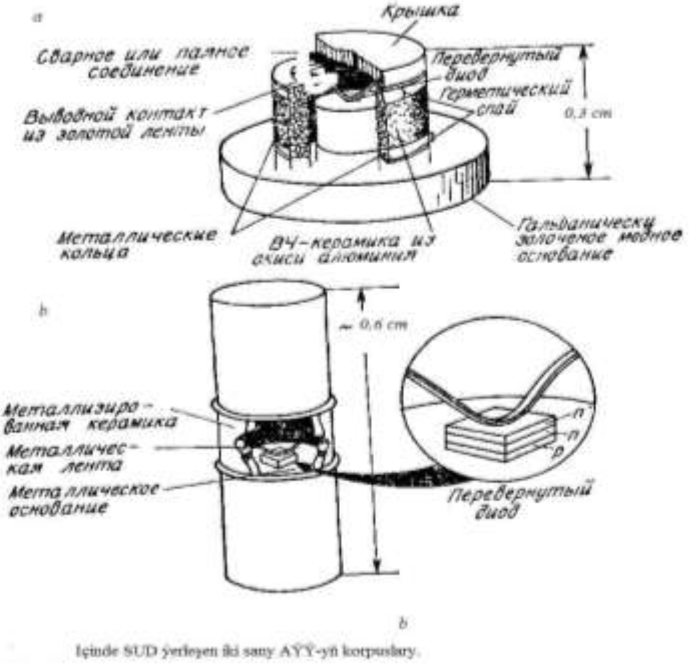
b- Şottki barýeri

c- iki gatlakly bazaly diod

d- dreýfi iki oblastly diod

Diod kesilen konus şekilinde hem taýýarlanyp biliner. Ýöne şeýle diodlaryň kemçiligi hem köpdür. Ýokary energiýanyň elektronlarynyň we deşikleriniň bar wagty ýarymgeçirijiniň atomy metala himiki taýdan täsir edip, kontaktyň häsiýetini zaýalaýar.

Şottki barýerinde esasy orny äkidijileriň tutýandygy bolsa, esasy däl äkidijileriň effekti örän azdyk, emma onuň PTK (КПД) has ýokary hem bolup biler. Ridiň modifizirlenen diody taýýarlananda garyntgynyň düzümine has üns bermeli. Taýarlanan diod SUÇ göwresinde ýygnalýar. Iki sany meňdeş gowu surat 28.10-da görkezilendir. Iki ýagdaýda diod diffuziýa oblasty tarapyndan berklenilýär ýa-da bolmasa mis ýa-da almaz ýylylyk çyzaryjysyna metal elektrony arkaly pugtalanýar. Bu bolsa, iş wagtynda gerekli netijeleri atmaklygy üpjün edýär.



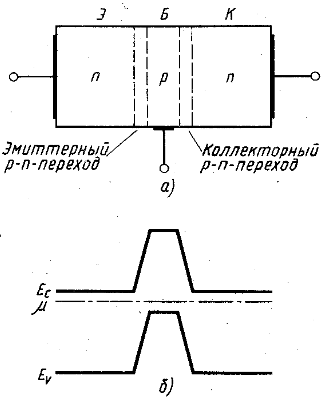
28.10-njy surat. *SUD-ly SWÇ korpuslary.*

10-njy bap. Tranzistorlar

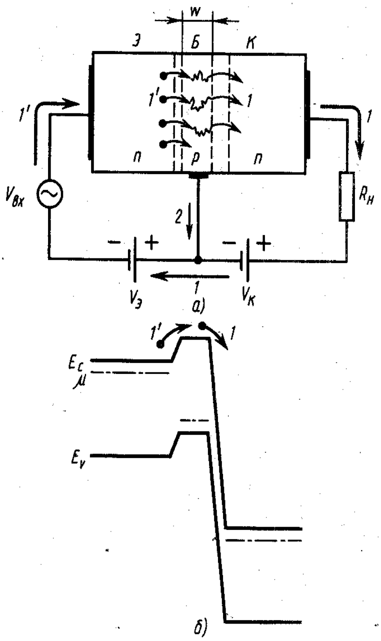
10.1. Tranzistorlaryň işleýşiniň fiziki prinsipi

Ýarymgeçirijiler elektronikasynyň esasy we has wajyp ülüşleriniň biri tranzistor bolup, bu gaty jisimleriň esasyndaky enjamdyr. Ol elektrik signalyny güýçlendirmäge, elektrik çeşmesiniň energiýasyny elektromagnit yrgyldysina öwwürmeklige (elektrik yrgyldysyny generirlemeklige), elektrik zynjiryny çalt aýryp çatmaklyga niýetlenen pribordyr. Şu günki gün tranzistorlar elektron hasaplaýyş maşynlarynyn, aragatnaşyk abzallarynyň hem-de hojalyk elektron apparatlarynyň gaýra goýulmasyz bölegidir. Bipolýar tranzistorlar 1947 ýylda oýlanylyp tapylgy. 1948 ýylda nokatlanç-galtaşma tranzistorlar işlenilip düzüldi. 1949 ýylda Bardin tekiz tranzistorlar hakda işi çapdan çykardy. 1952 ýylda p-n-geçişli meýdan tranzistory hödürlenildi, sönra izolirlenen zatworly meýdan tranzistory hödürlendi.

Bipolýar tranzistor iki sany bir-birine ýakyn (sepleşýän) p-n-geçişden durýar. öz gurluşi boýunça şeýle tranzistor p-n-p we n-p-n-görnüşde bolup bilýär. Mysal üçin, n-p-n-görnüşdeki tranzistora seredeliň (10.1a,б surat). Onüň energetiki diagrammasy deňagramlyk ýagdaýynda, ýagny daşky meýdanyň täsiri ýok wagtynda getirilen. Tranzistoryň orta bölegine baza diýilip (B) , oňa emitter (e) we kollektor (k) bölekleri sepleşýär.



10.1. Surat. n-p-n – tranzistoryň gurluşy (a) we energetiki diagrammasy (b).



Umumy baza shemasy boýuçna birleşdiliren tranzistoryň iş režimine seredeliň (19.2 surat). Emitter-baza geçişe göni ugra, baza-kollektor geçişe ters ugra elektrik meýdany berilýär. Elektrik meýdanynyň täsiri esasynda tranzistoryň emitter böleginden elektronlar, emitter-baza geçişiň peselen päsgelçiliginden geçip, baza tarap inžektirlenýär (10.2 surat, 1 çyzyk). Abaty diodlara meňzeş, daşky elektrik meýdanynyň naprýaženiýasy (U_{eb}) emitter-baza geçişiň göwrüm zarýadynda çökýär; U_{bk} - öz gezeginde kollektor geçişin göwrüm zarýadynda we daşky garşylykda çökýär. Şeýlelikde, bazada elektrik meýdany ýok diýen ýaly bolup, emitterden inžektirlenen elektronlar, bazadan kollektora tarap diffuziýa boýunça hereketlenýär.

10.2. Surat. Umumy baza zynjyrynda tranzistoryň işleýşi (a) we onuň iş şertlerinde energetiki diagrammasy (b).

Elektronlaryň konsentrasiýasy emitter geçişde, göwrümdäki deňagramlyk ýagdaýdaka seredende $\exp[eU_э/(kT)]$ gezek uludyr, emma ters meýdan berilen kollektor p-n-geçişde nola golaýdyr. Haçanda, trannzistoryň bazasynyň galyňlygy ϖ , elektronlaryň bazadaky diffuzion hereketiniň uzynlygyndan gaty keçi bolsa, onda elektronlar hiç ýitgisiz diýen ýaly emitterden baza-kollektor geçişe barýarlar.

Eger elektronlar ýylylyk haotiki hereket esasynda kollektor geçişiň göwrüm zarýadynyň meýdanyna girse, onda olar geçişiň gaty uly meýdany tarapyndan tranzistorlaryň

kollektoryna zyňylýar (10.2-surat, 1-strelka). Şeýlelikde, tranzistorlaryň emitter geçişiniň elektron togy (elektronlaryň akymy) I_{ne}, baza çykyşynyň üsti bilen geçmän, ilki kollektor çykyşyndan geçýär, soňra bolsa R garşylygyň üstünden geçýär. Trannzistoryň gurluş konstruksiýasy, emitter geçişden geçýän elektronlaryň diňe bir azyrak bölegi baza zynjyryna bölüner ýaly edilip ýörite düzülýär (10.2-surat, 2-çyzyk).

Trannzistorlary umumy baza zynjiry boýunça birikdermek, giriş naprýaženiýa seredeniňde çykyş zynjirda (R_n garşylykda) naprýaženiýanyň güýçlenmesine getirýär. Hakykatdanda giriş zynjirda naprýaženiýanyň (U_{gr}) gaty kiçi üýtgemesi , haçanda emitter geçişine göni ugra daşky elektrik meýdany berilende, emitter togynyň uly üýtgemesine getirýär. Eger-de emitter geçişde naprýaženiýa $kT/e \approx 25$ mV ululyga üýtgese, onda tok e gezek üýtgeýär.

Tranzistorlaryň parametleri we çykyş häsiýetnamalary.

Tok boýunça güýçlendirilme koeffisienti α tranzistoryň esasy häsiýetnamasy bolup, ol kollektor geçişinde hemişelik naprýaženiýada kollektor togunyň üýtgemesiniň bu üýtgemäni ýüze çykarýan emitter togunyň üýtgemesine bolan gatnaşygyny aňladýar (2a-surat; R_n=0).

$$\alpha = \left(\frac{\partial I_k}{\partial I_e} \right)_{Uk} \qquad (10.1)$$

α - koeffisiýente tranzistoryň daşky häsiýetnamasy diýilýär. Ol üç
samy içki häsiýetnamalar bilen kesgitlenilýär: emitteriň effektiwligi γ, geçiş koeffisiýenti β we kollektoryň effektiwligi α^*.

Emitteriň togy elektron (I_{ne}) we deşik (I_{pe}) düzumlerinden durýar. n-p-n-tranzistorlarda güýçlendirme effekti emitter togunyň elektron dýzýjisiniň esasynda ýerine ýetýär. Emitteriň effetiwligi γ

emitteriň umumy togunyň I_e üýtgemesiniň onuň elektron dýzýjisiniň
üýtgemisine gatnaşygyna deňdir:

$$\gamma = \left(\frac{\partial I_{ne}}{\partial I_e} \right)_{Uk} \qquad (10.2)$$

P-n-geçişden geçýan esasy we esasy däl zarýadlaryň akymyny göz öňunde tutulanda, umumy tok (önki temalarda getirilen):

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

(10.3)

P-n-geçişden geçýän umumy toguň formulasyny (10.3) we onuň elektron we deşik düzüjilerini göz öňüde tutup ýazýarys:

$$I_{p_e} = S_e e \frac{p_{n0}}{\tau_p} L_p \left\{ \exp\left[\frac{eU_e}{kT} \right] - 1 \right\} \approx$$

$$S_e e \frac{p_{n0}}{\tau_p} L_p \exp\left(\frac{eU_e}{kT} \right)$$

(10.4)

bu ýerde S_e - emitter geçişiň meýdany.

Zarýadyň diffuziýa aralygynyň $L = \sqrt{D\tau}$ - dygyndan peýdalanyp (10.4) deňligi şu göznüşde ýazyp bolýar.

$$I_{p_e} \approx S_e e D_p \frac{p_{n0}}{L_p} \exp\left(\frac{eU_e}{kT}\right)$$

(10.5)

Emitter togynyň elektron düzüjisiniň tapylyşy (10.4) formuladan tapawutlanýar. Sebäbi baradan emittere inžektirlenen deşikler p-n-geçişden L_p aralykda paýlanýan bolsalar, emitterden baza inžektirlenen elektronlar diňe bazada $\omega < L_n$ aralyga ýaýraýar (bu ýerde ω - tranzistoryň baza böleginiň galyňlygy). Bazada elektronlaryň hereketi diffuziýa häsiýetine eýeligi sebäpli, togyň elektron düzüjisiniň ululygy elektronlaryň konsentrasiýasynyň gradiýenti bilen kesgitlemilýär.

$$I_{ne} = S_e e D_n \left|\frac{dn}{dx}\right| \qquad (10.6)$$

bu erde x oky emitterden kollektora tarap urukdyrylandyr.

Bazadaky elektronlaryň konsentrasiýasynyň gradiýentini kesgitläliň. Emitter geçişde elektronlaryň konsentrasiýasy

$$n(o) = n_{p0} \exp\frac{eU_e}{kT} \qquad (10.7)$$

Kollektor geçişde $n(\omega)=0$ diýeliň.

Onda

$$\left|\frac{dn}{dx}\right| \approx \frac{n(0) - n(\omega)}{\omega} = \frac{n_{p0}}{\omega} \exp\frac{eU_e}{kT}$$

(10.8)

$\frac{dn}{dx}$-yň bahasyny (10.8) deňlikden (19.6) deňlige goýup alýarys.

$$I_{ne} = S_e e D_n \frac{n_{p0}}{\omega} \exp\frac{eU_e}{kT}$$

(10.9)

Emitter togynyň $I_e = I_{ne} + I_{pe}$ bolýandygyny göz önünde tutup, hem-de (10.2), (10.5) we (10.9) deňlikleri kombinirlemek esasynda emitterin effektowligi üçin deňligi alýarys:

$$\gamma = \left(1 + \frac{p_{n0}}{n_{p0}} \cdot \frac{D_p}{D_n} \cdot \frac{\omega}{L_p}\right)^{-1}$$

(10.10)

Diffuziýa koeffisiýentini Eýnşteýniň deňligine esaslanip zarýadyň hereket edijilik ukyby bilen çalyşsaň, massanyň saklanmak kanunyna esaslanyp esasy däl zarýadlaryň konsentrasiýasyny esasy zarýadlaryň konsentrasiýasynyň üsti bilen aňladyp, (10.10) deňligi amatly görnüşde ýazyp bolýar.

$$\gamma = \left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \cdot \frac{\omega}{L_p}\right)^{-1} \approx 1 - \frac{\sigma_p \omega}{\sigma_n L_p}$$

(10.11)

Tranzistoryň emitteriniň effektiwligini bire golaýlatmak üçin, (10.11) deňlikden görünişi ýaly emittere baza seredende has ýokary derejede garyndy gaşmaly ($\sigma_n >> \sigma_p$) we bazany gaty ýuka etmeli ($\omega << L_p$). Bazanyň ýuka bolmagy geçirijilik koeffisiýenti,

ýagny emitterden inžektirlenen elektronlaryň kollektor geçişe ýetýäniň snyny artdyrmak üçin hem wajypdyr:

$$\beta = \left(\frac{\partial I_{nk}}{\partial I_{ne}} \right)_{Uk} \qquad (10.12)$$

Bu koeffisiýent birden kiçi, sebäbi elektronlaryň bir bölegi kollektor geçişe ýetmän rekombinirlenýär. Baza bölegi näçe dar boldugyça bire golaýlaýar. Haçanda ($\omega<L_n$) bolan ýagdaýynda, hasaplamalara esaslanyp alýarys:

$$\beta \approx 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\omega}{L_n} \right)^2 \qquad (10.13)$$

Kollektoryň effektiwligi şeýle hasaplanyp:

$$\alpha^* = \left(\frac{\partial I_k}{\partial I_{nk}} \right)_{Uk} \qquad (10.14)$$

egerde kollektor p-n-geçisde urgy ionlaşmasy ýüze çykýan bolsa, α^* birden uly bolup biler.

Tranzistoryň adaty iş režiminde, haçanda $U_k << U_{bowS}$ bolanda, α^* ululygy bire ýakyndyr.

Şeýlelikde (10.1), (10.2), (10.12) we (10.13) denlemelerden

tranzistoryň güýçlen dirme koeffisiýenti α-ny tapýarys.

$$\alpha = \gamma \cdot \beta \cdot \alpha^* \qquad (10.15)$$

Bu deňlige γ we β-nyň bahalaryny (10.11) we (10.13) deňlikden alyp goýup, $\alpha^*=1$ diýip hasap edip, hem-de ikinji derejeli kiçi goşulyjilary hasaba alman, alýarys:

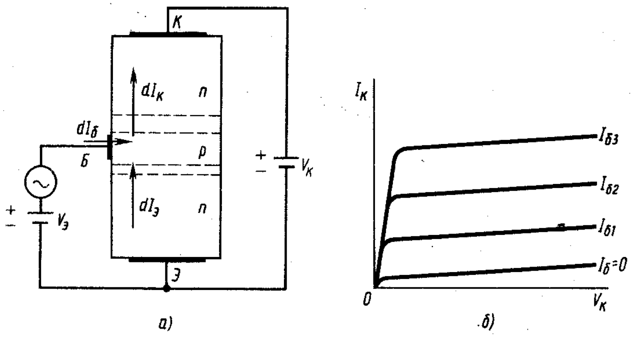
$$\alpha = 1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \cdot \frac{\omega}{L_p} - \frac{1}{2}\left(\frac{\omega}{L_n}\right)^2$$

(10.16)

(10.16) deňlikden görünişi ýaly tranzistor umumy baza boýunça birikdirilende togyň güýçlendirilmesi ýüze çykmaýar (α<1).

10.2. Tranzistorlaryň umumy emitter boýunça birleşdirilişi. Dreýf tranzistorlary

Köplenç tranzistor zynjira umumy emitter shemasy boýunça birikdirilýär (20.1-surat). Şeýle shemada tranzistor toguň güýçlendirijisi hökmünde işleýär. Bu ýerde geriş togy emitterden geçýän tok bolman, baza togudyr I_b. Baza, emitter we kollektor toklarynyň üýtgemeleri öz aralarynda aşakdaky gatnaşyk bilen baglanşýarlar.



20.1. Surat. Umumy emitter boýunça tranzistorlaryň birleşdirilişi (a)
we çykyş häsiýetnamalary (b).

$$dI_k = dI_e - dI_b \qquad (20.1)$$

Başgaça seredeniňde,

$$dI_k = \alpha \cdot dI_e \qquad (20.2)$$

(20.1) we (20.2) denlikleri kombinirlemek esasynda alýarys:

$$dI_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot dI_b = B_0 dI_b \qquad (20.3)$$

bu ýerde:

$$dI_k = \alpha \cdot dI_e = \alpha\left(dI_k + dI_b\right)$$

$$dI_k = \alpha \cdot dI_k + \alpha \cdot dI_b$$

$$dI_k - \alpha \cdot dI_k = \alpha \cdot dI_b$$

$$dI_k\left(1-\alpha\right) = \alpha \cdot dI_b$$

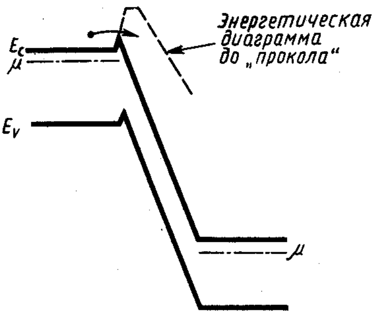
$$dI_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot dI_b = B_0 \cdot dI_b.$$

Bu ýerde B_0 - toguň güýçlendirilme koeffisiýenti, haçanda tranzistor umumy emitter boýunça birlişdirilende. Adaty ulanylýan tranzistorlar üçin $\alpha \approx 1$, onda $B_0 >> 1$. Meselim, ýokary hilli tranzistorlar üçin $\alpha = 0{,}995$ diýseň, onda (20.3) deňlige laýyklykda $B_0 = 200$.

Umumy emitter zynjyry boýunça birleşdirilen tranzistorda toguň güýçlendirilmesiniň fiziki tebigatyna seredeliň. Goý omiki sepleşikden baza birnäçe mukdarda Δp deşik geçsin. Olar emitter p-n-geçişiň potensial päsgelçiligini peseldýär we bu geçen deşikleriň zarýadyny kompensirlemek üçin emitterden $\Delta N = \Delta p$ elektron inžektirlenýär. Bu elektronlar haotiki hereket esasynda kollektor geçişe barýar we kollektor geçişiň meýdany tarapyndan dartylyp alynýar. Emitterden giden elektrona derek täze elektron gelýär. Şeýlelikde bu hadysa yzygider dowam etýär. Haçanda baza geçen deşikler ýuwaş-ýuwaşdan emitterden baza geçýän elektronlar bilen rekombinirlenen ýagdaýynda bu prosess

togtaýar. Şeýlelikde baza sepinden geçen her bir deşik, gaty köp elektrony emitter we kollektor sepinden geçmeklige mejbur edýär. Umuman aýdanda, her baza sepinden geçen deşik, emitter we kollektor geçişlerden birnäçe esse köp elektronlary geçmäge mejbur edýär. Umumy emitter zynjyry boýunça birikdirilen tranzistoryň çykyş häsiýetnamalary 20.1-suratda görkezilendir. Çyzgydan görünişi ýaly çykyş häsiýetnamalary umumy baza zynjyry boýunça birleşdirilen tranzistoryň kydan gaty uly gyşarandyr, sebäbi U_k artmagy bilen α-nyň gaty kiçi ululyga artmagy B_0-yň has köp artmasyna getirýär.

Kollektor p-n-geçişiniň böwsülmesi adaty diodyň böwsülmesi ýaly bolup geçýär. Ondan başgada, kollektor togunyň birbada artmasy, köplenç baza böleginiň öz garşylygyny ýitirmegi "bazanyň deşilmegi" netijesinde, haçan-da kollektor we emitter geçişleriň göwrüm zarýadlarynyň gatlaklary bir-birine birleşen ýagdaýynda ýüze çykyp bilýär. Bu ýagdaýda kollektor geçişinde naprýaženiýenyň münda buýana artmagy, emitter geçişinde potensial päsgelçiligiň peselmegine getirýär, şeýlelikde, emitterden kollektora tarap geçýän tok artýar (20.2 surat).



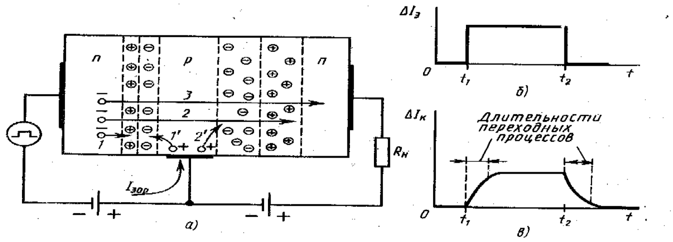
20.2. Surat. n-p-n – tranzistoryň baza "deşilen" ýagdaýyndaky energetiki diagrammasy.

Tranzistorlarda geçiş hadysalary. Dreýf tranzistorlary.

Umumy baza zynjyry boýunça birikdirilen n-p-n-tranzistorynda geçiş hadysalaryna seredeliň (20.3a-surat). Emitter geçişden toguň göniburçy impulsyny göýbereliň (20.3b-surat). Kollektor togynyň impulsy özüniň stasionar ýagdaýyna (bahasyna), bada-bat ýetmän, belli bir wagtdan soň ýetýär. Edil şoňa meňzeş, emitter togynyň impulsy gutarandan soň, kollektor togy birbada

peselmän, ýuwaş-ýuwaşdan peselýär. Geçiş hadysalarynyň dowamlylygy, emitter we kollektor p-n-geçişleriň päsgelşilik sygymlarynyň zarýatlanma we razrýatlanma wagty bilen hem-de emitterden inžektirlenen elektronyň diffuziýa esasynda bazadan geçiş wagty bilen kesgitlenýär.

20.3. Surat. Tranzistorlarda geçiş hadysalarynyň çyzgyda görkezilişi



(a); emitter togynyň impulsy ΔJ_e (б); kollektor togynyň impulsy ΔJ_k (в).

Emitter togynyň artmagy, emitter-baza p-n-geçişde göni ugra daşky elektrik meýdanynyň artmagy bilen ýüze çykyp, göwrüm zarýadynyň daralmagyna getirýär. Önden belli boluşy ýaly p-n-geçişeň göwrüm zarýadynyň galyňlygynyň daralmagy, p-n-geçişe tarap n-tarapdan elektronlaryň, p-tarapdan bolsa deşikleriň süýşmegi esasynda bolup geçýär (20.3 surat, 1, 1’ çyzyklar). Şeýlelikde, impulsyň başynda emitter togy, elektronlary p-n-geçişden inžektirlemäge harç bolman, p-n-geçişiň araçäginde göwrüm zarýadyny kompensirlemäge, başgaça aýdanyňde, emitter p-n-geçişiň näsgelçilik sygymyny zarýatlandyrmaga harç bolýar. Bu sygymyň zarýad wagty $R_{yzyg} \cdot C_{be}$, bu ýerde C_{be} - emitter p-n-geçişiň sygymy, R_{yzyg} - tranzistoryň emitter we baza bölekleriniň garşylygy, olara omiki sepleşmeleriň we emitteriň daşky zynjyrynyň garşylygy.

Tranzistoryň husysy yzygider garşylygy köplenç bazanyň garşylygyna deň diýilip alynýar, sebäbi barýer (päsgelçilik) sygymyny zarýadlandyrmak üçin, zarýad baza sepleşiginden baza böleginiň üsti bilen, emitter p-n-geçişe barýar (20.3a-surat).

Emitter p-n-geçişiň potensial päsgelçiliginiň beýikliginiň peselmegi bilen, tranzistoryň emitterinden, baza köp elektron geçip, kollektora tarap diffundirlenýär. Žarýadlaryň diffuziýasy

olaryň haotik hereketi bilen kesgitlenilip, olaryň käbiri kollektor p-n-geçije gaty çalt barsa, başga birnäçesi gaty haýal barýar. Şol sebapli hem, emitter togunyň inžeksiýasynyň bada-batlygyna seretmezden, kollektor togy ýuwaş-ýuwaşdan üýtgap, zarýadlaryň bazadan diffuziýasynyň ortaça wagty bilen kesgitlenilýär. Esasy däl zarýadlaryň τ ýaşaýyş wagtynda ortaça diffuziýa aralygyny L diýip hasap edip bazadan diffuziýa wagtyny hasaplalyň

$$L = \sqrt{D\tau}$$

Bu ýerden, ω aralyga elektronyň diffuziýa wagty,

$$t_{diff} = \frac{\omega^2}{D_n} \qquad (10.4)$$

haçanda $\omega << L_n$, onda $t_{diff} << \tau$.

Haçanda elektron kollektor p-n-geçişiň göwrüm zarýadynyň meýdanyna ýetenda, ol meýdan tarapyndan kollektor bölegine iteklenýär. Kollektora elektronyň geçmegi entek kollektorda ΔI_k toguň ýüze çykmagyny aňlatmaýar. Sebäbi toguň ΔI_k ululyga artmagy çykyş garşylygynda naprýaženiýany $R_k \Delta I_k$ ululyga artdyrýar hem kollektor p-n-geçişde daşky elektrik meýdany kiçelýär we göwrüm zarýadynyň giňligi daralýar. Bu kollektor p-n-geçişiden aşyrylan elektronlar daşky zynjyra geçmaň, p-n-geçişiň göwrüm zarýadyna galýar, şeýlelikde kollektor tarapyndan (n- tarapdan) göwrüm zarýadyny peseltýär. Baza tarapyndan göwrüm zarýady, baza sepinden gelýän deşikleriň hasabyna peselýär. Umuman kollektor geçişde zarýadyň üýtgemesi ΔQ deň bolar

$$\Delta Q = C_{bk} \cdot \Delta U_d = C_{bk} \cdot R_d \cdot \Delta I_k$$

(10.5)

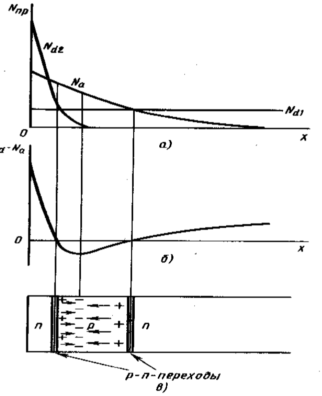
Zarýadyň üýtgemesi toguň ΔI_k üýtgemesi esasynda bolýanlygy sebäpli, belli bir wagtdan soň bolup geçer.

$$t_{zar} = \Delta Q / \Delta I_k = C_{bk} \cdot R_d$$

(10.6)

bu ýerde C_{bk} - kollektor p-n-geçişiň päsgelçilik sygyrny. Emitter togy, kollektor zynjyryndaky tok, togyň impulsy gutarandan soňra, emitter we kollektor p-n-geçişleriň päsgelçilik sygymlarynyň razrýad togynyň hem-de impulsyň dowam etýän wagtynda inžektirlenen zarýadlaryň kollektora toplanmaklarynyň hasabyna dowam etýär.

Geçiş hadysalarynyň dowamlylygy seredilen hadysalaryň iň köp wagt dowam etýäni bilen kesgitlenilýär. Köplenç bu hadysalaryň iň dowamlysy zarýadlaryň bazadan diffuziýa wagty bolýar (10.4). Bu wagty azaltmak üçin mümkin boldugyndan bazanyň galyňlygyny kiçeltmeli. Bazanyň galyňlygyndan başgada (10.4) deňlige esasy däl zarýadlaryň diffuziýa koeffisiýenti girýär - n-p-n-tranzistorda elektronlar, p-n-p- tranzistorda deşikler. Elektronlaryň deşiklere seredeniňde diffuziýa koeffisiýentiniň hiç bolmanda iki esse, käbir ýagdaýda bolsa 10÷20 esse köpligini göz öňünde tutsaň, onda deň şertlerde n-p-n-tranzistorlarda p-n-p-tranzistorlara seredeniňde utgaşma wagty kiçidir.



10.4. Surat. Dreýf tranzistorynyň gurluşy.

a – garyndylaryň koordinata boýunça paýlanyşy (x – üste görä aralyk; N_{d1} – donorlaryň ilkibaşky konsentrassiýasy; N_{d2}, N_a – üstden diffuziýa arkaly girizilen donorlaryň we akseptorlaryň konsentrassiýasy); б – kompensirlenmedik garyndylaryň konsentrassiýasy; в – zarýadyň paýlanyşy we garşylykly meýdan.

Tranzistorlarda utgaşma wagty, haçanda bazada «urukdyryjy» meýdan döredilinde has hem kiçelýär. Bu içki urukdyryjy meýdan emitterden kollektora hereket etýan zarýadlaryň tizligini artdyrýar. Şeýle meýdan köplenç tranzistorlaryň bazasynda garyndynyň konsentrasiýasyny koordinata boýunça üýtgedip alynýar.

Dreýf tranzistorynyň (n-p-n), emitter we baza bölegi n-tipli ýarymgeçiriji plastinasyna akseptor we donor garyndylarynyň diffuziýasy esasynda döredilýär (10.4 surat). 10.4b suratda dreýf tranzistorynda, kompensirlenmedik zarýadlaryň paýlanylyşy görkezilendir.

Zarýadlaryň şeýle paýlanylyşy, emitterden baza inžektirlenen zarýadlar üçin içki, bir ugra urukdyrylan täsiri bolan, meýdan döredip, zarýadlaryň geçiş tizligini artdyrýar.

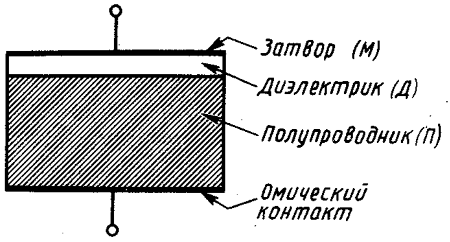
Tranzistorlar häzirki zaman elektronikasynda, radioelektronikada, mikroelektronikada, hasaplaýyş tehnikada giňden peýdalanylýar. Häzirki zaman tehnikasyny tranzistorsyz göz önüne getirmek mümkin däl.

3-NJI BÖLÜM
UNIPOLÝAR ABZALLARY

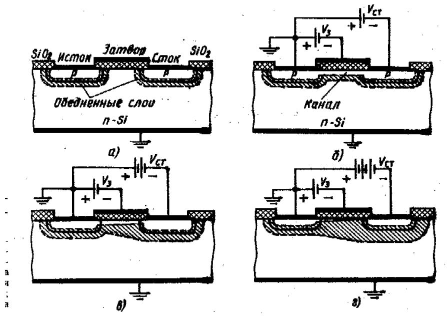
11-nji bap. Meýdan tranzistorlary

11.1. Meýdan (polewoý) tranzistorlary. Meýdan tranzistorlarynyň gurluşy we işleýiş prinsipi

Soňky ýyllarda elektronikada, ýarymgeçirijiniň üstki gatlagyndaky ýüze çykýan hadysalar ulanylýan abzallar (priborlar) giňden peýdalanylyp başlandy. Şeýle priborlaryň esasy düzüji bölegi metal-dielektrik-ýarymgeçiriji (MDÝ) gurluşlar (strukturlar) bolup durýar (21.1 surat). Köplenç metal bilen ýarymgeçirijiniň aralygyndaky dielektrik gatlagy hökmünde okisiň gatlagy, meselem SiO_2 ulanylýar. Şeýle strukturalara köplenç metal-okisel-ýarymgeçiriji (MOÝ) strukturalar diýilip at berilýär. Bu strukturalardaky metaliki elektrod köplenç wakuum tozanlatmasy esasynda dielektrigiň üstüne çökdürilýär. Bu elektroda zatwor diýlip at berilýär.

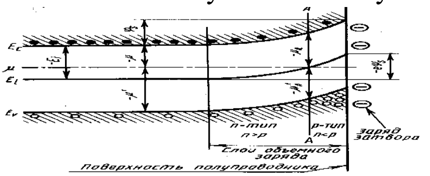


11.1. Surat. MDÝ-gurluşyň çyzgydaky görnüşi.



Eger-de zatwora ýarymgeçiriji plastinkasyna görä napryýaženiýe berilse, onda ýarymgeçirijiniň üstünde göwrüm zarýady gatlagy ýüze çykyp, onuň alamaty zatworyň alamatyna tersdir. Zatworyň ýakynyndaky gatlakda zarýatlaryň konsetrasiýasy ýarymgeçirijiniň göwrümindäkiden has tapawutlanýar.

Ýarymgeçirijide zarýatlanan üstki gatlak bilen göwrümiň arasynda potensiallaryň tapawudy ýüze çykyp, energetiki zonanyň gyşarmasyna getirýär. Haçanda zatwor otrisatel zarýatlansa zona ýokary gyşarýar, sebäbi elektronlar göwrümden üste tarap süýşende olaryň potensial energiýasy artýar (11.2-surat).



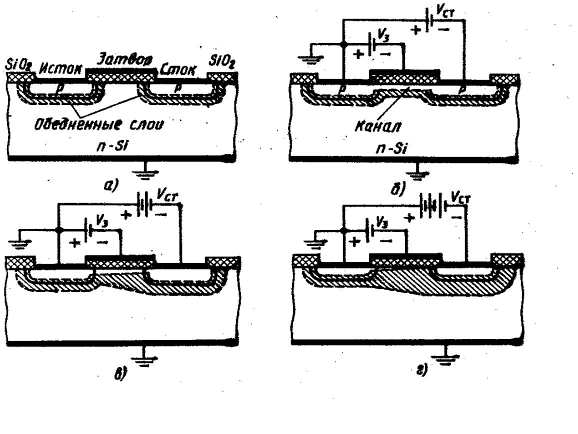
11.2. Surat. Zatwor otrisatel zarýatlanan ýagdaýynda n-görnüşli ýarymgeçirijiniň üstünde zonanyň egreýmesi (gyşarmasy)

Eger-de, zatwor položitel zarýtlanan bolsa onda, zona aşak gyşarýar. Suratda n-tipli ýarymgeçiriji haçanda zatwora otrisatel zarýad berilen ýagdaýynda görkezilen. Bu ýerde U_s - ýarymgeçirijiniň göwrümi bilen üstki gatlagynyň arasyndaky potensiallaryň tapawudy; $\varphi_s = -eU_s$ - zonanyň üstdäki egriligi; E_i - gadagan zonanyň ortasy. Suratdan görünişi ýaly ýarymgeçirijiniň göwrüminde Ferminiň derejesiniň geçiş zonanyň düýbinden uzaklygy, Ferminiň derejesiniň walent zonanyň depesinden uzaklygyndan kiçi. Şol sebäpli elektronlaryň konsentrasiýasy n_0 deşikleriň konsentrasiýasyndan p_0 köpdir $n_0>p_0$. N-tipli ýarymgeçiriji üçin şeýle hem bolmaly. Emma ýarymgeçirijiniň üstki gatlagynda onuň tersine, zonanyň egreýmesi sebäpli Ferminiň

derejesiniň geçiş zonanyň düýbinden uzaklygy onuň walent zonanyň depesinden üzaklygyndan ulydyr. Şol sebäpli hem $p_0>n_0$ -dan boýar, ýagny ýarymgeçiriji deşikli ýarymgeçirijä öwrülýär. Ýarymgeçirijiniň göwrüminde AA tekizlikde $n_0=p_0$ şert ýerine ýetýär we p-n-geçiş emele gelýär. Köplenç zonanyň üstki egreýmesini kT ululygyň üsti bilen aňlandylyp Y_s bilen bellenilýär.

$$Y_s = \frac{eU_s}{kT} = -\frac{\varphi_s}{kT} \qquad (11.1)$$

Ýarymgeçirijilerde üstki gatlagyň emele gelmeginde üç sany wajyp ýagdaý emele gelmegi mümkin: zarýad garyplaşmasy, alamatyny çalyşmak we zarýad bilen baýlaşmak. Bu üç ýagdaý hem ýarymgeçirijide zatwor bilen ýarymgeçirijiniň arasyndaky meýdana baglylykda ýüze çykyp bilýär. Eger-de üst gatlakdaky ýarymgeçiriji gowy geçirijilige eýe bolup onuň tipi ýarymgeçirijiniň tipine ters bolsa onda oňa alamaty çalşylan gatlak, ýa-da (inwersnyý) diýilip at berilýär. Inwersnyý gatlakdan ýarymgeçirijiniň göwrümine çuňlaşsaň zarýad boýunça garyplaşan gatlak başlaýar.

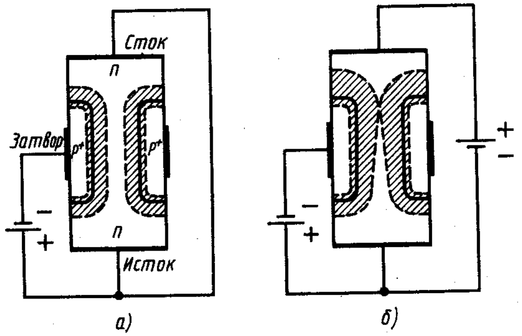


11.3. Surat. MDÝ-tranzistoryň işleýşine düşündiriş: a – MDÝ-tranzistoryň gurluşy; б – istok bilen stokyň arasynda kanalyň emele gelişi; в – istok bilen stokyň arasynda napryaženiýanyň artmagy bilen kanalyň kiçelmegi; г – kanalyň ýanylmagy.

Integral elektronikasynda MDÝ-strukturalar tranzistorlary, dürli integral mikroshemalary döretmekde giňden peýdalanylýar. 11.3a-suratda izolirlenen zatworly MDÝ-tranzistoryň gurluşy shematiki görkezilen. Tranzistoryň esasy bölegi n-Si bolup, ýokarky gatlagynda diffuziýa bilen p-tipli bölümler döredilen. P-tipli bölümleriň birine istok beýlekisene stok diýilip at berilýär. Bu iki bölegiň aralygy ýagny istok bilen stokyň aralygy metal gatlak bilen örtilen metal gatlak bilen örtilen okis gatlagy bilen izolirlenen. Tranzistoryň bu metal elektrodyna zatwor diýilip at berilýär. Tranzistoryň n- we p-böleklериniň arasynda istok we stok p-n-geçişi ýüze çykýar. 11.3b suratda meýdan tranzistorynyň zynjyra birikdirlişi görkezilen: stok naprýaženiýasynyň U_{st}, istoka položitel polýusy we stoka - otrisatel polýusy birikdirilen. Zatwora U_{zat} tok çeşmesiniň minus polýarnosty birikdirilýär.

Haçanda zatwora naprýaženiýa berilmedik ýagdaýynda, tranzistorda hiç hili üýtgeşiklik bolmaýar. Sebäbi stok p-n-geçişine ters ugra elektrik meýdany berilip, istok bilen stokyň arasynda gaty yly garşylyk ýüze çykýar. Zatwora otrisatel elektrik meýdanynyň berilmegi ilki bilen zatworyň aşak tarapynda (ýarymgeçirijiniň üstki gatlagynda) garyplaşan zarýadly meýdany emele getirýär, käbir U_{porog} naprýaženiýadaň soňra inwersni p-zolak (kanal) emele gelip, şeýlelikde p-tipli istok we stok geçiriji kanal bilen birleşdirýär. Egerde zatworda naprýaženiýa $U_{z.por}$-dan uly bolsa onda kanal giňelýär, stok bilen istokyň aralygyndaky garşylyk kiçelýär. Şeýlelikde seredilýän struktura, daşdan gönükdirilýan (uprawlýaýemyý) rezistora meňzeş bolýar.

Emma, diňe stok naprýaženiýasynyň kiçi bahalarynda kanalyň garşylygy dine zatwordaky naprýaženiýasy bilen kesgitlenilýär. Kanal boýunça istokdan stoga çenli aralykda erkin zarýatlaryň sany azalýar, şol sebäpli hem, togyň birmeňzeş ululygyny kanalyň hemme ýerinde saklamak üçin, elektrik meýdany üýtgäp, stogyň ýakynynda iň uly bahasyna ýetmeli. Haçan-da kanal doly ýapylanda hem stogyň naprýaženiýasynyň uly bahasynda käbir uly bolmadyk istok-stok geçiş dowam etýär. Sebäbi kanal gysgalyp, zarýadyň garyplaşan ýeriniň gapdaly bilen stoka tarap zarýadlar çekilip bilinýär.



11.4. Surat. Dolandyryjy p-n-geçişli meýdan tranzistorlarynyň işleýşine düşündiriş.

a – stokdaky meýdan nol bolan ýagdaýynda; b – stokdaky meýdanyň artmagy bilen kanal ýapylan ýagdaýynda.

Unipolýar tranzistorlaryň ýene bir görnüşi uprawlýaýuşiý p-n-geçişli meýdan tranzistorydyr (11.4 surat). Bu tranzistorlarda geçiş kanaly esasy ýarymgeçirijide p-n-geçişleriň garyplaşan zarýatly bölekleriniň arasynda emele gelýär. Bu aralykda emele gelen kanalyň giňligini p-n-geçişe ters ugra naprýaženiýa berip üýtgetmek mümkin. Berilen daşky naprýaženiýa bglylyka stok-istok aralykdaky garşylyk üýtgeýär. Eger-de p-n-geçişiň hemişelik naprýaženiýasynda istok-stok naprýaženiýa artsa, onda stoka ýakynlasdygyňça kanal daralyp, tok haýal üýtgeýär. Haçanda kanal ýapylsa tok doýgyn ýagdaýyna ýetýär. Şeýle tranzistoryň kanalyndan togyň akyş mehanizimi we çykyş häsiýetnamalary MDÝ-tranzistoryňka gaty meňzeşdir.

11.2. Metal-okisel-ýarym geçiriji (MOÝ) tranzistorlary

Metal - okisel - ýarymgeçiriji (MOÝ- tranzistor) strukturaly meýdan **tranzistor häzirki wagtda mikroprosessorlarda we ýarymgeçiriji ýatda saklaýan** gurluşlarda, aşa uly integral çatgylaryň (AUIÇ) esasy elementi bolup durýar. Soňky wagtda olar kuwwatly geçiş çatgylarda giňden ulanyşa

eýedir. Üst meýdan tranzistoryň işleýiş prinsipini ilkinji gezek 1930 - njy ýylyň başynda *Liliýenfeld Heýman* öwrendiler.we *Heýl* tarapyndan hödürlendi. 1940 - njy ýylyň ahyrynda bu abzallaryň işleýiş teoriýasyny *Şokli* we *Pirson* ösdürdiler. 1960 - njy ýylda *Kang* we *Atalla* termiki okislenmäni ulanyp, birinji kremniý MOÝ - tranzistoryny taýýarladylar. MOÝ - tranzistorynyň esasy häsiýetnamalaryny soňra *Ihantola, Moll, Sa, Hofşteýin* we

MOÝ - tranzistorlarda tok esasan diňe bir tipli zarýady äkidijiler bilen geçirilýänligi sebäpli (meselem, n- kanally abzallarda elektronlar bilen), MOÝ - tranzistory unipolýar abzallaryň klasyna degişli. Häzirki wagtda dürli ýarymgeçiriji materiallarda, Ge, Si we $GaAs$, dürli elektrik gatlaklary ulanmak bilen ýasalan MOÝ tranzistorlar bellidir. $Si-SiO_2$ MOÝ tranzistorlary has köp ýaýrandyr.

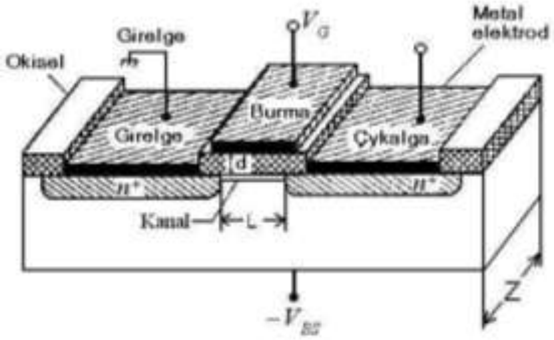
Ilki biz adaty, ýagny uzyn kanally MOÝ tranzistorlaryň esasy häsiýetnamalaryna serederis. Olarda kanalyň uzynlygy L çykalganyň we girelgäniň birleşdirilen gatlaklarynyň galyňlygynyň jeminden esli ýokarydyr ($W_S + W_D$). Bu şeýle hem $L \leq (W_S + W_D)$ deň gysga kanally abzallaryň işini düşünmäge kömek eder.

Esasy häsiýetnamalary.

Metal - okisel - ýarymgeçiriji (MOÝ tranzistorlar) meýdan tranzistoryň esasy strukturasy 22.1 - nji suratda görkezilen. Bu dörtpolýusly abzal p - tipli ýarymgeçiriji esasdan durýar. Onda iki ýokarylegirlenen n^+ - oblast - girelge we çykalga (meselem, ion implantasiýasynyň kömegi bilen) formirlenen. Esasdan okis gatlagy arkaly aýyrylan metal elektroda ***burma*** diýilýär. Soňky wagtda burma höküminde ýokarylegirlenen polikremniý, şeýle hem polikremniýniň we silisidleriň käbir kombinasiýalary ulanylýar. Strukturanyň esasy parametrleri kanalyň uzynlygy L - girelgäniň

we çykalganyň n^{+} - p - geçişli metallurgiki serhetleriň arasyndaky uzaklyk, kanalyň giňligi Z, izalýator gatlagyň galyňlygy d, geçişleriň çuňlugy r_i we esasyň legirlenme derejesi N_A bolup durýar. Kremniý integral çatgylarda aýratyn MOÝ tranzistor okiseliň galyň gatlagy oblast bilen, izolirleme maksatlary bilen gurşalan. Ol ***passiwirleýji*** ýa - da ***meýdan*** (burma asty okiseliň inçe gatlagyndan tapawutlylykda) diýip atlandyrylýar.

Abzalyň işine seredip, biz ähli naprýaženiýeleri girelgäniň potensialyndan hasaplaýarys, ýagny ony zeminleşdirilen hasaplarys. Burmada naprýaženiýeniň ýok wagty girelge - çykalga elektrik zynjyr biri - birine tarap ugrukdyrylan iki n^{+} - p - geçiş bolup durýar. Bu ýagdaýda ondan ters naprýaženiýe geçişli ýitgi toguna deň örän az tok akyp biler. Eger - de burma ýeterlik uly požitel naprýaženiýe berlen bolsa dielektrik bilen serhetde girelgäniň we çykalganyň n^{+} - oblastyny birleşdirýän ***inwersion gatlak*** ýa-da ***kanal*** emele gelýär. Bu inwersion kanalyň geçirijiligi burmada naprýaženiýe üýtgände modulirlenýär. Esasa bolan yzky kontakt girelgäniň ýerleşýän şol bir direg potensialyň astynda ýa - da girelge - esas n^{+} - p - geçişiň ters garyşmasyna laýyk naprýaženiýe astynda bolup biler. Esasyň ters garyşmasynyň naprýaženiýesi inwersion kanalyň geçirijiligine täsir edýär.



Surat 11.1. MOÝ tranzistoryň struktura çatgysy

Deňagramly däl şertleri.

Tranzistoryň girelgesiniň we çykalgasynyň arasyna naprýaženiýe goýlanda, MOÝ struktura deňagramly däl şertlerde bolýar. Bu ýerde esasy däl zarýady äkidijileriň Fermi kwazirerejesi (berlen ýagdaýda elektronlaryň) Ferminiň deňagramly derejesinden aşakda bolýar. 22.2- nji suratda MOÝ tranzistoryň dürli iş rejesine laýyk gelýän ikiölçegli zona diagrammalary getirilen, ol amatlylyk üçin 90^0 öwürilen (surat 22.2 a).22.2 - nji b suratdaky zona çatgy deňagramlylyk şertlerine (V_D=0), esasda (V_{BS}=0) ters naprýaženiýeniň ýoklugy we burmada nul naprýaženiýe (V_G=0, tekiz zonalar) gabat gelýär. 22.2- nji w suratda bölegiň inwertirlenen serhedi (V_G>0) bilen deňagramly ýagdaý görkezilen. Burma we çykalga položitel naprýaženiýe berilendäki deňagramly däl ýagdaý 22.2 - nji g suratda görkezilen. Ştrih çyzyklar bilen deşik we elektron Fermi kwazirerejeleri görkezilen. Şol wagtda Ferminiň deşik

kwaziderejesi E_{Fp} koordinata bagly däl (esasyň göwrüminde Ferminiň deňagramly derejesine deň bolýar), Ferminiň elektron kwaziderejesi E_{Fn} çykalga golaýlaşdygyça kiçelýär. 22.2 - nji g suratda deňagramly däl şertlerde, çykalganyň golaýynda üsti inwertirlemek üçin $\Psi_0(inv) \simeq 2\psi_B$ bolanda deňagramly ýagdaýa garanyňda burmada köp napryaženiýe gerek bolýandygy görünýär. Bu çykalgada napryaženiýe Ferminiň elektron kwaziderejesini peseltýänligi bilen şertlenendir. Üstde inwersion gatlak E_+ energiýanyň hususy derejesinden hasaplanan üst potensial esasy däl zarýady äkidijileriň Fermi kwaziderejesini kesip geçen halatynda emele gelip bilýär.

Birinji ýagdaýda inwersiýada garyplaşan oblastyň galyňlygy özüniň maksimal deňagramly bahasyna W_m ýetýär. Deňagramly däl ýagdaýda garyplaşan gatlagyň galyňlygy V_D çykalgadaky napryaženiýe bagly. Güýçli inwersiýanyň başyna laýyk gelýän üst potensial ýeterlik takyklyk derejesi bilen

$$\psi_s(inv) \simeq V_D + 2\psi_B \qquad (22.3.1)$$

deň diýip hasaplamak bolar.

Inwersion gatlagyň zarýadynyň, garyplaşan oblastyň zarýadynyň we burmada napryaženiýeniň arasyndaky arabaglanşygy deňagramly däl ýagdaý üçin deňagramly ýagdaýdaky ýaly çykarylýar. Munda ýene iki sany goşmaça çaklama ulanylýar: 1) esasy we esasy däl zarýady äkidijileriň Fermi kwaziderejesi bölekleriň serhedine çenli aralyga bagly däl; 2) bu kwaziderejeleriň arasyndaky tapawut çykalga geçişindäki napryaženiýa deň, ýagny $E_{Fp} = E_{Fn} + qV_D$ (p - esas üçin). Inwersiýa şertlerinde birinji çaklama ähmiýetsiz ýalňyşlyklara getirýär. Sebäbi bu ýagdaýda esasy zarýady äkidijileriň zarýady üst gatlagynda doly

giňişlik zarýadynyň az bölegini düzýär. Ikinji çaklama diňe güýçli inwersiýa şertlerinde dogrydyr. Inwersion gatlagyň zarýady ýarymgeçiriji esasyň üst oblastynyň doly zarýadynyň agramly bölegini düzende.

Bu çaklamalara esaslanyp, p esasyň çykalga ymtylýan böleginde giňişlik zarýadynyň oblasty üçin Puassonyň bir ölçegli deňlemesini

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{E_s}(N_D^+ - N_A^- + p - n),$$

(22.3.2)

görnüşde ýazalyň. Bu ýerde

$$N_D^+ - N_A^- = n_{po} - p_{po}, \qquad p_{po} \approx N_A,$$

$$p = p_{po} e^{-\beta\psi},$$

ýöne

$$n = n_{po} e^{\beta\psi - \beta V_D}, \qquad \beta \equiv q / kT.$$

(22.3.3)

Bu ýerden

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial \psi}{dx} = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F\left(\beta\psi, V_D, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$$

(22.3.4)

we

$$Q_s = -\varepsilon_s \mathcal{E}_s = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F\left(\beta\psi, V_D, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right),$$

(22.3.5)

Bu ýerde

$$F(\beta\psi, V_D, \frac{n_{po}}{p_{po}}) \equiv$$

$$\equiv \left[e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1 + \frac{n_{po}}{p_{po}} e^{-\beta V_D} (e^{\beta\psi} - \beta\psi e^{\beta V_D} - 1 \right]^{1/2},$$

(22.3.6)

$$L_D \equiv \left(\frac{kT\varepsilon_s}{p_{po} q^2} \right)^{1/2}.$$

(22.3.7)

Güýçli inwersiýa rejesinde doly üst zarýad (1.1.5) aşakdaky görnüşde getirmek bolar

$$Q_s = Q_n + Q_B$$

(22.3.8)

bu ýerde

$$Q_B = -qN_A W_m = -\sqrt{2qN_A \varepsilon_s (V_D + 2\psi_{B)}}$$

(22.3.9)

we Q_n zarýad, inwersion gatlakda esasy däl zarýady äkidijiler bilen şertlenen:

$$\left|Q_n\right| \equiv q\int_0^{x_i} n(x)dx = q\int_{\psi_s}^{\psi_B} \frac{n(\psi)d\psi}{d\psi/dx},$$

(22.3.10)

$$\left|Q_n\right| = q\int_{\psi_s}^{\psi_B} \frac{n_{po}e^{(\beta\psi-\beta V_D)}d\psi}{(\sqrt{2}kT/qL_D)F(\beta\psi, V_D, n_{po}/p_{po})}.$$

(22.3.11)

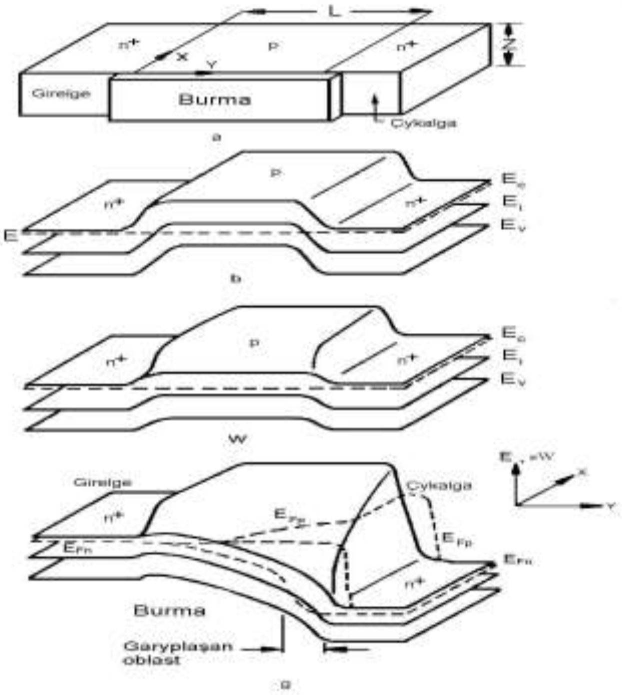
Bu ýerde x_i - nokat, onda Ferminiň hususy derejesi elektronlaryň esasy däl zarýady äkidijileriň Fermi kwaziderejesini kesip geçýär. Kremniýniň legirlenmek derejesiniň tejribede ulanylýany üçin x_i ululyk (30-300 A) örän kiçi. (22.3.11) aňlatma uzyn kanally MOÝ tranzistorlar teoriýasynyň esasy gatnaşyklaryň biri bolup durýar we takyk ýagdaýlarda bu baglylyk $Q_n(\psi_s)$ san usullary bilen hasaplanylýar. Q_n üçin has ýönekeý we laýyk aňlatma, örän güýçli inwersiýada adalatly, zarýatlanan gatlaklaryň ***modeli*** diýip atlandyrylýan bolýar:

$$\left|Q_n\right| = \sqrt{2}qN_AL_D\left\{\left[\beta\psi_s + \left(\frac{n_{po}}{p_{po}}\right)e^{(\beta\psi_s-\beta V_D)}\right]^{1/2} - (\beta\psi\right.$$

(22.3.12)

Q_n üçin (22.3.11) we (22.3.12) aňlatma esasda ters napryýaženiýe ýok ($V_{BS} =$ 0) ýagdaý üçin çykarylan. Şeýle

naprýaženiýeniň barlygynda Q_n-iň hasabynda (22.3.12) formulada βV_D deregine $\beta(V_D + V_{BS})$ goýmak gerek.



Surat 11.2. n - kanally MOÝ tranzistoryň ikiölçegli zona diagrammasy

Häsiýetnamalaryň çyzykly oblastlary.

Ilki bilen MOÝ tranzistoryň işine seredip geçeliň. G strukturanyň burmasynda naprýaženiýe okisel bilen serhetde güýçli inwersiýa üçin ýeterlik diýip hasaplalyň. Onda, eger V_D çykalgada

napryaženiýe örän uly bolmasa, inwersion gatlak adaty garşylyk ýaly hereket edýär we I_D geçiriji inwersion kanaldan geçýän tok V_D çykalganyň napryaženiýesine proporsional ýokarlanar. Bu oblast abzalyň işiniň ***çyzykly oblasty*** diýip atlandyrylýar. Çykalgada napryaženiýeniň ýokarlanmagy bilen x_i kanalyň giňligi, diýmek $y=L$ (çykalganyň serhedinde) nokatda Q_n inwersion gatlagyň zaryady nula deň bolanda momende ýetirilýär. Bu şertler kanalyň egrelme rejesiniň başyna laýyk gelýär. Berlen rejede çykalganyň napryaženiýesini V_{Dsat} bilen belgiläliň. Uly napryaženiýelerde ($V_D > V_{Dsat}$) Y egrelme nokat girelgä süýşýär, çykalga tok bolsa ujypsyz ýokarlanýar. Sebäbi girelge bilen Y kanalyň egrelme nokadynyň arasyndaky napryaženiýe V_{Dsat} deň. Y nokatdan çykalganyň garyplaşan oblastyna esasy däl zaryady äkidijileriň inžeksiýasy bipolýar tranzistoryň emitter - baza geçişli zaryady äkidijileriň inžeksiýa prosesine meňzeş.

Indiki rugsat etmeleri ulanyp, MOÝ tranzistoryň esasy häsiýetnamalaryny kesgitleýän, analitiki gatnaşyklary çykaralyň:

1) abzalyň burma asty oblasty ideal MOÝ struktura bolup durýar. Şu düşünjä baglylykda üst ýagdaýlaryň, okiselde fiksirlenen zaryadyň, ýarymgeçiriji bilen metalyň arasynda çykyş işiniň tapawudynyň ýoklugyny aňladýar we ş.m.

2) toguň diňe dreýf komponenti hasaba alynýar;

3) inwersion gatlakda zaryady äkidijileriň hereketliligi hemişelik (elektrik meýdana bagly däl);

4) kanalda legirlenýän garyndynyň konsentrasiýasy birhilli;

5) p - n geçişleriň ters tok ýitgisi az;

6) bölegiň serhedine perpendikulýar ugrukdyrylan E_x kese elektrik meýdany üstüň ugruna ugrukdyrylan (y oky boýunça)

E_y dik elektrik meýdanyny ozup geçýär. Soňky rugsat etme ***kem-kemden üýtgeýän kanalyň golaýlaşmagy*** diýip atlandyrylýar.

Kabul edilen rugsat etmelere laýyklykda ýarymgeçirijide doly zarýadyň üst dykyzlygy girelgeden y aralykda we şol nokatda $\psi_s(y)$ üst potensial indiki gatnaşyk bilen bagly:

$$Q_s(y) = [-V_G + \psi_s(y)]C_i,$$

(22.4.1)

bu ýerde $C_i \equiv E_i / d$ - okiseliň udel sygymy. (22.3.8) aňlatmany ulanyp, inwersion gatlagyň zarýady üçin alarys:

$$Q_n(y) = Q_s(y) - Q_B(y) = -[V_G - \psi_s(y)]C_i - Q_B(y).$$

(22.4.2)

Güýçli inwersiýa rejede Ψ_s üst potensial $2\Psi_B + V(y)$ deň, bu ýerde $V(y)$ - girelgäniň potensialyna gatnaşyk boýunça y nokatda ters naprýaženiýe (biz ony zeminleşdirilen hasap ederis). Ýokarda aýdylyşy ýaly, garyplaşan gatlagyň zarýady

$$Q_B(y) = -qN_A W_m = -\sqrt{2\varepsilon_s q N_A [V(y) + 2\psi_B]}$$

. (22.4.3)

Bu aňlatmany (4.2) aňlatmada ornuna goýup, alarys

$$Q_n(y) = -[V_G - V(y) - 2\psi_B]C_i + \sqrt{2\varepsilon_s q N_A [V(y) + 2\psi_B]}$$

. (22.4.4)

Kanalyň geçirijiligi integral bolup durýar

$$g = \frac{Z}{L}\int_0^{x_i}\sigma(x)dx$$

(22.4.5)

göwrüm udel geçirijiliginden

$$\sigma(x) = qn(x)\mu_n(x).$$

(22.4.6)

μ hereketlik x-a bagly däl diýip alarys

$$g = \frac{qZ\mu_n}{L}\int_0^{x_i} n(x)dx = qZ\mu_n|Q_n|/L.$$

(22.4.7)

dy uzynlykly kanalyň elementar meýdançasynyň garşylygy bar

$$dR = \frac{dy}{gL} = \frac{dy}{Z\mu_n|Q_n(y)|}$$

(22.4.8)

we bu meýdançada naprýaženiýeniň düşmesi

$$dV = I_D dR = \frac{I_D dy}{Z\mu_n|Q_n(y)|},$$

(22.4.9)

bu ýerde I_D çykalga tok - y-a bagly däl konstanta. (22.4.4) aňlatmany (22.4.9) aňlatma köpeldip we alnan aňlatmany girelgeden (y=0, $V=$0) çykalga çenli ($y=L$, $V=V_D$) integrirläp, seredilýän ideallaşdyrylan ýagdaý üçin taparys

$$I_D = \frac{Z}{L}\mu_n C_i \left\{ \left(V_G - 2\psi_B - \frac{V_D}{2} \right) V_D - \right.$$

$$\left. - \frac{2}{3}\frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_i}\left[(V_D + 2\psi_B)^{3/2} - (2\psi_B)^{3/2} \right] \right\}.$$

(22.4.10)

(22.4.10) aňlatmadan V_G burmada fiksirlenen naprýaženiýede V_D çykalga naprýaženiýe bilen I_D çykalga tok çyzykly ýokarlanýar (çyzykly oblast), soňra häsiýetnamanyň kertligi kem - kemden üýtgäp nula çenli kiçelýär, ondan soň ***doýgun oblast*** başlanýar.

Ýokarda agzalan iki oblasta has içgin seredeliň. Çykalganyň kiçi naprýaženiýeleri üçin (4.10) aňlatmany özgerdip, alarys

$$I_D \simeq \frac{Z}{L}\mu_n C_i \left[(V_G - V_T)V_D - \left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{\varepsilon_s q N_A / \psi_B}}{4C_i}\right) V_D^2 \right],$$

(22.4.11)

ýa-da has ýönekeý (V_D <<(V_G - V_T) bolanda)

$$I_D \simeq \frac{Z}{L}\mu_n C_i (V_G - V_T) V_D,$$

(22.4.11 a)

bu ýerde

$$V_T = 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s qN_A(2\psi_{B})}}{C_i}$$
(22.4.12)

- bosaga naprýaženiýe. Bosaga naprýaženiýeni tejribede V_D kiçide ölçenen çykalga - burma häsiýetnamany (I_D-V_G) naprýaženiýeniň oky bilen kesişmesine çenli çyzykly dowam edip kesgitleýärler.

(22.4.11 a) aňlatmany differensirläp, ideal MOÝ tranzistoryň çyzykly oblastda g_D geçirijiligi we g_m kertligi üçin alarys:

$V_G = const$ bolanda

$$g_D \equiv \frac{\partial I_D}{\partial V_D} = \frac{Z}{L}\mu_n C_i(V_G - V_T),$$
(22.4.13)

$V_D = const$ bolanda

$$g_m \equiv \frac{\partial I_D}{\partial V_G} = \frac{Z}{L}\mu_n C_i V_D.$$
(22.4.14)

V_D çykalganyň naprýaženiýesiniň ýokarlandygyça $y=L$ (çykalganyň gyrasynda) nokatda Q_n inwersion gatlagyň zarýady kiçelýär we $V_D = V_{Dsat}$ bolanda nula deň bolýar. Bu hadysa $p-n$ geçişli meýdan tranzistorlarynda şeýle effektli analogiýa boýunça burma hökmünde ***kanalyň egrelmesi*** diýip atlandyrylýar. $V_D = V_{Dsat}$ bolanda çykalga togy I_{Dsat} maksimal baha ýetýär. Uly naprýaženiýelerda ($V_D > V_{Dsat}$) doýgunlyk

başlaýar ($I_D = I_{Dsat}$). *Egrelmäniň* napryýaženiýe ululygyny V_{Dsat} - ny $V(L) = V_{Dsat}$ bilen (22.2.4) aňlatmany nula deňläp alarys:

$$V_{Dsat} = V_G - 2\psi_B + K^2(1 - \sqrt{1 + 2V_G / K^2}),$$
(22.4.15)

bu ýerde $K = \sqrt{E_s q N_A} / C_i$. I_{Dsat} doýgun togy (22.4.15) aňlatmany (22.4.10) we(22.4.11) aňlatmalarda ornuna goýup tapyp bolýar:

$$I_{Dsat} \simeq \frac{mZ}{L} \mu_n C_i (V_G - V_T)^2,$$
(22.4.16)

bu ýerde m koeffisiýent umumy ýagdaýda esasyň legirlenme derejesine bagly. Garyndynyň örän kiçi konsentrasiýalarynda m=1/2 deň. V_T bosaga napryýaženiýe bu aňlatmada doýgun rejede pes legirlenen esasly MOÝ tranzistorlar üçin şeýle hem (22.4.12) deňleme bilen kesgitlenýär. Güýçli legirlenen strukturalarda V_T V_G - a bagly bolỳar. MOÝ tranzistoryň doýgun oblastda kertligi (22.4.16) aňlatma laýyklykda

$V_D = const$ bolanda

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_G} = \frac{2mZ}{L} \mu_n C_i (V_G - V_T).$$
(22.4.17)

deň.

MOÝ tranzistorlaryň esasy häsiýetnamalaryny kesgitleýän

gatnaşyklaryň netijesinde biz ýeňilleşdirilen çaklamalaryň toparyny ulandyk. Indi birinji iki çaklamadan dänjek bolalyň, ýagny MOÝ tranzistoryň häsiýetnamasyna MOÝ strukturanyň we kanalda toguň diffuzion komponentiniň ideal dälliginiň täsirini analizläliň. Öň aýdylyşy ýaly, okiseliň fiksirlenen zarýady we metaldan we ýarymgeçirijiden elektronyň çykyş işiniň tapawudy V_{FB}, MOÝ strukturanyň tekiz zonalaryň naprýaženiýe süýşmesini şertlendirýärler. MOÝ tranzistoryň bosaga naprýaženiýesiniň hem şu ululyga süýşmelidigi düşnüklidir:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_i} =$$

$$= (\varphi_{ms} - \frac{Q_f}{C_i}) + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q N_A \psi_B}}{C_i},$$

(22.4.18)

MOÝ tranzistoryň bosaga naprýaženiýesine şeýle hem esasyň ters naprýaženiýesi täsir adýär V_{BS}:

$$V_{\mathrm{T}} = V_{FB} + 2\psi_B + \sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{BS})} / C_i,$$

(22.4.19)

ýa-da

$$\Delta V_{\mathrm{T}} = V_T(V_{BS}) - V_T(V_{BS} = 0) =$$

$$= \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_i}(\sqrt{2\psi_B + V_{BS}} - \sqrt{2\psi_B} =$$

$$= \frac{a}{\beta}(\sqrt{2\beta\psi_B + \beta V_{BS}} - \sqrt{2\beta\psi_B}),$$

(22.4.20)

bu ýerde

$$a \equiv \sqrt{2}(\varepsilon_s / L_D)/C_i = \sqrt{2}(\varepsilon_s / \varepsilon_i)(d / L_D).$$

(22.4.21)

a - ny tapmak üçin anyk hasaplamalary ýerine ýetirmekde nomogrammany ulanmak amatlydyr. a köp boldugyça ΔV_T hem köp bolar.

Kanalyň togunyň diffuzion düzüjileriniň täsirini barlamak üçin deňagramly däl şertlerde MOÝ tranzistoryň iki ölçegli zona çatgysyna seredeliň. Ol ýerde kanalyň uzynlygy boýunça Ferminiň elektron kwaziderejesiniň ýagdaýynyň üýtgemesi görkezilen. Şu ψ_{Fn} kwaziderejäniň kömegi bilen onuň iki düzüjisini hem hasaba alyp,

(diffuzion we dreýf) kanalyň doly togunyň dykyzlygyny aşaky görnüşde ýazyp bolýar:

$$J_D(x,y) = q\mu_n n E_y + qD_n \nabla n = -qD_n n(x,y)\nabla\psi_{Fn}.$$

(22.4.22)

Ỳene kem-kemden üýtgeýän kanalyň golaỳlaşmasyny ulanyp, (22.4.22) aňlatmadan doly tok üçin alarys:

$$I_D = \int_0^{x_i} J_D(x,y) Z dx =$$

$$= \frac{1}{L}\int_0^L D_n q Z\left(\frac{\partial \psi_{Fn}}{\partial y}\right)\int_0^{x_i} n(x,y)\,dx\,dy =$$

$$= \frac{Z}{L}\frac{\varepsilon_s \mu_n}{L_D}\int_0^{V_D}\int_{\psi_B}^{\psi_S}\frac{e^{\beta\psi-\beta V}}{F(\beta\psi, V, n_{p0}/p_{p0})}\,d\psi\,dV.$$

(22.4.23) Burmada napryaženiýe bilen ψ_s üst potensialy aşaky gatnaşyk bilen baglanyşykly

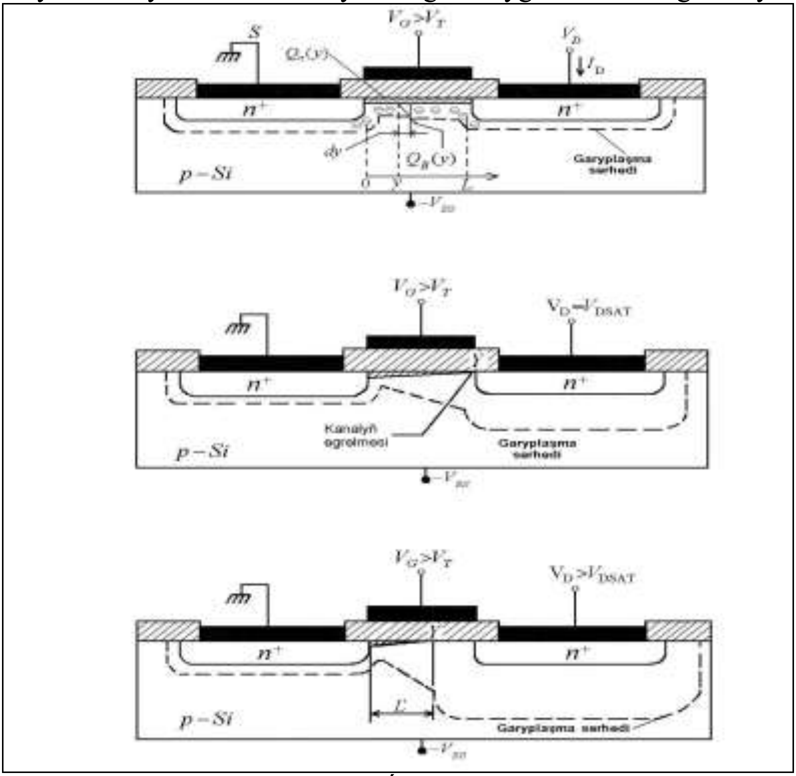
$$V_G = V_G - V_{FB} = -\frac{Q_s}{C_i} + \psi_s =$$

$$= \frac{2\varepsilon_s kT}{C_i q L_D} F\left(\beta\psi_s, V, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) + \psi_s.$$

(22.4.24)

V_G burmada napryaženiýe V_T bosaga napryaženiýeden esli ýokary bolan halatynda (22.4.23) aňlatma (22.4.10) formula ýakynlaşýar. Ýöne bosaga napryaženiýanyň golaýynda, şeýle hem kanalyň egrelmesiniň golaýynda (22.4.10) formulanyň takyklygy ýeterlik däl, bu ýerde (22.4.23) takyk aňlatmany ulanmak gerek. Fiziki parametrleriň kesgitli bahaly anyk strukturalary üçin (ölçegler, garyndynyň konsentrasiýasy, hereketli) (22.4.23) we (22.4.24) deňlemeler san metodlary bilen çözülýär. Munda alynýan baglylyklar çykalgada islendik napryaženiýalarda (çyzykly oblastda we doýgun

oblastda) adalatlydyr. Ol uzyn kanally MOÝ tranzistorlaryň çykyş häsiýetnamasyna mahsus häsiýet - toguň doýgun effektini görkezýär.



Surat 11.3. Çyzykly rejede MOÝ transistor

Bosaga astyndaky oblast.

Eger MOÝ tranzistoryň burmasynda naprýaženiýe bosagadakydan aşakda we okisel bilen serhet gowşak inwersiýa şertlerinde bolsa çykalganyň togy ***bosaga astyndaky tok*** diýip atlandyrylýar. Az energiýa sarp edýän kiçiwoltly ýarymgeçiriji gurluşlarda işlemek üçin niýetlenen MOÝ tranzistorlar üçin häsiýetnamalaryň bosaga asty oblasty (san logiki çatgylar, huş gurluşlar) aýratyn wajypdyr. Sebäbi bu reje MOÝ tranzistoryň ýapyk ýagdaýyna gabat gelýär. Şeýle hem ýapyk ýagdaýdan açyga geçiş prosesini suratlandyrýar.

Gowşak inwersiýa şertlerinde kanal togunyň esasy

komponenti diffuzion düzüji bolup durýar. Çykalganyň togy üçin formula birhilli legirlenen bazaly bipolýar tranzistorlarda kollektor togy üçin aňlatma ýaly çykarylýar. MOÝ tranzistora $n-p-n$ (girelge - esas - çykalga) bipolýar tranzistor ýaly seredip, ýazmak bolýar

$$I_D = -qAD_n \frac{dn}{dy} = qAD_n \frac{n(0)-n(L)}{L},$$

(22.5.1)

bu ýerde A - kanalyň effektiw kese meýdany, $n(0)$ we $n(L)$ - girelgede we çykalgada elektronlaryň göwrüm konsentrasiýasy:

$$n(0)= n_{p0} e^{\beta\psi_s},$$

(22.5.2 a)

$$n(L)= n_{p0} e^{\beta\psi_s - \beta V_D}.$$

(22.5.2 b)

Bu ýerde ψ_s - girelgede üst potensial. Kanalyň effektiw kese meýdany kanalyň Z giňligini üste perpendikulýar gönükdirilen inwersion gatlagyň effektiw galyňlygyna köpeltme hasylyna deň. Elektronlaryň konsentrasiýasy φ potensiala eksponensial bagly bolany sebäpli, kanalyň effektiw galyňlygy üstden aralyga deň. Onda potensial kT/q tertip ululygyna kiçelýär. Şoňa laýyklykda kanalyň effektiw galyňlygy kT/qE_s deň, bu ýerde E_s - üst elektrik meýdan. Ol gowşak inwersiýa rejede aşakdaky aňlatma bilen kesgitlenýär:

$$E_s = -Q_B/\varepsilon_s = \sqrt{2qN_A\psi_s/\varepsilon_s}.$$

(22.5.3)

(22.5.2) we (22.5.3) aňlatmalary (22.3.1) aňlatma goýup, alarys

$$I_D = \mu_n \left(\frac{Z}{L}\right)\frac{aC_i}{2\beta^2}\left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2 \left(1 - e^{-\beta V_D}\right) e^{\beta \psi_s} \left(\beta \psi_s\right)^{-1/2}.$$

(22.5.4)

Soňky aňlatmada $D_n = \mu_n kT/q$ Eýnşteýniň gatnaşygy we MOÝ strukturany häsiýetlendiriji a ölçegsiz parametr ulanyldy. Bu belgilerde girelgede ψ_s üst potensial V_G burmada naprýaženiýeniň üsti bilen indiki görnüşde ýazylýar:

$$\psi_s = (V_G - V_{FB}) - \frac{a^2}{2\beta}\left\{[1 + \frac{4}{a^2}(\beta V_G - \beta V_{FB} - 1]^{1/2} -\right.$$

(22.5.5)

(22.5.4) aňlatmadan bosaga asty oblastda çykalga tok V_G burmada naprýaženiýeniň boýy bilen ýokarlanýar we $V_{D>3} kT/q$ bolanda çykalga naprýaženiýä bagly bolmagy bes edilýär. (22.5.4) we (22.5.5) formulalaryň kömegi bilen çykalga togunyň tertibe (düzgün) üýtgemegi üçin talap edilýän, S burmada naprýaženiýeniň üýtgemesini kesgitläp bolýar. Kesgitleme boýunça

$$S \equiv \ln 10 dV_G / d(\ln I_D) =$$
$$= (kT/q)\ln 10 d(\beta V_G)/d(\ln I_D) =$$
$$= (kT/q)\ln 10[1 + C_D(\psi_s)/C_i]\left\{1 - \left(\frac{2}{a^2}\right)[C_D(\psi_s)/C_i]^2\right\}$$

(22.5.6)

Adaty ýagdaýlarda, $a >> C_D / C_i$ bolanda

$$S \simeq \frac{kT}{q} \ln 10 (1 + C_D / C_i).$$

(22.5.7)

Skobkadaky goşulyjy bu ýerde ($C_i + C_D$)/C_i sygym bölüjiniň gatnaşygydyr. Ýokary dykyzlykly üst D_{it} ýagdaýly strukturalarda $C_{it} = qD_{it}$ üst ýagdaýynyň effektiw sygymyny, C_D garyplaşan gatlagyň sygymy bilen parallel "ýöretmek" («включить») gerek. Ýagny (22.5.7) aňlatmada C_D - ny C_D + C_{it} bilen çalyşmaly. Munda

$$S_{Dit} \simeq \frac{kT}{q} \ln 10 \left(1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_i} \right).$$

(22.5.8)

MOÝ tranzistoryň esasyna ters napryýaženiýe berilende ψ_s üst potensial ýokarlanýar we C_D garyplaşan gatlagyň sygymy kiçelýär.

Zarýady äkidijileriň süýşme tizligi.

Kiçi elektrik meýdanlarda E_y inwersion gatlagyň zarýady äkidijileriniň dreýf tizligi $\vartheta_d = \mu_n E_y$ goýulan meýdana (E_y -

toguň ugruna parallel) proporsional. Ölçegleriň netijesinden μ_n dreýf üst süýşme tizlik E_x kese elektrik meýdanyna baglydygy (E_x - toguň ugruna perpendikulýar) görünýär. Işiň netijelerine laýyklykda μ_n süýşme tizligi, $N_A > 10^{17}$ cm^{-3} bolanda esasyň legirlenme derejesine we üsti işläp düzmeklige bagly däl. Hemişelik temperaturada effektiw kese elektrik meýdanyň ýokarlanmagy bilen üst süýşme tizlik kiçelýär

$$(E_x)_{eff} = \frac{1}{\varepsilon_s}\left(Q_B + \frac{1}{2}Q_n\right), \quad (22.6.1)$$

bu ýerde $(E_x)_{eff}$ - inwersion gatlakda elektronlary bölüşdirme boýunça ortalaşdyrylan kese elektrik meýdan.

E_y göni elektrik meýdanyň ýokarlanmagynda dreýf tizligiň doýgunlaşmagy bolýar. E_x kese elektrik meýdanyň fiksirlenen bahasynda, dreýf tizlik, E_y kiçi bahalarynda, E_y göni meýdana göni proporsional, özi hem proporsionallyk koeffisiýenti μ_n süýşme tizlige deň. E_y meýdan ýokarlananda dreýf tizlik kesgitli predele ymtylýar. Onuň E_y meýdana baglylygyny umumy aňlatma bilen

$$\vartheta_d = \vartheta_0 \left[1 + \left(\frac{\vartheta_0}{\vartheta_c} \right)^2 \left(\frac{\vartheta_0}{\vartheta_c} + G \right)^{-1} + \left(\frac{\vartheta_0}{\vartheta_s} \right) \right]^{-1/2},$$

(22.6.2)

bu ýerde ϑ_c, ϑ_s, we G - kowma parametrler,

$$\vartheta_0 \equiv \mu_n(E_x)E_y.$$

(22.6.3)

$\mu_n(E_x)$ süýşme tizlik - E_x kese meýdanyň bir bahaly funksiýasy.

Eger $E_y \to 0$ bolsa ϑ_d (E_y) baglylyk $\vartheta_d = \vartheta_0 = \mu_n(E_x) E_y$ ymtylýar. Eger-de $\mu_n E_y > \vartheta_s$ bolsa dreýf tizlik takmynan θ_s ululyga deňdir. Ol hem E_x kese elektrik meýdanyna bagly.

Dreýf tizligiň doýgunlyk effekti, birinjiden MOÝ tranzistoryň doýgunlyk togunyň ep - esli peselmegine getirýär, ikinjiden ideal MOÝ tranzistoryň çaklamasy ýaly kwadratik däl-de, doýgunlyk tok takmynan burmadaky naprýaženiýe proporsional. Dreýf tizligiň doýgunlyk şertlerinde MOÝ tranzistoryň doýgunlyk togy

$$I_{\mathrm{Dsat}} = ZC_i(V_G - V_T)\vartheta_s,$$

(22.6.4)

we onuň kertligi bu rejede hemişelik:

$$g_m = (\partial I_{Dsat})/\partial V_G = ZC_i\vartheta_s.$$

(22.6.5)

Häsiýetnamalaryň temperatura baglylygy.

Temperatura MOÝ tranzistoryň köp parametrlerine we häsiýetnamalaryna, aýratyn hem süýşme tizligine, bosaga naprýaženiýe we häsiýetnamalaryň bosaga asty uçastogyň formasyna täsir edýär. Burmada güýçli inwersiýany üpjün naprýaženiýelerde $T > 300 K$ bolanda inwersion zarýady äkidijileriň süýşme tizligi T^{-2} kanun boýunça temperatura bilen peselýär.

MOÝ tranzistoryň işiniň çyzykly oblastynda bosaga naprýaženiýeniň (aňlatma 22.2.18) temperatura baglylygyna seredip geçeliň

$$V_T = \varphi_{ms} - \frac{Q_f}{C_i} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s q N_A \psi_B}}{C_i}.$$

(22.7.1)

φ_{ms} çykyş işiň we okiseliň fiksirlenen zarýadynyň tapawudy temperatura bagly bolmanlygy sebäpli (1.5.1) aňlatmany temperatura boýunça differensirläp, alarys

$$\frac{dV_T}{dT} = \frac{d\psi_B}{dT}\left(2 + \frac{1}{C_i}\sqrt{\frac{\varepsilon_s q N_A}{\psi_B}}\right),$$

(22.7.2)

bu ýerde

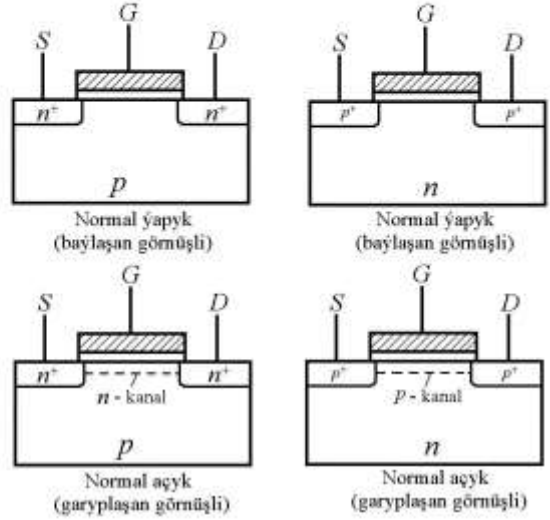
$$\frac{d\psi_B}{dT} \simeq \pm\frac{1}{T}\left[\frac{E_g(T=0)}{2q} - |\psi_B(T)|\right].$$

(22.7.2 a)

Önümleriň bahalaryny otag temperaturada (1.5.2) formulany ulanyp hasaplap bolýar. Okisel gatlagyň berilen galyňlygynda dV_T/dT

önümiň ululygy esasan legirlenme derejesiniň ösmegi bilen ýokarlanýar.

Has wajyp gowulanma bosaga asty togy tertibe üýtgetmek üçin talap edilýän S burma naprýaženiýeniň esli peselmegi bolup durýar. S-ň şeýle peselmesi (22.5.6) formulada kT/q temperatura köpeldiji bilen şertlendirilen.
22.4-suratda MOÝ-tranzistorlaryň esasy görnüşleri görkezilendir.



11.4 surat MOÝ-tranzistorlaryň esasy görnüşleri

11.3. Birhilli däl legirlemek we gizlin kanally abzallar

Ýokarda esasda legirleýji garyndynyň konsentrasiýasy hemişelik diýip pikir edildi. Real abzallarda garyndyny ýerleşdirmek hemişe birhilli däldir. Kesgitli birhilli dällik, başda birhilli legirlenen esasda taýýarlanylýan abzallarda, termiki okislenme prosesde garyndylary täzeden ýerleşdirmäniň hasabynda ýüze çykýar. Häzirki

zaman MOÝ tehnologiýada, ion implantasiýasynyň kömegi bilen esasy ýörite birhilli däl legirlemek, abzallaryň işçi parametrlerini gowulandyrmak üçin giňden ulanylýar Şeýle, meselem, häzirki wagtda ion implantasiýa ulanylýar: birinjiden, girelgäniň we çykalganyň burma bilen öz-özüni utgaşdyrmak üçin; ikinjiden, bosaga naprýaženiýeleri gönükdirmek üçin $Si-SiO_2$ bölegiň serhedini legirlemek üçin; üçünjiden gowşaklegirlenen esaslarda implantirlenen kanallary döretmek üçin, ol çykalganyň girelge bilen deşilmeginiň öňüni alýar; dördünjiden sähelçe ýokary üst oblastyna garşylykly görnüşli garyndyny girizmek ýoly bilen gizlin kanally abzallary döretmek üçin.

Ion implantasiýada garyndylaryň konsentrasiýasynyň profili aralygyň orta uzynlygynyň R_p maksimumy we ΔR_p standart gyşarma bilen gauss ýerleşdirme formasyna golaýdyr:

$$N(x)=\frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}\exp\left[-\frac{(x-R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2}\right].$$

(23.1)

Bu ýerde D_1 - birlik meýdanda ionlaryň möçberi. Aralygyň orta uzynlygy we standart gyşarma implantirlenýän ionlaryň energiýasynyň ösmegi bilen ýokarlanýar.

Biz aşakda kanalyň birhilli däl legirlenmesiniň häsiýetnamalaryna, aýratyn hem bosaga naprýaženiýelere we häsiýetnamalaryň bosaga asty uçastogyň gyşarmasynyň täsirine seredip geçeris. Biz şeýle hem gizlin kanally MOÝ tranzistorlaryna seredip geçeris. Olary inwertor çatgyda ýük we normal ýapyk çalt täsir edýän abzallar hökmünde ulanyp bolýar.

Bosaganyň süýşmesi. Bosaga astyndaky häsiýetnamalaryň ýapgytlygy.

Ion implantasiýasy bilen şertlenen bosaga naprýaženiýesiniň

süýşmesini hasaplamak üçin ilki bilen konsentrasiýanyň ideallaşdyrylan basgançakly profiline seredeliň. Implantirlenen ionlaryň konsentrasiýasynyň başky profili termiki gyzartma prosesde aýdyň üýtgeýär.
Gyzartmadan soň profili başky profiliň standart gyşarmasy we aralygyň orta uzynlygynyň jemine deň, x_s çuňlukly basgançakly funksiýa bilen approksimirläp bolýar. $N_S - N_B$ basgançagyň beýikligi gatnaşyk bilen kesgitlenýär:

$$(N_S - N_B)x_s = \int_0^{\infty} \left[N_A(x) - N_B\right]dx = D_I$$

(23.1.1)

$x_s \to 0$ bolanda (bölegiň serhedinde δ - funksiýa görnüşde bölüşdirme) implantirlenen akseptorlaryň täsiri okiseliň položitel fiksirlenen zarýadynyň qD_I ululyga kiçelmegine alyp barýar. Bu ýagdaýda

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_B (2\psi_B + V_{BS})}}{C_i} + \frac{qD_I}{C_i},$$

(23.1.2)

bosaganyň süýşmesi bolsa

$$\Delta V_T = V_T(D_I) - V_T(D_I = 0) = \frac{qD_I}{C_i}.$$

(23.1.3)

$x_s > W_m$ ýaly giň bölüşdirmeler üçin (W_m - güýçli inwersiýada garyplaşan gatlagyň maksimal galyňlygy)

ýarymgeçirijiniň gatlagyna N_S konsentrasiýaly birhilli legirlenen oblast ýaly seretmek bolýar. Bu ýagdaýda bosaga naprýaženiýe (4.19) aňlatma bilen kesgitlenýär. Onda N_A-ny N_S bilen çalşyrmak we ψ_B ululyga düzediş girizmek bolýar.

$x_s > W_m$ ýagdaýda garyplaşan gatlagyň galyňlygyny we okiselde naprýaženiýe düşmesini kesgitlemek üçin garyndynyň konsentrasiýasynyň basgançakly profili üçin Puassonyň deňlemesini çözmek zerur:

$$W_m = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_B}\left[\psi_s + V_{BS} - \frac{qx_s^2}{2\varepsilon_s}(N_S - N_B)\right]^{1/2}}$$

(23.1.4)

$$V_i = \frac{q}{C_i}\int_0^m N_A(x)dx =$$

$$= \frac{q}{C_i}\left[N_B W_m + (N_S - N_B)x_s\right] = \frac{q}{C_i}(N_B W_m + D_I),$$

(23.1.5)

bu ýerde ψ_s - güýçli inwersiýa bolanda zonalaryň üst egriligi, V_i - okiseliň gatlagynda naprýaženiýe düşmesi. Bu ýerden bosaga naprýaženiýe

$$V_T = V_{FB} + \psi_s + \frac{\sqrt{2q\varepsilon_s N_B}}{C_i}\left(\psi_s + V_{BS} - \frac{qx_s}{2\varepsilon_s} D_I\right)^{1/2} + \frac{qD_I}{C_i}$$

(23.1.6)

$V_{BS} + \psi_s$ bolanda $qx_s D_I / 2\varepsilon_s$ köp bolýar. (23.1.6) aňlatma, okisel bilen serhetde garyndynyň (δ - funksiýa görnüşli) impuls profiline laýyk (23.1.2) golaýlaşan formula ymtylýar.

(23.1.2) - (23.1.6) formulalaryň kömegi bilen hasaplanan bosaga naprýaženiýeniň V_{BS} esasyň naprýaženiýesine baglylyklary 23.1-nji suratda getirilen. a we b gyşyklar $N_B = 7{,}5 \cdot 10^{15}$ we $4{,}0 \cdot 10^{16}\ cm^{-3}$ birhilli legirleme ýagdaýa laýykdyr. 23.1.2-nji suratda ç gyşyk bölegiň serhedinde implantirlenen garyndynyň impuls profiliniň golaýlaşdyrmasynda alynan. (23.1.2) formula laýyklykda ol $qD_I / C_i = 1{,}1\ \ W$ ululyga a gyşyga görä süýşürilen. g gyşyk basgançakly profil üçin Puassonyň deňlemesiniň takyk çözgüdi. V_{BS} az bolanda $W_m < x_s = 0{,}2\ \ mkm$ b gyşyga golaý, ($4{,}0 \cdot 10^{16}\ \ cm^{-3}$) garyndynyň ýokary konsentrasiýaly birhilli süýşmesine laýykdyr. V_{BS} uly bolanda, haçanda $W_m < x_s$ a gyşyk implantirlenen ionlaryň konsentrasiýasynyň profiliniň impuls aproksimasiýasyna laýyklykda b gyşyga golaýlaşýar.

Shematehnika nukdaý nazardan MOÝ tranzistoryň bosaga naprýaženiýesiniň esasy naprýaženiýesine duýgurlygy az bolmagy islenilýär. V_T korrektirlemek üçin ownuk implantasiýa ulanylmaklygy 23.1-nji suratda görünýär. Bu bosaga naprýaženiýeleriň üýtgemelerinde esasyň naprýaženiýesine V_T

başky kiçi duýgurlygy saklamaga mümkinçilik berýär.

Ýokarda suratlandyrylan basgançakly profiliň golaýlaşmasy ion implantasiýasy bolanda bosaga naprýaženiýesiniň süýşmesi üçin birinji tertipli bahasy bolýar. Takyk netije almak üçin implantirlenen garyndyň konsentrasiýasynyň takyk profili bilen Puassonyň deňlemesini çözmek zerur. Implantirlenen ionlaryň konsentrasiýasynyň has çuň we inçe bölüşdirmesi üçin, basgançaklydan gowusy, impuls profili bilen (δ - funksiýa görnüşli) real bölüşdirmäniň approksimasiýasy bolup durýar,

$$x_c = \int_0^{x_I} \left[N_A(x) - N_B\right] x dx / D_I$$

(23.1.7)

merkeze uýgunlaşdyrylan we möçber bilen

$$D_I = \int_0^{x_I} \left[N_A(x) - N_B\right] dx.$$

(23.1.8)

Puassonyň deňlemesinden garyplaşan gatlagyň çuňlugyny tapyp bolýar:

$$W_I = \sqrt{2} L_D \left| \beta\psi_s - D_I x_c / (N_B L_D^2) - 1 \right|^{1/2}.$$

(23.1.9)

Birhilli legirlenen esasda garyplaşan gatlagyň çuňlugy

$$W_U = \sqrt{2} L_D \left[\beta\psi_s - 1\right]^{1/2}.$$

(23.1.10)

(23.1.9) we (23.1.10) aňlatmalary deňeşdirmeden ion implantasiýa garyplaşan gatlagyň çuňlugyny kiçeltýänligi gelip çykýar.

Indi (23.1.9) aňlatmanyň kömegi bilen implantasiýa bilen şertlenen ΔV_T bosaga naprýaženiýeniň süýşmesini tapalyň. Birhilli legirlenen meňzeş strukturaly we implantirlenen garyndyly MOÝ strukturada şol bir inwersion zarýady Q_n döretmek üçin gerek bolan burma naprýaženiýeleriň arasyndaky ara tapawut ýaly kesgitläris.

V_{GV} burmada naprýaženiýeli we ψ_{SU} üst potensially birhilli legirlenen MOÝ strukturada inwersion zarýadyň dykyzlygy

$$Q_n = Q_s - Q_B = C_i(V_{GU} - \psi_{SU}) - qN_B W_U$$

(23.1.11)

deň. Implantasiýa ýagdaýda burmada naprýaženiýe V_{GI} we zonalaryň egriligi ψ_{Sl} bolanda

$$Q_n = C_i(V_{GI} - \psi_{SI}) - qN_B W_I - qD_I.$$

(23.1.12)

deň. ΔV_T bosaga naprýaženiýesiniň süýşmesi üçin (23.1.11) we (23.1.12) deňlemeleri deňläp

$$\Delta V_T = V_{GI} - V_{GU} = \psi_{SI} - \psi_{SU} - qN_B(W_U - W_I)/C_i + qD_I/C_i$$

(23.1.13)

alarys. Tejribede Q_n (güýçli inwersiýa rejede) ýeterlikli uly bolanda ψ_{SI} we ψ_{SU} üst potensiallary kT/q kiçi ululyga tapawutlandyrýarlar. Şonuň üçin (23.1.13) aňlatma (23.1.9) we (23.1.10) aňlatmalary goýup, taparys

$$\Delta V_T = \frac{qD_I}{C_i} - \frac{\sqrt{2}qL_D N_B}{C_i}\left[(\beta\psi_{SU} - 1)^{1/2} - (\beta\psi_{SU} - \frac{D_I x_c}{N_B L_D^2} - 1)^{1/2}\right]$$

.

(2.1.14)

Ýokarda aýdylyşy ýaly, ψ_{SU} zonalaryň egriligi güýçli inwersiýada takmynan $2\psi_B + V_{BS}$ deň. Implantirlenen garyndynyň x_c merkezleşmäni we D_I möçberden bosaganyň süýşmesiniň baglylygyny hasaplamak üçin (23.1.14) aňlatma $\psi_{SU} = 2\psi_B + V_{BS}$ goýmak ýeterlikdir.

$x_c=0$ bolanda, yagny haçanda implantasiýa δ funksiýa $Si - SiO_2$ bölümiň serhedinde ýerleşýär. (23.1.14) formulada kwadrat skobkanyň goşulyjysy nula deň bolansoň $\Delta V_T = qD_I / C_L$ bolar. x_c-ň ösmegi bilen ΔV_T kiçelýär. Ahyry x_c W garyplaşma gatlagyň galyňlygyna deň bolýar we garyplaşan oblastyň gyrasy $W = x_c$ implantirlenen gatlak bilen gabat gelýär. $W = x_c$ bolanda möçberiň bahasyny (23.1.9) deňlemeden alyp bolýar:

$$D_I(x_c = W) = N_B(W_U^2 - x_c^2)/2x_c. \quad (23.1.15)$$

D_I $<4\cdot10^{11}$ cm^{-2} bolanda implantasiýa birhilli legirlenen esasa (implantirlenmedik) laýyklykda, başlangyç gyşyga görä V_T (V_{BS}) baglylygyň parallel süýşmesine getirýär. Şeýle az D_I bolanda (23.1.14) deňlemede esasy roly birinji goşulyjy qD_I / C_i oýnaýar. $D > 4\cdot10^{11}$ cm^{-2} bolanda garyplaşan gatlagyň gyrasy implantasiýa tekizlikde fiksirlenýär. Bu ýagdaýda

V_{BS} naprýaženiýeniň ösmegi bilen bosaga naprýaženiýeniň üýtgemesi $x_c = W$ şerte laýyk gelýän, gyşyk geçirilýär.

Bosaga astyndaky häsiýetnamalaryň ýapgytlygy. Ýokarda aýdylyşy ýaly, birhilli legirlenen esasly abzalyň bosaga asty oblastynda çykalga togunyň logarifmasy $\ln I_D$ burmada naprýaženiýeniň ösmegi bilen çyzykly ýokarlanýar. Bu gönininiň ters ýapgytlygy abzalyň toguny talap edilýän derejä çenli peseltmek üçin MOÝ tranzistoryň burmasyndaky naprýaženiýesini näçe peseltmelidigini kesgitleýär. Şonuň üçin MOÝ tranzistoryň ýapyk ýagdaýyna laýyk gelýän, bosaga asty oblasty çykalga toguny tertip ululyga kiçeltmek üçin zerur, S naprýaženiýe bilen häsiýetlendirýärler. Birhilli legirlenme ýagdaýda

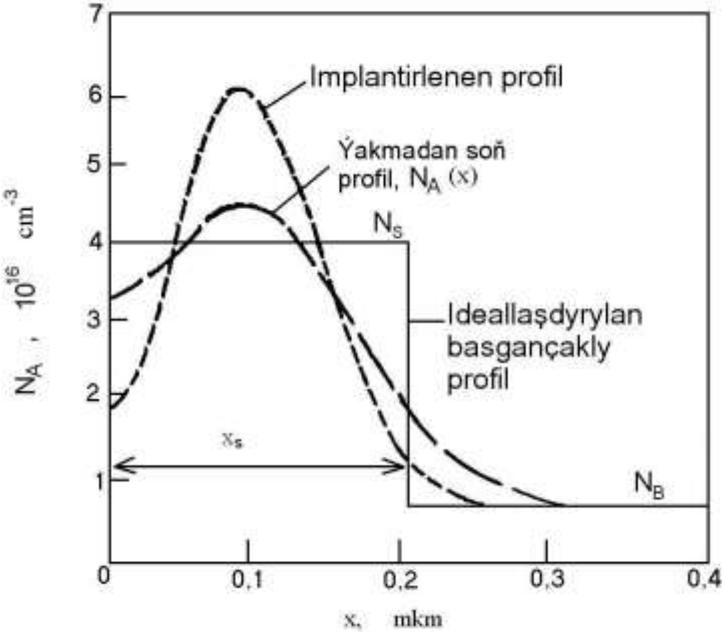
$$S \cong \frac{kT}{q}\ln 10(1+C_D/C_i)/\left[1-\left(\frac{2}{a^2}\right)\left(\frac{C_D}{C_i}\right)^2\right],$$
(23.1.16)

bu ýerde C_D - garyplaşan gatlagyň udel differensial sygymy:

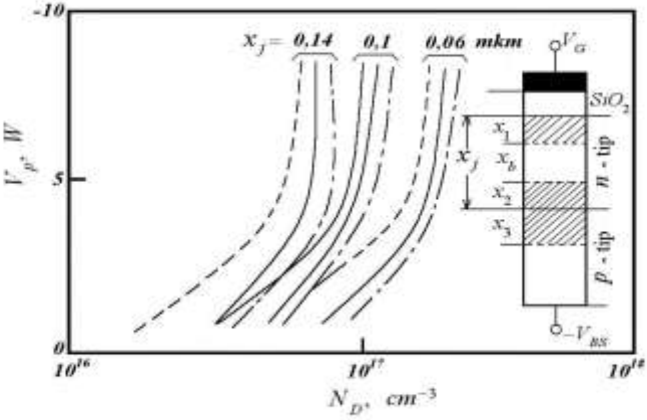
$$C_D = \varepsilon_s / W_I\,.$$
(23.1.17)

Implantasiýanyň bosaga asty naprýaženiýe S täsiri garyplaşan gatlagyň differensial sygymynyň üýtgemesi bilen kesgitlenýär. $x_c = 0$ bolanda S - iň başlangyç bahasy, birhilli legirlenen esasdaky ýaly, diňe garyndynyň konsentrasiýasy we okisel gatlagyň galyňlygy bilen kesgitlenýär. D_I fiksirlenen möçberde S häsiýet naprýaženiýe x_c-ň ösmegi bilen başda ýokarlanýar. Sebäbi

munda garyplaşan gatlagyň gyrasy $Si - SiO_2$ bölegiň serhedine golaýlaşýar we C_D differensial sygym ösýär. Soňra garyplaşan gatlagyň gyrasy implantasiýa tekizlige düşýär. Indi x_c ösende ol implantasiýa tekizligi bilen bile okisel bilen serhetden gidýär. Munda C_D we S implantirlenen däl esasa laýyk gelýän başlangyç baha çenli kiçelýär. Real şertlerde ýokary derejäniň ýitiligi implantirlenen garyndy gatlagyň nul däl galyňlygynyň hasabyna düzlenýär.



Surat 12.1. Legirlenme profili.



Surat 11.2. Dürli legirlenme profiller üçin teoretiki baglylyklar.

Gizlin kanally abzallar.

Başlangyç esasda implantirlenen garyndynyň görnüşi garyndy atomlaryň görnüşine garşylykly bolanda esasyň üst asty böleginde gizlin kanal emele gelip bilýär. 23.2.1-nji suratda gizlin kanally n- kanal MOÝ tranzistoryň şertli kese-kesigi görkezilen. Adaty MOÝ tranzistordan tapawutlykda geçiriji kanal $Si-SiO_2$ bölegiň serhedinden ýarymgeçirijiniň göwrümine çuň ýerleşdirilen. Şeýle abzalyň esasynyň üst oblastynyň legirlenmesiniň hakyky profili we onuň basgançakly approksimasiýasy 23.3-nji suratda getirilen. Metallurgiki $p-n$ - geçişiň golaýynda garyplaşan oblast emele gelýär. Onuň lokal galyňlygy struktura berlen naprýaženiýeniň ululygy bilen kesgitlenýär. Burmada naprýaženiýe mundan başga, garyplaşmanyň üst burma asty oblastyň lokal galyňlygyny modulirleýär. Gizlin kanally MOÝ tranzistorlary kanalyň legirlenme derejesine we çuňlugyna baglylykda ***normal açyk*** we ***normal ýapyk*** abzallar bolup bilýär. Ilki bilen normal açyk abzalyň işine seredeliň. Onuň girelgä golaý oblastda kese-kesigi 23.3-nji suratda görkezilen. Burmada naprýaženiýe ýokarlananda (seredilýän ýagdaýda ol otrisatel) gizlin kanalyň giňligi kiçelýär.

$V_G = V_P$ bolanda x_b ululyk nula deň bolýar we kanalyň bölünmesi bolup geçýär. V_P kanalyň bölünme naprýaženiýesi *Puassonyň* deňlemesiniň we $Si - SiO_2$ serhetde serhet şerti hökmünde elektrik induksiýanyň saklanma kanunynyň (Gaussyň) kömegi bilen hasaplaýarlar. $N_D >> N_A$ çaklamada basgançakly profil üçin alarys:

$$V_P - V_{FB} = -\frac{qN_D x_j}{C_i}\left(1 + \frac{C_i}{2C_D}\right) + \\ + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_i}\left(1 + \frac{C_i}{C_D}\right)\left(V_{bi} + V_{BS}\right)^{1/2},$$

(23.2.1)

bu ýerde $C_D = \varepsilon_s / x_j$, V_{bi} - $p-n$ geçişiň kontakt tapawudy. Fiksirlenen x_j-de konsentrasiýanyň ösmegi bilen kanalyň egrelme naprýaženiýesi ýokarlanýar. Ýöne N_D örän uly bolanda burmada naprýaženiýe bilen geçiriji kanalyň öňini bütinleý ýapmak mümkin däl. Sebäbi ahyrynda V_G-ň ösmegi bilen x_1-ň ýokarlanmagy bilen $Si - SiO_2$ bölegiň serhedinde deşik inwersion gatlagyň emele gelmegi bilen (W_m derejede) stabilleşer. Kanalyň egrelme naprýaženiýesiniň çäk bahasy

$$V_{PL} = V_{FB} + 2\psi_B + \sqrt{2\varepsilon_s q N_D (2\psi_B)} / C_i,$$

(23.2.2)

x_{jL} geçişiň çuňlugynyň çäk bahasy aşakdaky formula boýunça ýeňil hasaplanylýar:

$$x_{jL} = \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{2\varepsilon_s N_A}{q}}\left(\sqrt{2V_{bi}N_D / N_A} + \sqrt{V_{bi} + V_{BS}}\right).$$

(23.2.3)

Gizlin kanally MOÝ tranzistoryň çykyş (çykalga) häsiýetnamalary burma hökmünde $p-n$ geçişli meýdan tranzistoryň häsiýetnamalaryna meňzeş. Olar şeýle hem V_D az bolanda çyzykly we uly çykalga napryaženiýelerde doýgunlaşýarlar. Gizlin kanally tranzistoryň çykalgasynyň togy:

$$I_D = Z(\mu D_I - \mu Q_s - \mu Q_B)\frac{dV}{dy},$$

(23.2.4)

bu ýerde

$$D_I = \int_0^{x_j}\left[N(x) - N_A\right]dx \simeq (N_D - N_A)x_j$$

(23.2.5)

- birlik meýdana implantirlenen merkezleriň dykyzlygy,

$$Q_s = -\overline{C}\left[V_G - V_{FB} - V(y)\right]$$

(23.2.6)

- bölegiň serhedinde birlik meýdana zarýadyň dykyzlygy,

$\overline{C}$ - burmanyň ortalaşdyrylan sygymy,

$$Q_B = \sqrt{2\varepsilon_s q N'_A}\left[V_{bi} + V_{BS} + V(y)\right]^{1/2}$$

(23.2.7)

- $p-n$ geçişiň garyplaşan gatlagynda zarýad, $N'_A = N_D N_A$ /($N_D + N_A$). [($V_G - V_{FB}$)<0] normal garyplaşan rejede çykalganyň togy diňe gizlin göwrüm kanaldan akýar. Şonuň üçin (2.2.4) aňlatma M_B göwrüm süýşme tizligiň bahasyny goýmak gerek. (23.2.5)-(23.2.7) aňlatmalary (23.2.4) aňlatmada ornuna goýup, 0-dan L çenli integrirläp,

$$I_D = \frac{\mu_B Z}{L}\{D_I V_D + \bar{C}\left[V_G - V_{FB})V_D - \frac{1}{2}V_D^2\right] -$$

$$-\frac{2}{3}\sqrt{2\varepsilon_s q N'_A}\left[V_{bi} + V_{BS} + V_D)^{3/2} - (V_{bi} + V_{BS})^{3/2}\right\}.$$

(23.2.8)

alarys. Şu formula boýunça hasaplanan çykyş häsiýetnamalar we I_D(V_D) tejribe baglylyklar biri-birine gabat gelýär. Seredilen MOÝ tranzistor normal açyk abzal bolany sebäpli, V_G=0 bolanda ondan ýeterlikli uly toklar akýar. Burmada naprýaženiýe üýtgände çykalga tok hem üýtgeýär.

$V_G > V_P$ bolanda abzalyň ýapyk ýagdaýy baýlaşdyrylan görnüşli adaty MOÝ tranzistoryň bosaga asty rejesine doly laýyk gelýär. Munda toguň esasy komponenti diffuzion komponent bolup durýar, bosaga asty toguň özi bolsa burmanyň naprýaženiýesine bagly. Bosaga asty uçastogyň ýapgytlygyny häsiýetlendirýän S parametr sygymlaryň gatnaşygy bilen kesgitlenýär:

$$S=\frac{kT}{q}\ln 10\left[(C_1+C_2)/C_1\right]=$$
$$=\frac{kT}{q}\ln 10\left[1+\frac{\varepsilon_i x_1+\varepsilon_s d}{\varepsilon_i(x_2+x_3)}\right]$$
(23.2.9)

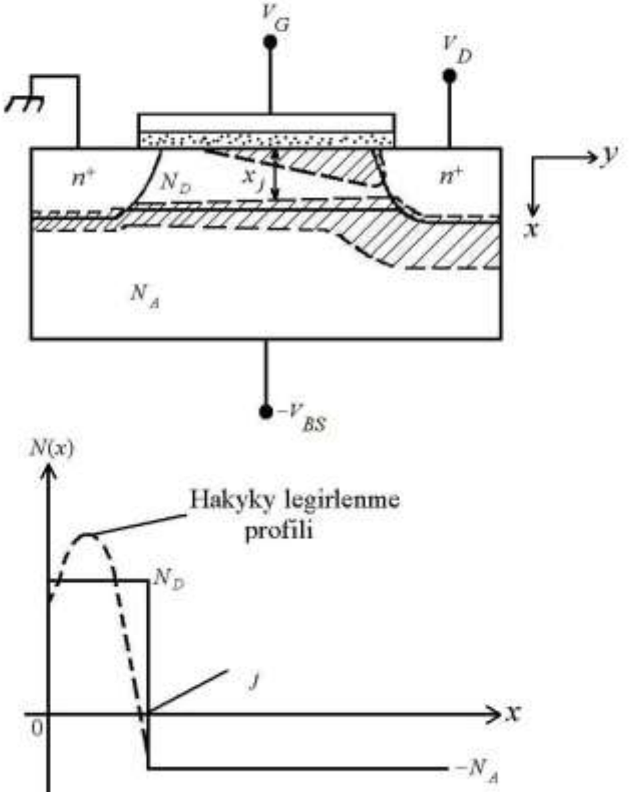
Seredilýän gizlin kanally MOÝ tranzistor V_G=0 burmada nul naprýaženiýede garyplaşan gatlaklar birleşende normal ýapyk abzal bolar. Munuň üçin V_P egrelme naprýaženiýe zerur. Indi ony V_T ***bosaga naprýaženiýe*** diýip atlandyrmak bolar:

$$V_{FB}-V_T=\frac{qN_D(x_j-x_1)}{C_i}+\frac{qN_D(x_j-x_1)^2}{2\varepsilon_s},$$
(23.2.10)

nuldan köp bolardy, bu V_{FB} tekiz zonalaryň uly naprýaženiýeli strukturalarynda mümkin. Tejribede munuň üçin polikremniýniň bor bilen güýçli legirlenen ýa-da çykyşynda uly işli metallardan burmalar ulanylýar.

Üst MOÝ tranzistorlara garanyňda gizlin kanally abzallarda süýşme tizligiň has uly bahalaryna garaşmak bolar. Sebäbi göwrümde hereket edýän zarýady äkidijiler bölegiň dielektrik bilen serhediň birhilli dälliginde dargamaýarlar. Bu düşünjeler degişli ölçegleriň netijeleri bilen tassyklanýar. Olarda gizlin kanally abzallarda süýşme tizlik adaty tranzistorlara garanyňda *50%* ýokarydygy görünýär. Uzyn kanally abzallarda V_T naprýaženiýe L uzynlyga bagly däl. Ýöne L az bolanda gysga kanally effektler

bilen şertlenen kanalyň uzynlygy bilen V_T kiçelmesi bolup geçýär. Şonuň üçin gizlin kanally normal ýapyk MOÝ tranzistorlar ýokary ýygylykly ulanyşlar üçin peýdaly.



Surat 11.3. Gizlin kanally MOÝ tranzistor.

11.4. Gysga kanally effektler

“Integral shemalaryň erasynyň başy” hasaplanýan 1959-njy ýyldan başlap häzirki wagta çenli aýratyn ýarymgeçiriji abzalyň

ölçegi iki esse kiçeldi. Ýöne MOÝ tranzistoryň kanalynyň uzynlygynyň kiçelmesi, onuň häsiýetleri adaty uzyn kanally abzallardan tapawutlanyp başlaýar. ***Gysga kanally effektler*** diýip atlandyrylýan bu gyşarmalar aktiw oblastda elektrik meýdanlaryň paýlaşdyrmasynyň iki ölçegli häsiýeti we meýdanlaryň güýjenmesiniň ýokary absolýut bahalary bilen şertlendirilen.

Eger esasda legirleýän garyndynyň üýtgemeýän konsentrasiýasynda abzalyň kanalynyň uzynlygyny gysgaltsaň ahyry ol girelge we çykalga $p-n$-geçişleriň garyplaşan gatlaklaryň galyňlygynyň ululygy bolar. Munda kanalda potensialy ýerleşdirmek esasda we burmada naprýaženiýeler bilen şertlendirilen E_x kese meýdan we göni meýdan E_y, tranzistoryň inisirlenen naprýaženiýesi bilen kesgitlener. Başgaça aýdanyňda, şeýle gysga kanally abzalda potensialy ýerleşdirmegiň iki ölçegli häsiýeti bar we ony suratlandyrmak üçin kem-kemden üýtgeýän kanalyň golaýlaşmasyny ulanyp bolmaýar. Potensialy ýerleşdirmäniň ikiölçegli häsiýeti abzalyň häsiýetnamasynyň bosaga asty ýerini üýtgedýär. Bosaga naptýaženiýeniň kanalyň uzynlygyna we elektrodlarda naprýaženiýeniň islenilmeýän baglylygyny şertlendirýär, kanalyň oegrelmesine böwet bolup, çykyş garşylygy kiçeldýär.

Gysga kanally abzallar üçin mahsus, elektrik meýdanlaryň ýokarlandyrylan bahalarynda süýşme tizligiň meýdan baglylygy wajyp bolýar. Ol soňunda dreýf tizligiň doýgunlaşmagyna getirýär. Çykalga geçişiň golaýynda has uly meýdanlarda *urgy ionizasiýa* başlanýar. Esas boýunça goşmaça geçirijilik degerli bolýar we zyýanly bipolýar tranzistoryň goýbermesi bolup geçýär. Ýokary elektrik meýdanlar zarýady äkidijileriň gyzmasyna we okisele gyzgyn zarýady äkidijileriň inžeksiýasyna getirýär. Şeýle okiseliň zarýadlanmasy bosaganyň süýşmesini, häsiýetnamalaryň dreýfini we abzalyň kertliginiň erbetleşmegini şertlendirýär.

Ähli sanalan gysga kanally effektler abzalyň işini kynlaşdyrýar we onuň işçi häsiýetnamalaryny erbetleşdirýär.

Bosaga asty toklar we bosaga naprýaženiýe.

Bosaga asty toklar. Burma asty okiseliň berlen galyňlygyny ösdürmeden soň, rentgen litografiýasynyň kömegi bilen plastinalarda 70 mkm birmeňzeş inli we *1*-den *10* mkm çenli uzynlykly polikremniý burmalar emele geldi. Çykalganyň we girelgäniň geçişleri soňundan ýakma bilen myşýagyň ionlarynyň implantasiýasynda alyndy. Geçişleriň çuňlugy ýakylmanyň rejesine çenli üýtgedi. Kontaktly metallaşdyrma üçin alýuminiý ulanyldy.

MOÝ tranzistorlaryň okiseliň galyňlygy *130* A*,* esasda legirleýji garyndynyň konsentrasiýasy 10^{15} cm^{-3}, geçişleriň çuňlugy *0,33* mkm düzdi. Kanalyň uzynlygy *7* mkm bolan abzal uzyn kanally alyp baryşy görkezýär. Onuň bosaga asty häsiýetnamasy, V_D >3kT/q bolanda (1.3.4) formula laýyklykda bolmalysy ýaly çykalganyň naprýaženiýesine bagly däl. L=3 mkm abzalda V_D üýtgeme bosaga asty uçastogy biraz süýşürýär. Çykalganyň naprýaženiýesi V_D*=0,5*-den *1,0* W çenli üýtgände birnäçe köp süýşme iň gysga (L*=1,5* mkm) kanally tranzistorda synlanýar. Bu ýerde nokat hökmünde kesgitlenen bosaga V_T naprýaženiýe hem üýtgeýär. Onda I-V-baglylyk göni çyzykdan gyşaryp başlaýar. V_D ýokarlananda bosaga asty uçastogyň kertligi peselýär (S ýokarlanýar).

Başga häsiýetnamalar meňzeş parametrli abzallarda bar. V_D üýtgände häsiýetnamalaryň uly bolmadyk süýşmesi L*=7* mkm abzalda synlanýar. *3* mkm kanally MOÝ tranzistorda bosaga asty toklar we S ep-esli ýokarlanan. Iň gysga (L*=1,5* mkm) kanally abzalyň häsiýetnamalary adaty uzyn kanally abzallaryň häsiýetnamalaryndan tapawutlanýar (abzal *"öçürilenok"*).

Uzyn we gysga kanally abzallary çäklendirýän kriteriýalary adaty uzyn kanal MOÝ tranzistoryň iki häsiýetinden birini ulanyp kesgitlemek bolar: 1) çykalga togynyň $I_D \sim 1/L$ kanalyň uzynlygyna ters proporsional baglylyk; 2) adaty abzalyň bosaga asty togunyň $V_D > kT/q$ bolanda çykalganyň napryýaženiýesine bagly dällik. Bu ýerde I_D- V_T bosaga napryýaženiýe deň, V_G burmadaky napryýaženiýede tranzistorlaryň çykalgadaky togy, $\Delta I_D / I_D$- $V_G = V_T$ bolanda we V_D çykalganyň iki dürli napýaženiýelerinde toklaryň otnositel tapawudy. Gysga kanally alyp baryşyň başyny $\Delta I_D \sim I_D$ otnositel tapawut *0,1* deň bolanda we $I_D \sim 1/L$ uzynkanally baglylykdan çykalganyň togunyň gyşarmasy *10%* düzende hasap ederis.

MOÝ tranzistorlarda ýerine ýetirilen, onuň parametrleri giň çäklerde üýtgedildi (burma asty okiseliň galyňlygy *100-1000* A, esasda garyndynyň konsentrasiýasy *10*^{14}*-10*^{17} cm^{-3}, çykalgada *5* W çenli napryýaženiýede geçişleriň çuňlugy *0,18-1,5* mkm) uly mukdardaky ölçegleriň netijeleri ýönekeý gatnaşyk bilen umumylaşdyrylýar.

$$L_{\min} = 0{,}4\left[r_j d(W_S + W_D)^2\right]^{1/3} \equiv 0{,}4(\gamma)^{1/3}. \quad (24.1.1)$$

bu ýerde $L_{\min}$- kanalyň minimal uzynlygy, onda bosaga asty uçastok uzyn kanally häsiýetini saklaýar, mkm; r_j - geçişleriň çuňlygy, mkm; d - okisel gatlagyň galyňlygy, A; $W_S + W_D$ - çykalganyň we girelgäniň garyplaşan gatlaklarynyň galyňlyklarynyň jemi, birölçegli basym $p-n$-geçişiň golaýlaşmasynda

hasaplanan.

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}(V_D + V_{bi} + V_{BS})} \quad [mkm],$$

(24.1.2)

bu ýerde V_{bi} -geçişiň kontakt tapawudy, V_{BS} -esasda naprýaženiýe çykalganyň nul naprýaženiýesinde (V_D =0) W_D -iň galyňlygy W_S -e deň.

Uzyn kanally häsiýetiň gyşarmasynyň birinji golaýlaşmasynda elektroneýtrallyk prinsipi ulanyp, analizläp bolýar.

$$Q'_M + Q'_O + Q'_n + Q'_B = 0,$$

(24.1.3)

bu ýerde Q'_m - burmada doly zarýad, Q'_O - okiseliň doly effektiw zarýady, Q'_n - inwersion gatlagyň doly zarýady, Q'_B - bosaga astynda garyplaşma oblastda ionlaşdyrylan garyndynyň doly effektiw zarýady. $C_i A$ bölüp, bu gatnaşygy aşakdaky görnüşde ýazyp bolýar

$$V_G = V_{FB} + \psi_s + Q'_B / C_i A,$$

(24.1.4)

bu ýerde V_{FB} - tekiz zonalaryň naprýaženiýesi, ψ_s - üst potensial we A - meýdan. V_T bosaga naprýaženiýeni (3.1.4) aňlatma ψ_s =2 ψ_B goýup alarys:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + Q'_B / C_i A$$

(24.1.5)

Uzyn kanally abzal üçin $Q'_B = qN_A WA$, bu ýerde W - garyplaşan gatlagyň galyňlygy. Gysga kanally abzallarda Q'_B -iň bosaga napryaženiýä täsiri kiçelýär, sebäbi kanalyň gyra oblastlarynda çykalganyň we girelgäniň golaýynda zarýadlanan garyndy atomynda güýç çyzyklaryň bölegi gapdala gidýär, ýokary legirlenen n^+ oblastlarda V_D *>0* bolanda garyplaşan oblast girelgäniň golaýyna garanyňda çykalganyň golaýynda giň. Üst gatlakda potensialy bölüşdirmeklige kese elektrik meýdanlaryň täsirini hasaba almak bilen y_S we y_D garyplaşmanyň *“gorizontal”* galyňlygy W_S we W_D garyplaşmanyň *“wertikal”* çuňlugyndan birneme az bolup galýar.

Q'_B garyplaşan gatlagyň effektiw zarýadynyň azalmagy netijesinde, burmada napryaženiýeniň berlen bahasy üçin ψ_s üst potensial ýokarlanýar, bu bosaga asty toklaryň ýokarlanmagyna getirýär. Üst potensialy indiki görnüşde ýazmak bolýar:

$$V_G - V_{FB} = \psi_s + \frac{1}{C_i}\sqrt{q\varepsilon_s N_A(\psi_s + V_{BS})/2}\left(1 + \frac{L - W_D - W_S}{L - y_D - y_S}\right)$$

(24.1.6)

bu ýerde W_D we W_S (3.1.2) aňlatma bilen kesgitlenýär.

$$y_S \simeq \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}(V_{bi} - \psi_s)}$$

(24.1.7 a)

we

$$y_D \simeq \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}(V_{bi} - \psi_s + V_D)}.$$

(24.1.7 b)

Bosaga asty tok üçin:

$$I_D = \mu_n\left(\frac{Z}{L - y_S - y_D}\right)\frac{aC_i}{2\beta^2}\left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2(1 - e^{-\beta V_D})e^{\beta\psi_s}(\beta\psi_s)^{1/2}.$$

(24.1.8)

Bu aňlatma (1.3.4) aňlatmadan kanalyň uzynlygynyň kiçiligi bilen tapawutlanýar:

$$L_{eff} = L - y_S - y_D.$$

(24.1.8 a)

Bosaga naprýaženiýeleri. Birinji golaýlaşmada gysga kanally abzalyň bosaga naprýaženiýesiniň ululygyny ýönekeý geometriki düşünjeleri ulanyp, bahalamak bolýar. $Q_B^{'}$ effektiw doly zarýad burmanyň aşagynda trapeseideal oblastda ionlaşdyrylan garyndylaryň zarýadyna deň diýip hasap ederis:

$$\frac{Q_B^{'}}{Z} = qN_A W_m\left(\frac{L + L^{'}}{2}\right).$$

(24.1.9)

Adaty tirgonometrik gatnaşyklardan $L + L^{'}$ üçin indiki aňlatmany alarys:

$$\frac{L + L^{'}}{2L} = 1 - \frac{r_j}{L}\left(\sqrt{1 + \frac{2W_m}{r_j}} - 1\right).$$

(24.1.10)
Munda bosaga naprýaženiýeniň süýşmesi

$$\Delta V_T = \frac{1}{C_i}\left(\frac{Q_B^{'}}{ZL} - qN_A W_m\right) = -\frac{qN_A W_m}{C_i}\left(1 - \frac{L+L^{'}}{2L}\right) = -\frac{qN_A W_m r_j}{C_i L}\left(\sqrt{1+\frac{2W_m}{r_j}} - 1\right).$$

(24.1.11)

Esasda çykalga naprýaženiýeniň we naprýaženiýeniň täsirini hasaba alamak üçin (24.1.11) aňlatmany modifisirlenen görnüşde ýazalyň:

$$\Delta V_T = -\frac{qN_A W_m r_j}{2C_i L}\left[\left(\sqrt{1+\frac{2y_S}{r_j}} - 1\right) + \left(\sqrt{1+\frac{2y_D}{r_j}} - 1\right)\right],$$

(24.1.12)

bu ýerde y_S we y_D (24.1.7) aňlatmalar bilen kesgitlenýär,

$$W_m = \sqrt{2\varepsilon_s(2\psi_B + V_{BS})/qN_A}.$$

(24.1.13)

Bosaga naprýaženiýä burmanyň gapdal serhedindäki gyra effekti kesgitli täsir edýär. Munda bosaganyň süýşmesi garyplaşma oblast burmanyň gapdal gyrasyna çykýanlygy bilen şertlendirilen (Z ugurda, I_D toga perpendikulýar). Bu giňişlik zarýadynyň gyra bölegini silindrik hasap etsek, garyplaşma oblastda doly zarýad üçin bolar

$$Q_{BT} = qN_A ZLW\left(1 + \frac{\pi}{2}\frac{W}{Z}\right).$$

(24.1.14)

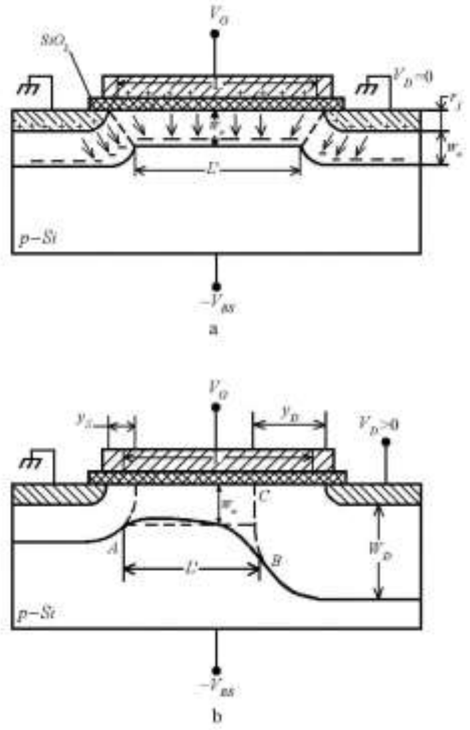
Bu aňlatmadan, giňişlik zarýadyň gapdal giňeltmesi

$1+\pi W/2Z$ ýük koeffisiýenti bilen suratlandyrylýanlygy görünýär. Netijede bosaga naprýaženiýeniň ýokarlanmasy synlanylýar:

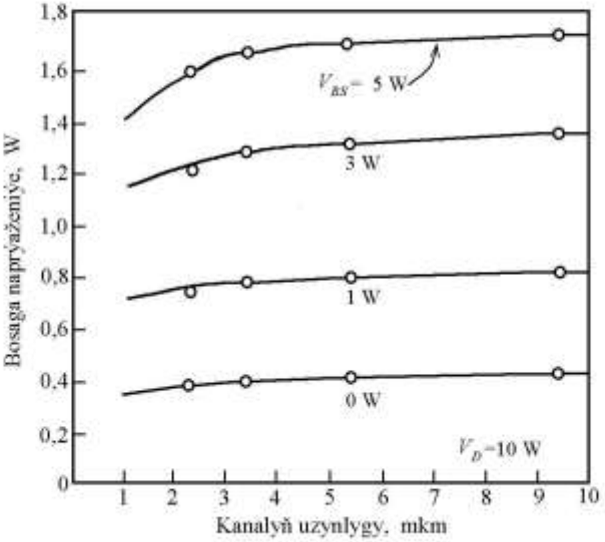
$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{BS})}}{C_i}\left(1 + \frac{\pi}{2}\frac{W}{Z}\right).$$

(24.1.15)

Duýulýan effekte, Z kanalyň giňligi W garyplaşma gatlagyň çuňlygy bilen deňeşdirerli bolan ýagdaýynda garaşmak bolýar. Şeýle, meselem, burmanyň giňligi $L=1$ mkm bolan abzal üçin V_T ýokarlanma 10^{16} cm^{-3} az, esasy legirleme derejesinde bolýar, mümkin bolýar.



Surat 11.1. Gysga kanally effektleriň modeli.



Surat 11.2. MOÝ tranzistor üçin bosaga napryaženiýeniň kanalyň uzynlygyna baglylygy

Çyzykly oblast we doýgun rejesi

Abzalyň kanalynyň oblastyna okiselden *150* keW energiýaly *2·10¹²* cm^{-2} boryň ionlaryň dozasy implantirlendi. Konsentrasiýanyň netijeleýji profilini x_s *=0,3* mkm çuňluk we *7·10¹⁶* cm^{-3} üst konsentrasiýa bilen basgançakly hasap etmek bolar. *0-5* W çykalga napryaženiýelerde γ parametr *3-10* mkm^3 çäklerde üýtgeýärdi, bu $L_{\min}$ *=0,6-0,9* mkm laýyk gelýär. Şoňa görä, seredilýän abzal uzyn kanally abzallara laýyk gelýär, oblastyň gyrasynda aralyk ýagdaýy eýeleýär. Birinji golaýlaşmada tranzistoryň doýgun toklaryny (1.2.16) aňlatmany ulanyp we oňa L deregine kanalyň redusirlenen effektiw

uzynlygyny goýup hasaplamak bolar. V_D-yň ösmegi bilen L_{eff} uzynlyk kiçelýär, bu I_D çykalga togynyň ýokarlanmagyny şertlendirýär.

Bu abzalyň häsiyetnamalary aýdyň aňladylan gysga kanally alyp barşy görkezýär. Onda V_D=0 bolanda çykalganyň we girelgäniň garyplaşan oblastlaryň gysylyşmasy bolup geçýär. Sebäbi $y_S + y_D$=0,26 mkm jem L kanalyň uzynlygyndan köp. Şoňa laýyklykda, çykalga naprýaženiýeleriň ähli diapazonynda seredilýän abzal gysylyşma rejede işleýär. Bu ýagdaýda girelgeden elektronlar kanalyň garyplaşan oblastynyň göwrümine inžektirlener. Ol ýerde, olar elektrik meýdan bilen tutulýar we şol bada çykalga bilen kollektirlenýär. Şunuň ýaly gysylyşma üçin talap edilýän, çykalgada naprýaženiýe

$$V_{pt} \simeq \frac{qN_A(L-y_S)^2}{2\varepsilon_s} - V_{bi}.$$

(24.2.1)

deň. Eger V_D bu ululykdan ýokary bolsa seredilýän inžeksiýa togy uçup geçme oblastda (zarýady) äkidijileriň süýşme tizlikli zarýadyň toplanmasyny çäklendirýär. Togy giňişlik zarýady bilen çaklendirmek diýip atlandyrlýan rejede

$$I_D \simeq 9\varepsilon_s \mu_n A V_D^2 / 8L^3.$$

(24.2.2)

bu ýerde A parametr ululyk tertibi boýunça girelgäniň $n^+ - p$ geçişiniň meýdanyna deň. V_D^2-a proporsional ýokarlanýan , I_D inžeksiýa togy ýarymgeçirijiniň göwrüminde inwersion kanalyň togyna parallel, V_G burmada naprýaženiýe proporsional akýar.

*Äkidijileriň köpelmesi we okisiň zarýadlanma*sy

Uzyn kanally abzallarda çykalgada ýokary naprýaženiýe bolanda egrelme oblastda çykalga bilen serhetde gowşak syrgyn böwsülme bolup geçýär. Munda generirlenen elektronlar bada-bat çykalga gidýärler. Generirlenen deşikler bolsa I_{BS} esas toguny döredip, esas bilen korrektirlenýär. Bu ýerde, şeýle hem tranzistoryň I_D çykalganyň doly togy we garyplaşma oblastda generasion-rekembinasion tok görkezilen. Burmada naprýaženiýe ýokarlananda I_{BS} esasyň togy ilki ýokarlanýar, soňra maksimumdan geçip, ýene kiçelýär. I_{BS} togyň şeýle alyp baryşyny indiki ýol bilen düşündirip bolýar. Aýdaly, ugry ionizasiýa ΔL kanalyň egrelme oblastynyň uzynlygy boýunça birhilli bolup geçýär diýeliň. Onda, I_{BS} esasyň togy üçin

$$I_{BS} = I_D \alpha \Delta L$$

(24.3.1)

ýazyp bolýar. Bu ýerde α - ugry ionizasiýa koeffisiýenti, ýagny uzynlygyň birliginde elektron bilen generirlenýän, elektron-deşik jübütleriň sany. Çykalgada berlen naprýaženiýede we V_G ýokarlananda I_D tok we V_{Dsat} naprýaženiýe birwagtda ýokarlanýar. Ýöne V_{Dsat} ösmegi bilen egrelme oblastda üst meýdan (V_D- V_{Dsat})/L kiçelýär. Bu α kiçelmegine getirýär. Şonuň üçin iki garşylykly faktor bar: 1) I_D ösüş V_G az bolanda

I_{BS} ýokarlanmany şertlendirýär. 2) α kiçelmegi burmada ýokary naprýaženiýelerde I_{BS} peselmegine getirýär. I_{BS} maksimum burmada naprýaženiýä laýyk gelýär. Onda iki faktoryň täsiri balansirlenen.

Gysga kanally abzallarda böwsülme oblastda generirlenen, deşikleriň togy bilen şertlenen goşmaça effekt döreýär. Çykalganyň we girelgäniň arasyndaky uzaklyk az bolanda we ýeterlik V_D çykalga napryýaženiýede bu deşikleriň köp bölegi esasa tarap dälde, girelgä tarap elektrik meýdan bilen gyzyklanýar.

Ýolda girelgäniň $n^+ - p$ geçişiniň energetik barýerine duşup, deşikler onuň daşky serhedinde ýygnanýarlar we geçiş *"açýarlar"*. Netijede girelge esasyň göwrümine elektronlary inžektirläp başlaýar. Olar çykalga bilen kollektirlenýär. Bularyň ählisi gysga kanally abzallarda parazit bipolýar $n-p-n$ (girelge-esas-çykalga) tranzistoryň *"işe goýberme"* mehanizmi bolup durýar. Bu prosesiň ösmegi strukturanyň elektrik böwsülmesine getirýär. Onuň başy aşakdaky şert bilen kesgitlenýär:

$$\alpha_{npn} M = 1 .$$

(24.3.2)

Bu ýerde α_{npn} - umumy bazaly çatgyda bipolýar tranzistoryň togunyň güýçlendirme koeffisiýenti:

$$\alpha_{npn} = \text{sech}(L_G / L_{diff}) \simeq 1 - \frac{L_G^2}{2L_{diff}} ,$$

(24.3.3)

bu ýerde L_G - bazanyň effektiw galyňlygy, ol ululygyň tertibi boýunça burmanyň uzynlygyna deň. L_{diff} - esasda diffuzion

uzynlyk, M köpeltmek koeffisiýenti aşakdaky görnüşde ýazyp bolýar:

$$M = \left[(1 - \left(\frac{BV_{CEO}}{V_{Dsub}} \right)^n \right]^{-1},$$

(24.3.4)

bu ýerde BV_{CEO}-umumy emitterli we arasy açylan bazaly çatgyda bipolýar tranzistoryň böwsülme napryýaženiýesi, V_{Dsub}- çykalga - esas geçişiň böwsülme napryýaženiýesi. Gysgakanally MOÝ tranzistoryň netijeleýji böwsülme napryýaženiýesi üçin (24.3.2)-(24.3.4) aňlatmalardan alarys:

$$V_B = BV_{CEO} \simeq \frac{V_{Dsub}}{2^{1/n}} \left(\frac{L_G}{L_{diff}} \right)^{2/n}.$$

(24.3.5)

Gysga kanally abzallaryň işi üçin mahsus uly meýdanlarda ýüze çykýan beýleki effekt okisiň zarýadlanmasy bolup durýar. Ýokary boý elektrik meýdanlarda elektronlaryň bölegi kanalda hereket edip, $Si - SiO_2$ serhetde energetik barýeri geçmek üçin ýeterlik energiýa çenli gyzýar we okisele inžektirlenýär. Gyzgyn elektronlar çykalga bilen serhetde kanalyň egrelme oblastynda syrgyn böwsülmäniň elektron-deşik plazmasyndan okisele inžektirlenip bilýär. Mundan başaga-da SiO_2 esasyň göwrüminde termiki generirlenen we bölegiň serhedine ýolda uly kese elektrik meýdany bilen gyzdyrylan elektronlar bilen inžektirlenip bilýär. Birinjiden, okisiň zarýadlanmasynda bosaga napryýaženiýe has položitel bolýar. Ikinjiden, kanalda süýşme tizligiň peselmegi netijesinde MOÝ tranzistoryň kertligi pese düşýär. Mundan başga-da

üst ýagdaýlaryň dykyzlygynyň ýokarlanmagy bilen abzalyň bosaga asty toklary ösýär.

Okisiň zarýadlanmasy MOÝ tranzistoryň işiniň stabilligine täsir edýär we ahyrynda onuň gulluk etme möhletini kesgitleýär, sebäbi bu proses abzalyň işçi häsiýetnamalarynyň üznüksiz pese düşmegine getirýär. Pese düşmäni haýallatmak we abzalyň gulluk etme möhletini ýokarlandyrmak üçin MOÝ tranzistoryň işçi naprýaženiýeleriniň maksimal amplitudasyny çäklendirmek bolýar.

Parazit tranzistoryň täsirini ýok etmek üçin girelgäni açmak üçin talap edilýän R_{sub} esasyň garşylygyny peseltmek gerek. Munda gysga kanally MOÝ tranzistoryň böwsülme naprýaženiýesi BV_{CEO} ululyk bilen çäklendirilmeýär we abzal has ýokary naprýaženiýelerde işläp bilýär. Bu ýokary ygtybarlygy üpjün edýär. Okisiň zarýadlanmasyny azaltmak üçin SiO_2-de elektron duzaklaryň dykyzlygyny azaltmaly. Gyslyşma naprýaženiýeni ýokarlandyrmak üçin esasyň üst oblastynda ýokary legirlenmeli bir ýa-da iki gezek ion-implantirlenen strukturalar ulanylýar.

11.5. MOÝ tranzistorlaryň strukturasy. MOÝ strukturaly meýdan tranzistorlary

.

MOÝ meýdan tranzistorlarynyň *dört esasy* görnüşi bar. Her abzal esasan, iki güýçli legirlenen esasa garşylykly garyndynyň oblastlaryndan - olar ***girelge*** we ***çykalga*** diýip atlandyrylýar, we ýuka okisel gatlagyň ýokarsynda ýatan *metal* **burmadan** durýar. Burmanyň naprýaženiýesi kanalda girelge bilen çykalganyň arasynda zarýadlaryň hereketini sazlaýar. Bu abzallar kanalyň görnüşi boýunça (n - kanally we p - kanally) we iş rejesi boýunça (normal ýagdaý ***açyk*** we normal ýagdaý ***ýapyk***) böleklere bölünýär. Norma ýagdaýy *açyk* abzallar ***garyplaşan görnüşli abzallar*** diýip atlandyrylýar. Garyplaşan görnüşli abzallaryň kanalynyň çykalga bilen girelgäniňki ýaly geçirijilik görnüşi bar. Normal ýagdaýy *ýapyk* baýlaşdyrylan görnüşli abzallarda kanal girelgä we çykalga garanyňda garşylykly garyndy bilen legirlenen. Şeýle abzaly açmak

üçin burma bilen esasyň arasyna naprýaženiýe goýýarlar, netijede inwersion gatlak emele gelýär.

Sanly IMS-iň elementi hökmünde MOÝ meýdan tranzistorlarynyň öndürilmegi önümçilik prosesiniň tapgyr sanynyň azlygy we çykýan ýaramly önümleriň ýokary göterimi arkaly bipolýar tehnologiýa ýakymly alternatiwa bolup durýar. Häzirki wagtda senagatda çykarylýan sanly MOÝ BIS-leriň atlarynyň ynandyryjy sanawy bar. Aşakda şeýle ýagdaýyň esasy sebäpleri getirilen:

1. MOÝ çatgylarda rezistorlar gerek däl. *10* kOm*/garşylykly* kiçijik görnüşli rezistorlaryň rolyny oýnaýar.

2. Burma bilen kanalyň arasyndaky gorag gatlagy arkaly, hemişelik giriş signalda MOÝ tranzistoryň giriş garşylygy 10^{15} Om tertipde bolar. Burma - kanal kondensatoryň zarýady üçin burmanyň minimal togy gerek, bu çykyş boýunça ýokary şahalanma koeffisiýenti almaga mümkinçilik berýär.

3. Baýlaşdyrylan görnüşli abzalyň adaty ýagdaýy - ýapyk. Abzaly açmak üçin burma bilen esasyň arasynda - 1W naprýaženiýe bermek talap edilýär.

4. MOÝ meýdan tranzistorlarynyň ýokary çykyş garşylygy we burmanyň soňky sygymy ony huşuň elementi hökmünde ulanmaklyga amatly edýär

Ölçeglerininň masştably kiçeldilmesi

Öň ýokarda aýdylyşy ýaly, gysga kanally effektler MOÝ tranzistorlaryň işçi häsiýetnamalaryny ýaramazlaşdyrýar we şonuň üçin olar islenilmeýär. Bu effektleri ýok ediş usullarynyň biri abzalyň ähli ölçeglerini proporsional kiçeltmek bolup durýar. Bu ýagdaýda abzalda daşky elektrik meýdanlar öňki derejede galar ýaly edip işçi naprýaženiýeleriň bahalaryny şonça gezek kiçeltmek gerek. Ölçegleriň şeýle masştably kiçeldilmesi MOÝ tranzistorlary miniatýurlaşdyrmak meselesine ýönekeý çemeleşmedir.

Ikinji abzalda esasyň legirlenme derejesi adaty abzala garanyňda $æ$ gezek köp. Iýmitlendiriji naprýaženiýe hem $æ$ gezek kiçeldilen bolansoň garyplaşan oblastlaryň galyňlygy $æ$ gezek az bolup galýar. Masştably kiçeldilen strukturanyň bosaga

napryaženiýasynyň hem æ gezek kiçeldilendigini belläliň. Masştably kiçeldilen strukturanyň bosaga naprýaženiýesi hem æ gezek kiçeldildi. Aýratyn abzala mahsus ölçegleriniň şeýle proporsional kiçeldilmesi kristalda abzallaryň ýerleşdirme dykyzlygyny $æ^2$ gezek ýokarlandyrýar, mahsus bolan saklanma wagtyny æ gezek kiçeldýär we kuwwaty kiçeldýär.

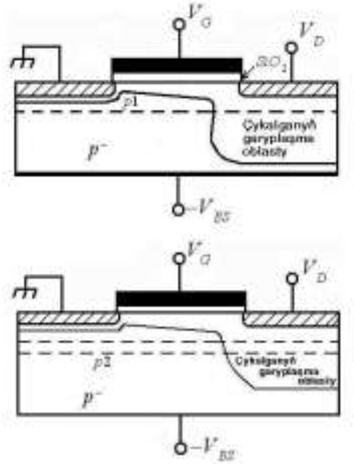
Iki abzalyň häsiýetnamalarynda hem bosaga asty toklaryň oblastynyň birmeňzeşligine üns bereliň. Bu geň däldir, sebäbi şeýle masştably özgertmede mahsus S ~(1+ C_D/C_i) naprýaženiýe üýtgewsiz galýar (C_D we C_i sygymlar æ gezek ýokarlandy). V_{ib} geçişleriň kontakt tapawudy we ψ_B üst potensial peselmeýär, gaýta ýokarlanýar (legirlenme derejesi *10* gezek ýokarlananda *~10%*-e). Şonuň üçin hem garyplaşma rejä we güýçli inwersiýanyň başyna laýyk gelýän burma naprýaženiýeleriň tapawudy hem üýtgemeýär. Ölçegleriň şeýle masştably kiçeldilmesinde parazit sygymlar kiçelmän hem bilýär. Garşylygy adaty ölçegleriň kiçelmegi bilen ýokarlanýar.

Ýokary hilli MOÝ strukturalar (HMOS)

Şeýle, ion imlantasiýasyny ulanmak bilen taýýarlanan MOÝ tranzistorlar atlandyrylýar. 25.1-nji a suratda görkezilen struktura bir implantirlenen naprýaženiýesini barlaýar we belli bir derejede girelgäniň we çykalganyň garyplaşan oblastlarynyň gyslyşmasyna päsgel berýär. Bu ýerde implantirlenen gatlagyň ýeterlik darlygyny we çykalganyň garyplaşan oblastynyň onuň çäginden peslegirlenen esas çykýandygyny belläliň. Bu MOÝ tranzistora ýeterlik kiçi çykyş sygymyny üpjün edýär (çykalga - esas geçişiň sygymy). 25.1-nji b suratda iki ion implantasiýaly struktura görkezilen. Birinji implantirlenen gatlagyň P_1 parametrleri MOÝ tranzistora talap edilýän bosaga naprýaženiýeni üpjün etmek üçin saýlanylýar, P_2 ikinji gatlagyň häsiýetnamalary bolsa ters naprýaženiýeniň öňüni

almak üçin saýlanylýar. Ikili ion implantasiýasyny ulanmaklyk kanallary fiziki kiçi uzynlykly MOÝ strukturalarda gysga kanally effektleri minimizirlemäge rugsat berýär.

Implantasiýa häsiýetnamalaryň bosaga asty uçastogyny erbetleşdirýär we V_{BS} esasyň ters napryaženiýesine bosaganyň duýgurlygyny ýokarlandyrýar. Bu islenilmeýän effektleri strukturanyň parametrleriniň optimizasiýasynda hasaba almak zerur.



11.1 surat Ýokary hilli MOÝ-struktura (HMOS)

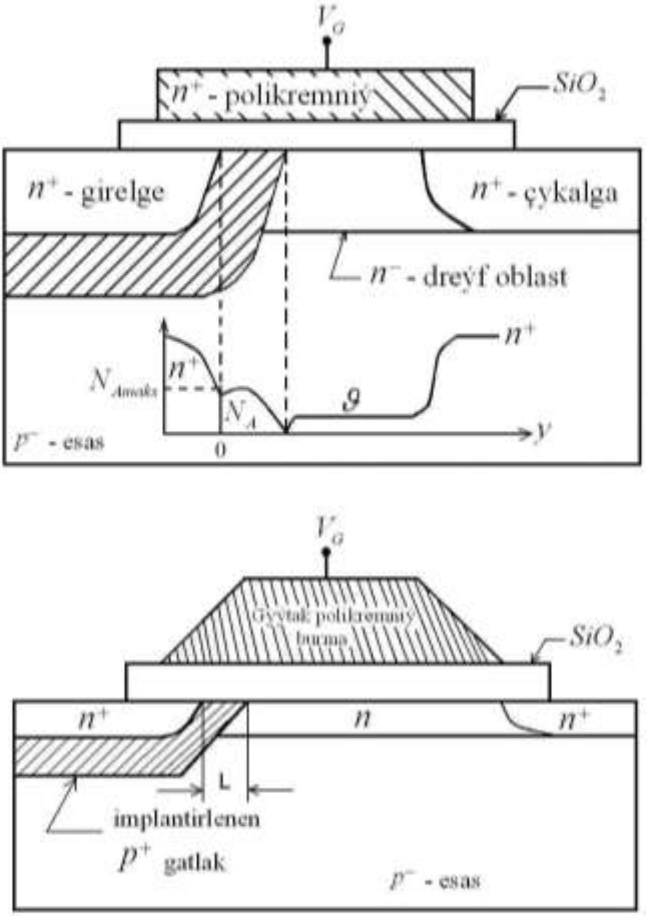
Ikili diffuziýaly MOÝ strukturalar (DMOS)

25.2-nji a suratda çatgysy görkezilen MOÝ struktura ikili diffuziýa diýip atlandyrylýany ulanmak bilen taýýarlandy. Bipolýar tehnologiýada giňden ulanylýan, bu proses kremniýde p - garyndynyň diffuziýasynyň tizligi (meselem bor) n - garynda garanyňda ýokarlygyna (meselem fosfor) esaslanan. Seredilýän ýagdaýda ol gysga kanally strukturalary almaga rugsat berýär. 25.2-nji a suratda şeýle strukturada okisel bilen serhediň boýuna legirlenme profil görkezilen. Kanalyň yzyndan pes legirlenen dreýf oblast gelýänligini belläliň. Iki gezek ion implantasiýasyny ulanmak bilen taýýarlanan meňzeş strukturada örtük hökmünde tranzistoryň polikremniý burmasy ulanylýar. Onuň gyşaran gyralary

implantirlenen P - oblastyň okisel bilen serhede çykmagyny üpjün edýär.

Şeýle strukturalaryň örän gysga kanallary bolup biler we olar taýýarlananda adaty litografiki proses ulanylýar. P - gatlakda garyndynyň ýokary konsentrasiýasy zerarly iki struktura hem gyslyşma gatnaşyk boýunça durnukly. Peslegirlenen dreýf oblast ≥ 10^{-4} $W \cdot cm^{-1}$ derejede kanalda elektrik meýdany stabilleşdirip, ýük ýaly hyzmat edýär. Maksimal elektrik meýdanlaryň şeýle çäklendirmesi strukturada islenilmeýän zarýady äkidijileriň syrgyn köpelme we okisiň zarýadlanma prosesleriniň ösmegine päsgel berýär. Bu babatda ikili diffuziýaly strukturalaryň standart we $HMOS$ - tehnologiýa boýunça taýýarlanan MOÝ tranzistorlaryň öňünde esli artykmaçlygy bar.

Ýöne bu strukturalarda MOÝ tranzistoryň bosaga naprýaženiýesini barlamak kyn. Ol okisel bilen serhetde N_{Amaks} konsentrasiýanyň maksimal bahasy bilen kesgitlenýär. Mundan başga, çykalganyň girelge bilen gyslyşmasynyň öňüni almak üçin zerur bolan dar p - gatlakda garyndynyň ýokary konsentrasiýasy MOÝ tranzistoryň ýapyk ýagdaýyna laýyk gelýän, häsiýetnamalaryň bosaga asty uçastogyny erbetleşdirýär.



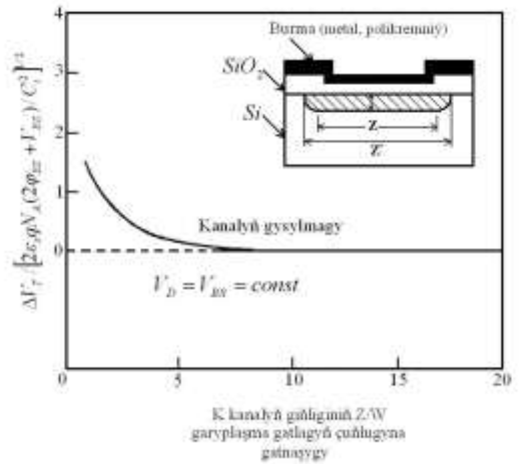
Surat 11.2. Ikili diffuziýaly MOÝ struktura.

Çuňlaşdyrylan kanally MOÝ tranzistorlar

Bu abzalyň konstruksiýasy, 25.3-nji suratda görkezilen, empiriki gatnaşykda esaslanan, miniatýurlaşdyrma konsepsiýasyny

ulanmaklygyň mysaly bolup hyzmat edýär: $L_{\min}$ kanalyň minimal uzynlygy, onda entek MOÝ tranzistoryň elektrik häsiýetnamalaryň *"uzynkanallylygy"* saklanýar we $r_j^{1/3}$ kanun boýunça geçişleriň çuňlugynyň kiçelmegi bilen kiçelýär. 25.3-nji suratda getirilen bosaga naprýaženiýeniň kanalyň uzynlygyna baglylyklary r_j kiçelmegi bilen gysga kanal effektleriň minimizasiýasyny görkezýär. Seredilýän çuňlaşdyrylan kanally konstruksiýanyň (gurnama) r_j nula çenli we otrisatel bahalara çenli peseltmäge rugsat berýänligini görmek bolýar.

Çuňlaşdyrylan kanally strukturalaryň ýetmezçiligi, submikron ölçegli abzallar üçin mahsus talap edilýän *"çukurjygyň"* emele gelmeginde ýüze çykýan tehnologik kynçylyklar bolup durýar. Mundan başga, şeýle geometriýada A we B *"burçlarda"* okiseliň galyňlygy erbet barlanylýar. Ol tranzistoryň bosaga naprýaženiýesini kesgitleýär. Şeýle hem çuňlaşdyrylan kanally strukturalarda gyzgyn elektronlaryň has intensiw inžeksiýasy netijesinde okiseliň zarýadlanmasynyň ýokarlandyrylan tizligine garaşmak bolýandygyny belläp geçeliň.



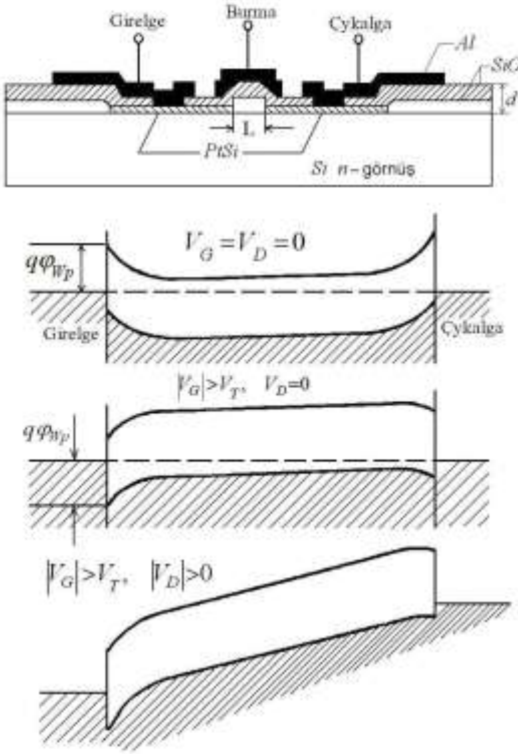
Surat 11.3 Bosaga naprýaženiýäniň kanalyň uzynlygyna hasap we tejribe baglylyklar.

Şottkiniň barýerleri girelge we çykalga hökmünde

MOÝ tranzistorlaryň girelgesi we çykalgasy hökmünde Şottkiniň barýerlerini ulanmaklygyň abzallaryň işçi häsiýetnamalary we olary taýýarlamaklygyň tehnologiýasy nukdaý nazardan ençeme artykmaçlygy bar. Şeýle MOÝ struktura 25.4-nji suratda görkezilen. Şottkiniň barýerleriniň geçişiniň galyňlygy kiçi bolýar, bu gysga kanally effektleriň minimizasiýasy üçin amatly. Şottki kontaktlaryň ýokary geçirijiligi girelgäniň effektiw yzygider garşylygyň kiçi ululygyny üpjün edýär. Tehnologiýa nukdaý nazardan ençeme ýokary temperatura operasiýalary aýyrmaklyk okis gatlagyň hiliniň ýokarlanmagyna ýardam edýär we strukturanyň geometriýasyny gaýtadan döretmekligi ýeňilleşdirýär. Mundan başga, Şottki barýerli MOÝ tranzistorlar ýarym geçirijilerde taýýarlanyp bilner (meselem CdS ýalylarda), olarda ýeterlik hilli $p-n$- geçişleri alyp bolmaýar.

25.4-nji suratda termodinamik deňagramlylyk

($V_G = V_D = 0$) şertlerde strukturanyň zona diagrammasy getirilen. Bu ýerde $q\varphi_{Bn}$ - metal bilen n - esasyň arasyndaky energetik barýeriň beýikligi (meselem, $PtSi-Si$ kontakt üçin $q\varphi_{Bn}$ =0,85 eW). Ýarym geçirijiniň üst oblastyny n - görnüşden p - görnüşe burmada napryýaženiýe ýeterlik ýokary bolanda girelge bilen p - inwersion gatlagyň arasyndaky energetik barýer $q\varphi_{Bp}$ =0,25 eW deň (şol bir $PtSi-Si$ kontakt üçin). Termoion emissiýa şeýle kiçi barýeriň üstünden strukturanyň inwersion gatlagyna deşikleriň ýeterlik sanyny eltýär, ol ýerde olar çykalganyň Şottki kontaktyna elektrik meýdan bilen gyzyklanýarlar. Abzalyň bu işçi rejesinde girelgäniň Şottki barýeri otag temperaturalarda 0,25 eW beýiklikli barýerden termoion toguň dykyzlygy ~10^3 $A\cdot cm^{-2}$ düzýär. Ony ulaltmak zerurlygynda n - kremniýa garanyňda energetik barýeri uly beýiklikli Şottki kontaktlary ulanmak gerek.



Surat 11.4 Girelge we çykalga hökmünde Şottki barýerli MOÝ tranzistor

11.6. Ýuka plýonkaly tranzistor

Ýuka plýonkaly tranzistoryň (ÝPT) çatgysy 26.1-nji suratda şekillendirilen. Onuň strukturasyny goraýjy esasyna yzygiderli çalynan ýarymgeçiriji (mysal üçin, CdS), dielektrik we metal gatlaklary düzýär. Ýuka plýonkaly tranzistorlaryň baýlaşdyrylan görnüşleriniň wolt-amper häsiýetnamalary ýönekeý MOÝ

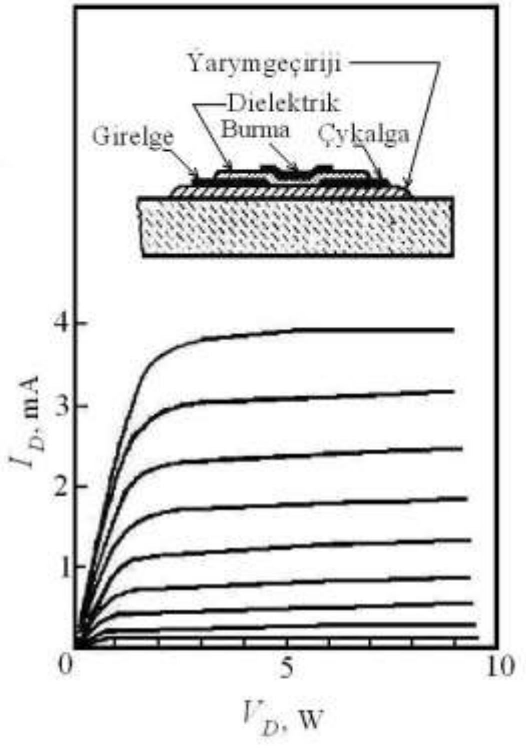
tranzistorlaryň häsiýetnamalaryna laýyk gelýär. Ýuka plýonkaly tranzistorlarda ýarymgeçiriji plýonka köplenç ýönekeý pürkilme boýunça çalynýar, onda kristalliki gözenegiň bozulmalary we uly bolan kemçilikleriň sany, monokristalliki nusgalara garanyňda köp saklanýar. Şonuň üçin hem munuň ýaly plýonkalarda transport ýagdaýy monokristallara garanyňda kyn. Ýuka plýonkaly tranzistorlaryň ygtybarlylygyny we gaýtadan işläp çykarylyşyny, esbap häsiýetnamasyny gowylandyrmak üçin, ýarymgeçiriji plýonkada göwrümiň we üstki garymyň dykyzlygyny peseltmeli.

“Daşky goragda kremniý” görnüşli strukturalar.

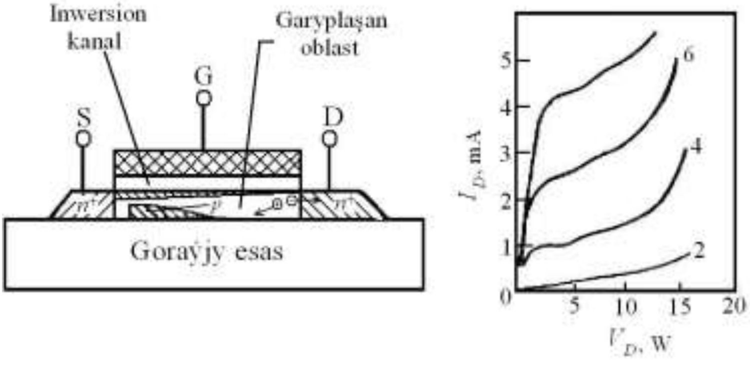
Häzirki wagtda “Daşky goragda kremniý” görnüşli strukturalar örän köp hödür edilýär: kremniý sapfirde (K.S), kremniý şpinelde, kremniý nitritde we kremniý okisde. Daşky goragly kremniý esbaplary monokristallik kremniý plýonkaly standart MOÝ tilsimaty boýunça formirlenýärler, ol daşky goraýjy esasda (mysal üçin KS-de Al_2O_3 bolýar) epitaksial ösdürilen. Munuň ýaly strukturanyň çatgysy 26.2-nji a suratda getirilen. Geçirmeýji esas goňşy esbaplaryň elektrik daşky goragyny üpjün edýär. DGK-gurluşlaryň pes peýdasyz sygymlary bar, bu bolsa esbaplaryň çalt işleýşini üpjün edýär. DGK esbabyň n - kanally häsiýetnamalaryň görnüşleri 26.2-nji suratda görkezilen. Häsiýetnamalaryň doýgunlyk aralygyndaky epmäni indiki nusgada düşündirip bolar. Haçanda akymyň naprýaženiýesi ulalanda, akyş kontaktyň ýakynyndaky aralykda naprýaženiýe köpelmäniň pesje ýagdaýy başlanýar. Munda öndürilýän elektronlar şol bada akyma barýarlar, öndürilen deşikler bolsa esasyň toguny düzüp çeşmä tarap hereket edýärler. Ýöne DGK - esbabyň esasa kontakty bolmansoň bu deşikler ony göni ugurda süýşürip akymyň çäginde üýşýärler. Munda esbap hakykatda V_{BS} >0 položitel garalan esasly rejede ýerleşýär, bu bug naprýaženiýeniň kiçelmesine ekwiwalentdir. Munuň bilen toguň syn edilýän bökmesi düşündirilýär. Bosaga naprýaženiýesiniň bökmeleriniň amplitudasy esasyň legirlenme derejesine bagly: konsentrasiýa näçe uly bolsa şonça - da V_T bökme uly we wolt-amper häsiýetnamalaryň epmesi şonça-da belli bolýar.

DGK abzallary taýýarlamak üçin işlerde Si_3N_4 we SiO_2 izolirleýji esaslarda amorf kremniýniň plýonkalaryny lazer bilen ýakmak rekristallizasiýasyny ulanmaklyk hödürlenen. Plýonkalaryň hilini gowylandyrmakda DGK abzallar aşa tiz täsir ediji çatgylarda giňden ulanylma tapardylar.

Mundan başga, DGK strukturalaryň esasynda laýyk gelýän tekiz baza DGK strukturalary biri-biriniň *"üstüne goýup"* mikroshemalaryň integrasiýasynyň üç ölçegli derejesini özleşdirmäge çemeleşmek bolardy.



Surat 11.1. Ýuka plýonkaly tranzistor we onuň çykalga häsiýetnamalary.



Surat 11.2. Goragda kremniý görnüşli MOÝ tranzistor we DGK - abzalyň çykyş häsiýetnamalary.

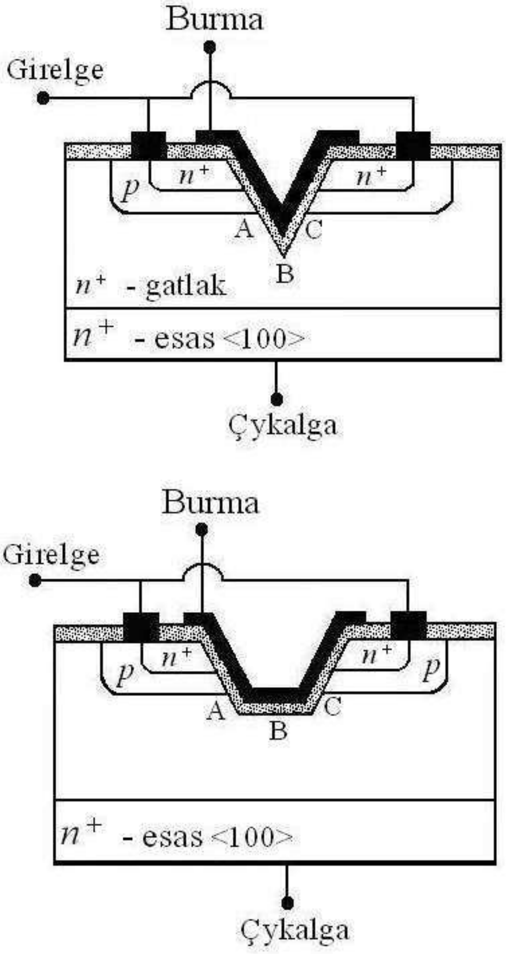
V-çukurjykly MOÝ tranzistor

V-çukurjykly MOÝ tranzistoryň strukturasy 26.3-nji a suratda, *U*-çukurjykly MOÝ tranzistoryň strukturasy bolsa 26.3-nji b suratda görkezilen. Bu abzallar anizotrop aýna effektiň esasynda <*100*> oriýentasiýa bilen kremniý esaslarda taýýarlanylýar. Oýulýan V-çukurjygyň kese tekizlige garanyňda *54,7^o* mahsus gyşarma burçy bar. 26.3-nji a suratda görnüşi ýaly bu ýerde legirleýän garyndylaryň ýerleşdirilişi ikili diffuziýaly MOÝ tranzistorlarda garyndylaryň ýerleşdirilişine meňzeş. Bu abzallarda iki biri-birine parallel L uzynlykly kanal oýulan çukurjygyň iki tarapynda ýerleşdirilen. Umumy çykalga bolup esas hyzmat edýär. Şeýle konfigurasiýada aýry abzallaryň talap edilýän sanyny parallel birleşdirmek ýeňil. Bu şeýle usul bilen uly toklara döz gelýän kuwwatly gaýta ulaşdyryjylary döretmäge mümkinçilik berýär. Çatgylary planly gurnamak talap edilen ýagdaýlarda, ýagny ähli kontaktlar kristallyň daş üstüne çykmaklygy gerek bolanda strukturadan n^+-oblasty aýyryp p-gatlagyň (p-i p^+-e çalşyrmak) legirlenme

derejesini ýokarlandyryp bolýar. Onda çep p^+-oblast çykalga, sag-girelge (ýa-da tersine), kanal *ABC* serhet boýunça ýerleşdirilen bolar.

Geksagonal MOÝ tranzistor

Geksagonal MOÝ tranzistor diýip atlandyrylýan struktura dykyz gaplanan massiw bolup durýar. Strukturanyň aýratyn öýjügi altyburç girelgeli we ikili diffuziýaly MOÝ tranzistor bolup durýar. Onuň daşky bölegi boýunça ýerleşdirilen insiz diffuzion kanal polikremniý burma bilen beklenen. Umumy çykalga bolup strukturanyň esasy hyzmat edýär. Geksagonal strukturanyň kristalda elementleri ýerleşdirmegiň ýokary dykyzlygy bar (~10^5 cm^{-2}). Giňligiň kanalyň uzynlygyna gatnaşygynyň uly bahalary ýokary kertligi we işledilen ýagdaýda kiçi çykyş garşylygy üpjün edýär. Häsiýetnamalaryň doýgun uçastogyna laýyk gelýän napryaženiýeleriň şeýle ölçegli bipolýar abzallaryňka meňzeş bahalary bar. Işledilen ýagdaýda çykyş garşylyk *0,05* Om düzýär. Zerur ýagdaýda GNZ/L gatnaşygy ulaldyp, az çykyş garşylyk alyp bolýar.



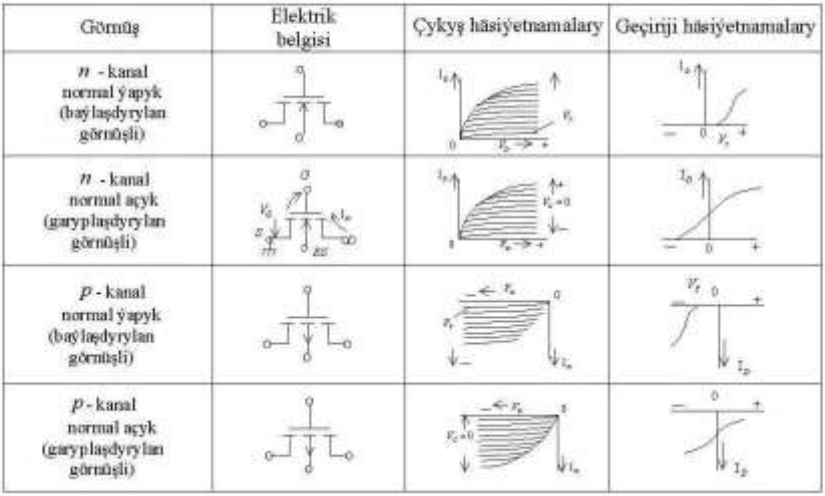
Surat 11.3. V-çukurjykly we U-çukurjykly MOÝ tranzistor.

MOÝ tranzistorlaryň belgilenişi

26.4-nji suratda *IIER* standartda MOÝ tranzistorlaryň belgilenişi getirilen. Ähli belgilenişlerde burma abzalyň galan böleginden aýry, ýagny tranzistoryň burmasy bilen galan böleginiň arasynda uly garşylygyň bardygyny aýan etmek üçin görkezilen.

Strelkanyň ugry ýarym geçiriji esasda garyndynyň görnüşini aňladýar (käwagt *B* harp, *body* - jisim iňlis sözüniň birinji harpy bilen belgilenýär). Abzalyň tarapyna ugrukdyrylan strelka esasyň p- görnüşdigini aňladýar. Bu n-kanal gurnama laýyk gelýär. Baýlaşdyrylan görnüşli MOÝ tranzistorlar ştrih dik çyzyk bilen görkezilen. Sebäbi, bu abzallar adaty şertlerde, ýagny burmanyň nul naprýazeniýesinde ýapyk. Garyplaşan görnüşli MOÝ tranzistorlar dik göni çyzyk bilen görkezilen, sebäbi burmanyň nul naprýaženiýesinde olar girelgeden çykalga tok geçirýärler.

MOÝ tranzistorlar taýýarlaýjylar tarapyndan esasy aýratyn birleşdirmek mümkinçilikli dörtçykyşly abzallar görnüşinde, ýa-da esasy girelgä içinden birleşdirilen üç çykyşly abzallar görnüşinde ýollaýarlar. Bu abzallaryň konstruksiýasy simmetrik bolany üçin girelgäniň we çykalganyň çykyşlary özara çalşyrmak bolýar.



11.4. surat. MOÝ- tranzistorlaryň elektrik belgileri, çykyş we geçiriji häsiýetnamalary.

MOÝ tranzistorlaryň görnüşleri

Üznüksiz giriş garşylykly güýçlendirijä we çykyşda toguň generatoryna ***ideal MOÝ tranzistor*** diýilýär. Real abzallaryň elektrik häsiýetleri has kyn ekwiwalent çatgy bilen görkezilýär. G_{in} giriş geçirijilik burma asty okiseliň ýuka gatlagynyň üstünden ýitgi togy bilen kesgitlenýär. Kremniýniň iki okisli gatlagynyň termiki aňladylanlary üçin burma bilen kanalyň arasyndaky tok ýitgisi (onuň dykyzlygy *10*$^{-10}$ $A \cdot cm^{-2}$ düzýär) örän az. C_{in} giriş sygymy $\partial Q_M / \partial V_G$ deň, bu ýerde Q_M - burmada doly zarýad. Real abzallarda okiseliň inçe gatlagy we burma girelge we çykalga oblastlary biraz ýapýar. Bu gyra effekt C_{fb} geçelge sygyma esasy goşant berýär. G_{out} çykyş geçirijilik $p-n$ geçiş çykalga geçirijilige deň. C_{out} çykyş sygym ýarymgeçiriji esasyň göwrüminiň üsti bilen yzygider birikdirilen girelgäniň we çykalganyň $p-n$ geçişleriň sygymydyr. MOÝ tranzistoryň çyzykly rejesinde abzalyň maksimal işçi ýygylygy

$$f_m = \frac{w_m}{2\pi} = \frac{g_m}{2\pi C_{in}} \simeq \frac{\mu_n V_D}{2\pi L^2} . \qquad (26.4.1)$$

Bu netije $C_{in} \simeq ZLC_i$ faktdan we (1.2.14) aňlatmadan gelip çykýar. Doýgun oblastda

$$f_m \simeq \frac{\vartheta_s}{2\pi L} , \qquad (26.4.2)$$

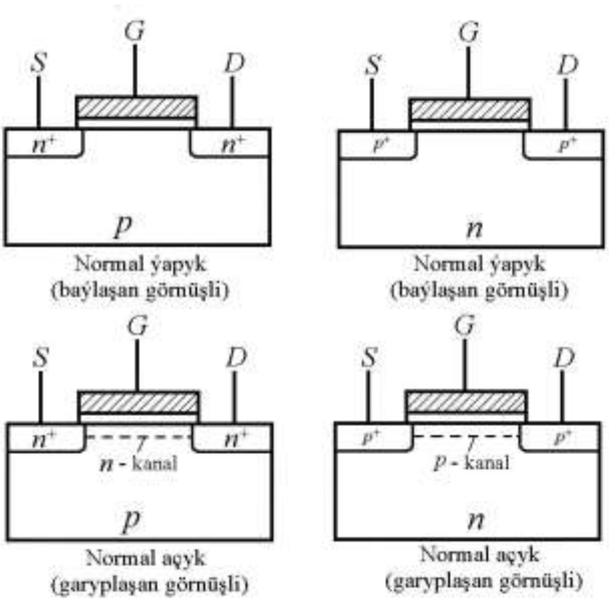
bu doýgunlyk tizlik bilen kanalyň uçup geçme wagtyna gabat gelýär

$$\tau = \frac{L}{\vartheta_s}. \qquad (26.4.3)$$

L=1 mkm we $\vartheta_s =$ 10^7 $cm \cdot s^{-1}$ üçin τ uçup geçme wagt 10 ps düzýär.

Inwersion kanalyň görnüşine baglylykda MOÝ tranzistoryň dört esasy görnüşlerini tapawutlandyrýarlar. Eger nul naprýaženiýede burmada kanalyň geçirijiligi örän az bolsa inwersion n kanaly döretmek üçin burma položitel naprýaženiýe bermeli. Şeýle abzal ***normal ýapyk*** n ***kanally MOÝ tranzistor*** diýip atlandyrylýar. Eger-de n kanal burmada nul naprýaženiýa bolanda bar bolsa, onuň geçirijiligini kiçeltmek üçin burma otrisatel garyplaşýan naprýaženiýa bermeli. Munuň ýaly abzal ***normal açyk*** n ***kanally MOÝ tranzistor*** diýip atlandyrylýar. n kanally abzallaryň ikisi hem 26.5-nji suratda görkezilen. p kanally MOÝ tranzistorlar hem şeýle klassifisirlenýär: ***normal ýapyk*** we ***normal açyk***.

Elektrik belgiler, MOÝ tranzistorlaryň bu dört görnüşiniň çykyş we geçiriji häsiýetnamalary 26.4-nji suratda getirilen. Normal ýapyk n kanally abzal üçin, çykalganyň duýulýan toguny almak üçin burma V_T bosaga naprýaženiýeden ýokary ýeterlikli uly položitel naprýaženiýe bermeli. Normal açyk abzallarda täsirli toklar V_G =0 bolanda akyp bilýär. Burma naprýaženiýe bolsa olaryň ululygyny ýokarlandyrýar ýa-da peseldýär. Ýokarda aýdylanlary naprýaženiýeniň polýarlygyny üýtgedip, p kanally abzallarda ulanmak bolýar.



Surat 11.5. MOÝ tranzistorlaryň esasy görnüşleri.

11.7. Huşuň energiýa bagly däl elementleri

Eger adaty MOÝ tranzistoryň burmasyny burma asty dielektrikde elektrik zarýady saklanar ýaly modifisirleseň, onda biz täze abzal-huşuň energiýa bagly däl elementini alarys. 1967-nji ýyl birinji şeýle abzal hädürleneni bäri huşuň energiýa bagly däl elementleri giňden ösüşe we ýaýrama eýedir. Olaryň esasynda häzirki wagtda ýarymgeçiriji integral ýatda saklaýan gurluşlaryň giň topary, elektrik reprogrammirlenýän hemişelik ýatda saklaýan gurluşlar, bozmaly programmirlenýän hemişelik ýatda saklaýan gurluşlar, erkin nusgaly energiýa bagly däl ýatda saklaýan gurluşlar we ş.m. işläp düzülýär we taýýarlanylýar.

Huşuň energiýa bagly däl elementlerini iki topara bölmek bolýar; ýüzýän burmaly abzallar we iki gat dielektrikli - *MDOÝ* (metal-dielektrik-okisel-ýarymgeçiriji) strukturalar. Olara zarýadyň *"ýazgysy"* okisel gatlagyň üsti bilen kremniýden zarýady äkidijileriň

inžeksiýasy bilen amala aşyrylýar. Zarýad ýa ýüzýän burmada, ýa-da ikinji dielektrik bilen okiseliň serhedinde (MDOÝ strukturalar) saklanýar. Bu zarýad MOÝ tranzistoryň bosaga naprýaženiýesini üýtgedip, abzaly ýokary bosagaly ýagdaýa *"süýşürýär"*. Gowy konstruirlenen öýjükde şeýle ýagdaý 100 ýyldan köp saklanýar. Saklanýan zarýady *"bozma"* (abzaly pes bosagaly başlangyç ýagdaýa gaýtaryş) ýa elektriki (burmada laýyk gelýän naprýaženiýeniň impulslarynyň kömegi bilen), ýa-da käbir başga usullar bilen, meselem strukturany ultramelewşe şöhlelendirme bilen amala aşyrylýar.

Ýüzýän burmaly abzallar

Ýüzýän burmaly strukturada okiseliň birinji ýuka gatlagynda I(1) daşky metal burmadan M(2) dielektrigiň galyň gatlagy bilen bölünen metal elektrod M(1) - ***ýüzýän burma*** ýerleşdirilen (27.1.surat).

Strukturanyň daşky burmasyna M(2) berilen V_G naprýaženiýe iki dielektrik gatlaklaryň arasynda bölünýär:

$$V_G = V_1 + V_2 = d_1E_1 + d_2E_2,$$

(27.1)

bu ýerde E_1 we E_2 - bu gatlaklarda elektrik meýdanynyň güýjenmesi.

Gaussyň kanunyna laýyklykda,

$$\varepsilon_1E_1 = \varepsilon_2E_2 + Q,$$

(27.2)

gatlaklaryň her bir birinde elektrik meýdany aşakdaky görnüşde ýazmak bolýar:

$$E_1 = \frac{V_G}{d_1 + d_2(\varepsilon_1/\varepsilon_2)} + \frac{Q}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2(d_1/d_2)},$$

(27.3)

bu ýerde Q - ýüzýän burmada zarýad, ε_1 we ε_2 - birinji we ikinji dielektrik gatlaklaryň dielektrik geçirijilekleri.

Eger dielektrik gatlaklaryň ikisinde toklar biri-birine deň bolmasa, Q ýüzýän burmanyň zarýady wagt boýunça üýtgär:

$$Q(t) = \int_0^t \left[J_1(E_1) - J_2(E_2)\right] dt \qquad \left[Kl \cdot cm^{-2}\right]$$

, (27.4)

bu ýerde $J_1(\varepsilon_1)$ we $J_2(\varepsilon_2)$ - *1* we *2* dielektriklerde togyň dykyzlygy.

Köplenç dielektriklerde toklar elektrik meýdanyň güýjenmesine köp baglydyr. Şeýle, meselem Fauler - Nordgeýmyň mehanizmi boýunça tunellemede

$$J = C_1 E^2 \exp\left(-E_0 / E\right),$$

(27.5)

bu ýerde E - elektrik meýdan, C_1 we E_0 - zarýady äkidijileriň effektiw massasyna we barýeriň beýikligine bagly konstantalar. Öň aýdylyşy ýaly, berlen geçirijilik mehanizmi SiO_2 we Al_2O_3 ýuka gatlaklarda esasy roly oýnaýar. Haçanda dielektrikde zarýadyň ulagy Pul-Frenkeliň mehanizmi boýunça amala aşyrylanda, onda

$$J = C_2 E \exp\left[-q\left(\varphi_B - \sqrt{qE / \pi\varepsilon_i}\right)/ kT\right],$$

(27.6)

bu ýerde C_2 - dielektrikde garymlaryň dykyzlygyna proporsional konstanta; φ_B - garymyň çuňlugy, ε_i - dinamiki dielektrik geçirijilik (syzyjylyk).

Daşky burma berlen V_G uly položitel napryaženiýeniň hereket etme wagtynyň dowamynda *1* we *2* dielektriklerde toklaryň balansynyň bozulmagy netijesinde ýüzýän burmada Q zarýad ýygnanýar. Ol strukturanyň bosaga napryaženiýesini aşakdaky ululyga süýşürýär:

$$\Delta V_T = -\frac{d_2}{\varepsilon_2} Q \quad . \qquad (27.7)$$

saklanýan zarýady bozmaklyk V_G*<0* garşylykly polýarlylygyň impulsy bilen amala aşyrylýar.

Ýazmaklygyň başky döwründe Q zarýad wagt bilen çyzykly ýokarlanýar, ýöne soňra bu baglylyk doýgunlaşýar. Öz gezeginde inžeksiýa togy başda gowşak çalyşýar, soňra birden peselmäge başlaýar. Şeýle alyp baryşy indiki ýol bilen düşündirmek bolar. Ýazmaklygyň başynda t*=0* bolanda Q zarýad hem nula, *1* gatlakda elektrik meýdan maksimala deň. Q azka we laýyk gelýän ε_1 peselme ujypsyzka J_1 tok gowşak peselýär. Şonuň üçin prosesiň başynda Q wagtda çyzykly ýokarlanýar. Emma soňra Q ýokarlanmasy derekli bolýar we ε_1 meýdanyň peselmegine getirýär. Onuň netijesinde J_1 tok aşak düşüp ugraýar, onuň integraly bolsa (Q zarýad) doýgunlaşýar

Real abzallarda bosaga napryaženiýeni *1*W süýşürmek üçin zerur zarýadlanma wagty (ýazmak wagt) *10*$^{-7}$ s ýokary däl. Bosaga napryaženiýanyň süýşmesini g_D kanalyň geçirijiligini ölçäp kesgitlemek bolar. Çykalgada kiçi napryaženiýelerde (p-

kanal tranzistor üçin)

$$g_D = -\frac{Z}{L}\mu_p C_i (V_G - V_T), \quad V_G > V_T \quad . \qquad (27.8)$$

Q (Q - elektron zarýad we şonuň üçin otrisatel) ýüzýän burmada zarýadyň üýtgemelerinden soň, $g_D(V_G)$ baglylyk grafigi ΔV_T ululyga saga süýşýär.

Bozmaly birinji programmirlenýän hemişelik ýatda saklaýan gurluşlarda (HÝSG) ýüzýän burmanyň materialy hökmünde güýçli legirlenen polikremniý ulanylýardy. Ýüzýän burmaly we syrgyn inžeksiýasy MOÝ-ÝSG adyny alan, bu abzallarda polikremniý burma ähli tarapyndan okisel gatlak bilen gurşalan. Okisel gatlagyň uly galyňlygy (d_1=*1000* A) okiselde gowşak ýerleri ýok etmek üçin saýlanan. Zarýadyň inžeksiýasy çykalgada syrgyn böwsülmäniň oblastynda generirlenen gyzgyn elektronlar bilen amala aşyrylýar. Onuň üçin çykalga böwsülme üçin talap edilýän naprýaženiýä çenli süýşýär. Gyzgyn elektronlar munda elektrik meýdan bilen ýüzýän burma çekilýär. Maglumat zarýady bozmak üçin şeýle strukturada ultramelewşe ýa-da rentgen şöhlelendirme ulanylýar. Bu ýerde elektrik bozma mümkin däl, sebäbi strukturada daşky burma ýok (27.2. surat).

Elektrik bozmanyň zerurlygynda iki polikremniý burmaly huş öýjügi ulanylýar. Mundan başga, daşky burma ýazmaklygyň effektiwligini gowylandyrýar. Käwagt bu görnüşiň abzallarynda polikremniý burmalaryň arasyndaky gorag (izolýasiýa) baýlaşdyrylan kremniýli, SiO_2 gatlak bilen amala aşyrylýar. Q*=0* strukturanyň deňagramly ýagdaýy *"0"* maglumat nulyň saklanmagyna laýyk gelýär. Ýüzýän burmada zarýad bilen syrgyn inžeksiýa prosesinde ýygnananly ýagdaý *"1"* maglumat birliginiň saklanmagyna laýyk gelýär. Daşky burmada uly položitel naprýaženiýelerde ýygnalan zarýady ony daşky burma çekme ýoly

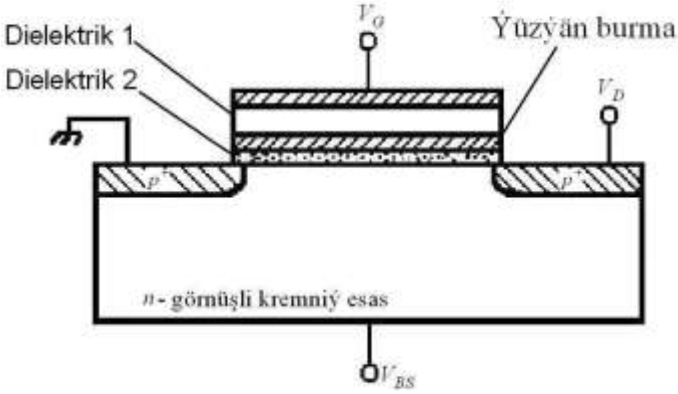
bilen aýyrylýar we huşuň elementi *“0”* başlangyç ýagdaýa gaýdyp gelýär.

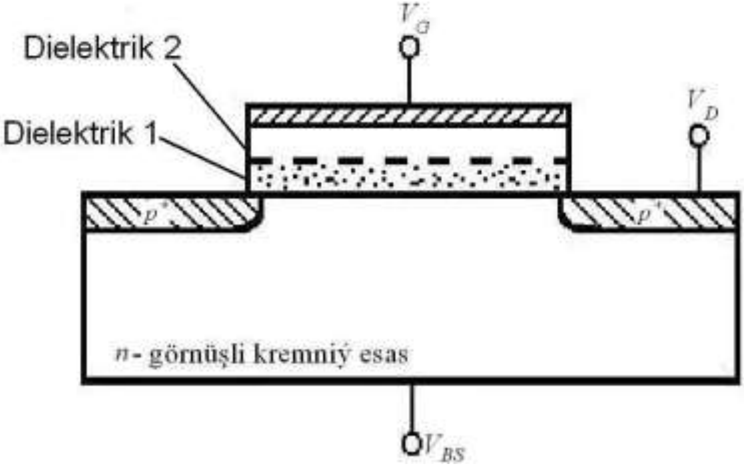
Huşuň energiýa bagly däl elementleriniň wajyp häsiýetnamasy maglumaty saklama wagty bolup durýar. Ol wagt ýaly kesgitlenýär. Onuň dowamynda ýazylan zarýad ters napýaženiýe netijesinde *50*% kiçelýär:

$$t_R = \ln 2 / \left[\nu \exp\left(-q\varphi_B / kT \right) \right].$$

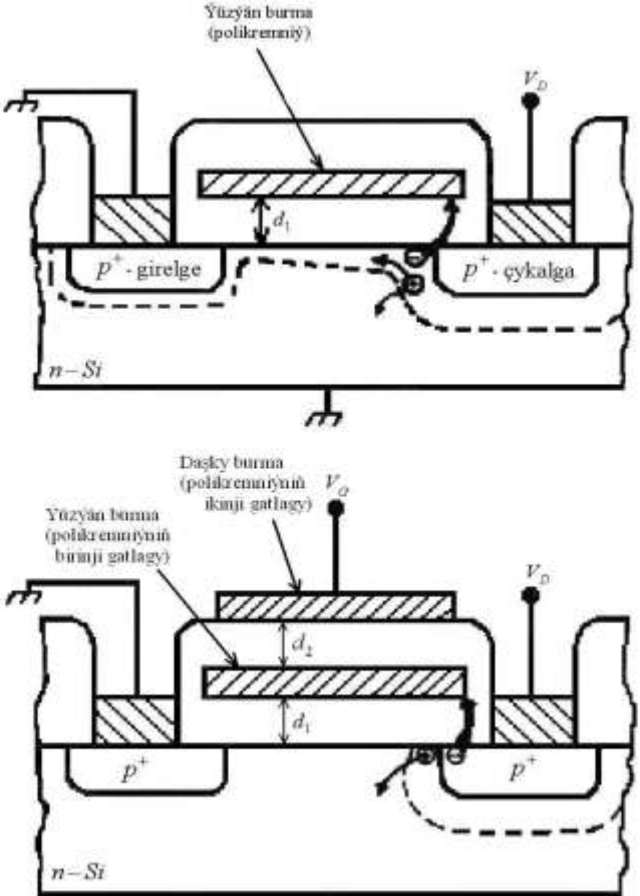
(27.9)

Bu ýerde ν - dielektrik relaksasiýanyň ýygylygy, $q\varphi_B$ - energetik barýeriň beýikligi. T *=125* we *170*^{0} bolanda maglumaty saklama wagt takmynan *100* ýyl we *8000* s düzýär.





Surat 11.1. Ýüzýän burmaly huşuň energiýa bagly däl elementi we MDOÝ görnüşli huşuň energiýa bagly däl elementi.



Surat 11.2. Ýüzýän burmaly MOÝ-ÝSG-yň gurluşy.

MDOÝ strukturalary

Metal-dielektrik - SiO_2-Si strukturaly dürli ýatda saklaýan gurluşlaryň arasynda has meşhury *MNOÝ* - strukturalardyr (*metal* - $Si_3N_4-SiO_2-Si$). Mundan başga-da, kremniniň nitridine derek başga dielektrik plýonkalar, ýagny alýuminiň okisi,

tantalyň okisi we titanyň okisi ulanylýan *MDOÝ* strukturalar belli. Abzallary bu görnüşine kremniýniň iki okiseliniň diňe bir gatlagyny saklaýan struktura hem degişli. Onuň daşky bölegine altynyň ionlary (ýa-da başga metallaryň) implantirlenen. Şeýle implantasiýa okiseliň laýyk gelýän gatlagynda geçirijiligi üýtgedýär. Şeýle hem zarýady tutmaga hem saklamaga ukyply serhet merkezleriniň döremegine getirýär.

4-NJI BÖLÜM
OPTOELEKTRON ABZALLAR

12.1. Ýagtylygy duýgur abzallar

Ýagtylygy duýgur abzallar hakda umumy maglumatlar

Kesgitlemesi. Ýagtylyga duýgur abzallar (optiki şöhleleri kabul edijiler) diýlip, optiki diapazonda elektromagnit şöhlelenmegi tapyp bilýän (**duýýan**) hem-de şol şöhleleri ölçäp bilýän abzallara aýdylýar.

Ýagtylyga duýgur abzallar – elektromagnit energiýalaryň şöhleleniş hadysasyna esaslanyp, olary başga elektrik signallaryna, (başga energiýalara, meselem görünilýän optiki şekillere) öwürip bilýän abzallardyr.

Klassifikasiýalary (toparlara bölünişleri) : Ýagtylyga duýgur abzallary – fotoelektronly, fotoelektrikli, ýylylykly ýaly üç topara bölýärler :

1. Fotoelektronly abzallaryň işleýiş prinsipleri **daşky** fotoeffektlere hem-de wakuumly ýa-da gaz bilen doldurlan abzallardaky döredilýän elektrik meýdanynyň täsirinden hereketlendirilýän elektronlaryň akymyna esaslanýarlar. Käbir abzallarda bolsa **içki** fotoeffektler (**widikonlara**) we **ýylylyk** effektlere
(**Piro**-widikonlara) esaslanýarlar (**Piro**-ýanýan, ýangyn – Grek sözi, **Widio**-görmek-Latyn, **eikon** – şekil – Grek sözleri).

Olara degişli abzallar : Telewideniýelerde ulanylýan elektron şöhlelerini döredýän turbalar, fotoelektronly köpeldijiler (**FEK**), fotoelementler, elektronly-optiki özgerdijiler, fotoelektronly özgerdijiler, fotoemissiýaly ýüwrük (ylgaýan) tolkunlaryň çyralary we başgalar.

2. Fotoelektrikli abzallaryň işleýiş prinsipleri **içki** fotoeffektlere hem-de ýarymgeçirijileriň taýýarlanyş tehnologiýasyna esaslanýar.

Olara degişli abzallar. Fotorezistorlar, fotodiodlar ýarymgeçirijilerden ýasalan fotoelementler (Gün elementleri), fototranzistorlar, fototiristorlar, zarýadlary äkidýän ýagtylyga duýgur abzallar (ZÄÝDA).

3.Ýagtylygyň ýylylyk täsirine has duýgur abzallara ýylylygyň abzallary diýilýär. Ýylylyk abzallarynyň işleýiş prinsipi şöhleleriň ýuwdulan wagty, abzallara edýän täsirinden temperaturanyň garşylygynyň üýtgemeginiň duýgurlygyna esaslanýar ýa-da temperaturanyň üýtgemegi netijesinde birnäçe kristallaryň üstlerinde elektrik zarýadlarynyň toplanýanlygy sebäpli garşylygynyň üýtgeýiş duýgurlygyna esaslanýar.

Olara degişli abzallar : Ýarymgeçiriji bolometrler, şöhlelenýän piroelektriki ýükler, bolometriki ýylylygy kabul edýän gurnamalar (**ÝKEG**) .

Ýagtylyga duýgur abzallarda bolup geçýän esasy fiziki hadysalar.

Daşky fotoeffekt. Daşky fotoeffekt diýlip, elektromagnit şöhleleriniň jisimler tarapyndan ýuwdulýanlygy sebäpli jisimlerden wakuuma tarap elektronlaryň emissiýalanmak hadysasyna aýdylýar.

Jisimiň üstüne düşýän elektromagnit şöhlelerindäki fotonlaryň energiýasy elektronlara goşmaça energiýa bermek üçin harçlanýar.

Şu energiýanyň hasabyna elektron özüniň $\mathbf{m_e}$ – massasy bilen $\mathbf{A_{çyk}}$ – işi ýerine ýetirýär we υ – başlangyç tizligine eýe bolýar.

Ýokardaky aýdylan energiýa, iş, tizlik we massa ýaly ulylyklaryň özara matematiki baglanşyklary Eýnşteýniň deňlemesi bilen aňladylýar.

$$h\nu = A_{çyk} + \frac{m_e \cdot \upsilon^2}{2}$$

Bu ýerde :

h = 6,626 ·10^-34^ Joul · sekunt– Plankyň hemişeligi ,

ν – elektromagnit şöhlelenmegiň ýygylygy.

12.2. Daşky we içki fotoeffektleriň aýratynlyklary

Daşky fotoeffektiň aýratynlyklary:

1. Hemişelik şöhleleriň akymy bilen jisimiň üsti şöhlä tutulanda fotoelektron emissiýanyň netijesinde döreýän tok, şol spektral düzümli şöhle akymynyň intensiwligine (ýitiligine) gönüden-göni baglydyr.

$$\mathbf{I_F = s \cdot \Phi}$$

Bu ýerde **:** $\mathbf{I_F}$ – fototok , **Φ** – elektromagnit akymynyň ululygy ;

s – fotokatodyň ýagtylyga duýgurlygy.

Fotokatoddan uçup (atylyp) çykýan elektronlaryň tizligi näçe uly boldugyça, şonça-da şöhlelenmegiň ν – ýygylygynyň siňişi uly bolýar ;
ν – ýygylygyň artmagy bilen fotoelektronlaryň başlangyç kinetiki energiýalary göni baglanşygyň kanuny bilen artýar.

2. Fotoeffekt hadysasy diňe şöhleleriň desselenen ýiti akymy bolanda hem-de $\nu \geq \nu_{\mathbf{kriz}}$ ýygylyk bilen şöhlelendirlende ýüze çykýar we döreýär. Bu ýerde $\nu_{\mathbf{kriz}}$ – krizis ýygylygy diýilmeginden başga-da, oňa fotoeffekt hadysasynyň « **gyzyl araçägi** » hem diýilýär.

3. Fotoeffekt hadysasyna **inersiýasyz** diýseň-de bolýar, sebäbi şöhlelenmek bilen fotoelektronlaryň ýüze çykyp başlamagynyň aralaryndaky wagt $\mathbf{3 \cdot 10^{-9}}$ sekund töweregidir. Şonuň üçin-de yza galmak (saklanmak) hadysasy ýok diýip kabul edilýär.

Umuman, islendik metaly, dielektrigi hem-de ýarymgeçirijini ýagtyldanyňda-da (yşyklandyranyňda-da) görmek bolýar.

Içki fotoeffektiň aýratynlyklary. Içki fotoeffekt diýilip, krisstalyň içinde birnäçe hadysalaryň bolup geçmegine aýdylýar. Meselem, elektromagnit akymy kristalyň gözeneklerinden geçende edýän täsirinden şöhlelendirlen nusganyň garşylygynyň üýtgemegine aýdylýar.

Içki fotoeffekt dörän wagty elektronlaryň energetiki ýagdaýy üýtgeýär, kristaldaky toklary erkin alyp baryjylaryň-da mukdary üýtgeýär ýa-da olaryň çakgan gozganmaklary netijesinde kristalyň

göwrüminiň içindäki zarýadlaryň täzeden paýlanmaklary bolup geçýär.

Içki fotoeffekt hadysasy diňe ýarymgeçirijilerde we dielektriklerde bolup geçýär.

Içki fotoeffektler diýlip hasap edilýänler :

a) fotogeçirijilik (fotorezistor effekti) ; b) fotogalwaniki effekti ;

w) fotoelektromagnit effekti ; ç) ýarymgeçirijiler deňölçegsiz şöhlelendirlende döreýän effektler.

Fotoelektriki abzallarda ulanylýan içki fotoeffektlerden esasan hem iki görnüşi has köp ulanylýar, olar fotogeçirijilik hadysasy bilen fotogalwaniki hadysalarydyr.

Fotogeçirijilik – diýilip, ýarymgeçirijilere şöhle ugrukdyrylanda nusgada döreýän özara deň bolmadyk dürli sebäpler bilen döreýän geçirijilikleriň bolçulygy ýüze çykanda aýdylýar.

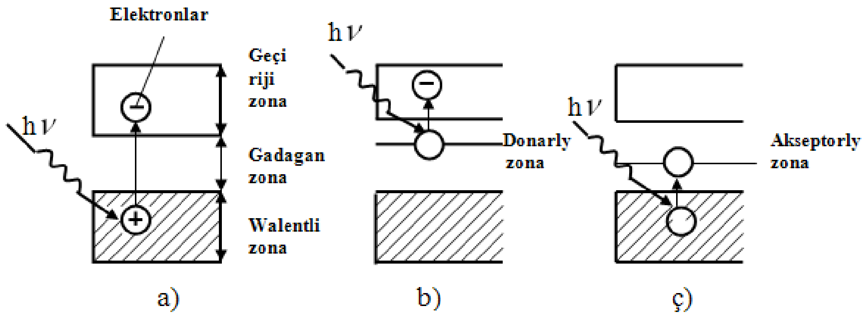
Esasy geçirijilik diýlip, ýagtylyksyz (ýagny ýylylygyň täsiri netijesinde döreýänligi üçin oňa şöhlesiz) ýa-da **tümlükde** döreýän geçirijilige diýilýär, sebäbi bu geçirijilik nusganyň tümlükde duran wagtyna gabat gelýär.

Ýarymgeçirijilere ugrukdyrlan şöhläniň bir bölegi arassa ýarymgeçirijä zerurlyk üçin harçlanýan (ýuwdulýan) bolsa, beýleki bölegi ýarymgeçirijiniň düzümine goşulan garyndylar tarapyndan ýuwdulmagy mümkindir.

Arassa ýarymgeçirijide ýagtylygyň ýuwdulmagy diýlip, ýagtylygyň **sorulyp** ýuwdulýanlygy netijesinde erkin toklary döredýänleriň (elektronlar bilen deşikleriň) jübütleşmeklerine aýdylýar.

Garyndyly ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň ýuwdulmagy diýlende ýagtylygyň **sorulyp** ýuwdulýanlygy netijesinde togy döredýänler diňe bir tipli bolmalydyrlar (ýa elektron tipli ýa-da deşik).

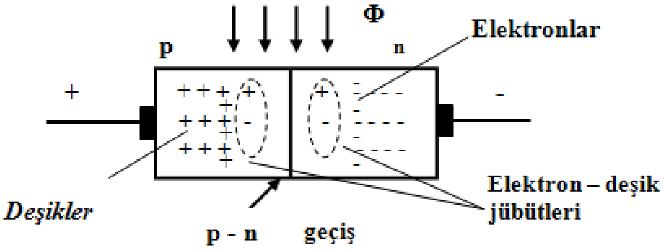
29.1-nji çyzgyda – arassa we garyndyly ýarymgeçirijilerde ilkinji togy alyp barýanlar : **a** – hususy bolanda we **b** ; **ç** – garyndyly bolanda şöhleler zerarly döreýän geçirijiligiň emele gelişleri görkezildi (çyzgyda **hν** – fotonlaryň energiýasy)



12.1-nji çyzgy. **a** – arassa, **b** – garyndysy donor, **ç** – garyndysy akseptor bolan ýarymgeçirijilerde şöhleler zerarly geçirijiligiň döreýşi.

Fotogalwaniki effekt – diýlip ýarymgeçirijiden ýasalan nusganyň üstüne şöhle ugrukdyrylanda **nusganyň** eginlerinde elektrik hereketlendiriji güýjüň (EHG-niň) döremegine aýdylýar.

Mysal hökmünde **p-n** gurluşa seredeliň. Nusganyň p-n geçelgesine we bu geçelgäni emele getirýän **p** hem-de **n** – böleklerine-de ýagtylyk ugrukdyrylýar. (29.2-nji çyzgy).



12.2-nji çyzgy. Ýarymgeçirijiden taýýarlanylan nusganyň üstüne şöhläniň ugrukdyrlyşy.

Ýarymgeçirijiniň üstüne düşýän **h**ν – fotonlar energiýasynyň **Φ** – akymy, togy döredýän zarýadlaryň käbirinde elektronlaryň we deşikleriň jübütleşmeklerine sebäp bolýar. Ýagtylygyň **Φ –** akymy bilen üpjin edilenden soň, ýarymgeçirijä elektrik meýdany bilen täsir etsek, onda **p-n** geçelgäniň töwereginde ýaňky jübütleşen elektron-deşikler aýrylyşmak bilen bolýarlar we deşikler öz **p** – bölegine tarap, elektronlar bolsa **n** – bölege tarap süýşmek bilen bolýarlar. Şeýlelikde, **n** – bölekde elektronlaryň üýşmekleri, **p** – bölekde bolsa deşikleriň üýşmekleri bolup geçýär. Netijede, **fotoelektrik** hereketlendiriji güýç
(**Foto EHG**) emele gelýär. Foto EHG-niň ululygy ýagtylygyň dessesiniň ýitiligine (**intensiwligine**) bagly bolup **1-Woltuň** ondan biri (**0,1W**) töweregi bolýar.

Eger-de, **p-n** gurnamany (abzaly) ýapyk zynjyr bilen birleşdirsek, onda foto **EHG**-niň täsirinden elektrik togy dörär. Dörän elektrik togunyň ululygy (güýji) ýagtylygyň akymyna we ýüküň garşylygyna baglydyr.

12.3. Ýagtylygy duýgur abzallaryň esasy häsiýetnamalary we esasy parametrleri

1. Wolt-Amper ýa-da anodyň häsiýetnamasy diýlip ýagtylygyň akymy

Φ = hemişelik saklananda $\mathbf{I_F}$ – fototok bilen elektrodlaryň arasyndaky
U – napryýaženiýeniň baglanşyklaryna aýdylýar, $\mathbf{I_F = f(U)}$.

Aslynda $\mathbf{I_F}$ – fototok ýagtylyk we tümlük toklarynyň tapawutlaryna deňdir

$$\mathbf{I_F = I_{ýagt} - I_{tüml}}$$

Tümlügiň togy – $\mathbf{I_{tüml}}$ – haýsy-da bolsa belli bir napryýaženiýede şöhläniň ýok wagty ýapyk zynjyrdaky tok bolsa, onda ýagtylygyň togy – $\mathbf{I_{ýagt}}$ – haýsy-da
bolsa belli bir napryýaženiýede şöhläniň bar wagty ýapyk zynjyrdaky tokdur.

2. Ýagtylygyň häsiýetnamasy – haýsy-da bolsa bir takyk (**U=hemişelik**) napryaženiýede I_F – fototok bilen ýagtylygyň **Φ** – akymynyň özara baglanşyklaryna aýdylýar.

$$I_F = f(\Phi) \; ; \quad U = const$$

3. Spektral häsiýetnama – ýagtylyga duýgur abzalyň s – duýgurlygynyň (ýa-da s/s_{max} – otnositel duýgurlygynyň) abzala düşýän şöhläniň **λ** – tolkun uzynlygy bilen baglanşygyna aýdylýar.

$$\frac{S}{S_{maks}} = f(\lambda)$$

4. Ýagtylyk häsiýetnama – fototoguň $I_{F\sim}$ - üýtgeýän böleginiň (goşulmasynyň) hemişelik spektr düzüminde (**λ=hemişelik**) şertde, ýagtylyk akymynyň f – ýygylygy bilen baglanşygna aýdylýar $I_{F\sim}=f(f)$; **λ=hemişelik**

Ýagtylyga duýgyr abzallaryň esasy parametrleri hökmünde şu aşakdaky parametrler kabul edilen :

1. Tümlükdäki şertde R_T – garşylyk – ýagtylygyň ýok wagty (tümlükde) şöhlelendirilmeýän abzalyň garşylygy

$$R_{tüml} = \frac{U}{I_{tüml}}$$

Bu ýerde, $I_{tüml}$ – tümlük wagtyndaky tok.

2. Ýagtylygyň döredýän $R_{ýagt}$ – garşylygy, bu garşylyk ýagtylygyň bar wagty spektriň (görünmegiň) duýgurlyk diapazonynda ugrukdyrylan şöhleleriň akymynyň täsirinden döreýän ýüküň garşylygy.
3. Integral (bütin) duýgurlygy – şöhlesi takyk ugrukdyrylan ýagtylyk çeşmesiniň ýagtylygyna görä şöhlelendirilýän ýüküň duýgurlygy

Eger-de, I_F – fototok bilen ýagtylygyň **Φ** – akymynyň baglanşygy **göni** bolanda duýgurlyk koeffisiýentiniň tapylyşy

$$S = \frac{I_F}{\Phi}$$

4. Spektral duýgurlygy – Takyk tolkunyň λ – uzynlygy bilen monohromatiki (birreňkli) şöhlelendirlende ýüküň duýgurlyk koeffisientiniň tapylyşy

$$S_{\lambda} = \frac{d\,I_{F.\lambda.}}{d\,\Phi_{\lambda}}$$

12.4. Fotorezistorlar

Fotorezistor diýlip fotoelektrik abzallaryň içindäki ýarymgeçirijilere elektromagnit şöhleleri bilen täsir edilende onuň elektrik garşylyklarynyň kiçelmegine aýdylýar (**Fotorezistor effekti**).

Fotorezistiw effekti – ilkinji bolup 1873-nji ýylda akademik U.Simtom **selen** elementini derňände açýar.

Häzirki döwürde fotorezistoryň tok geçiriji elementi hökmünde kükürtli kadmiden [**CdS**], selenli-kadmiden [**Cd·Se**], selenli gurşundan [**PbSe**] we başga-da ýagtylyga duýgur materiallardan (jisimlerden) taýýarlanylýar.

Fotorezistoryň tokgeçiriji elementleri gurluşy birnäçe dürli tilsimli (konstruktiw tehnologiki) wariantlarda taýýarlanlyp bilner :

a) ýagtylyga duýgur ýarymkristal materiallary ýasy çüýşe bölegine plýonka görnüşde çaýýarlar;
b) Disk ýa-da bölejik plastinka görnüşde gysdyrylyp (presslenip) ýokardaky materiallardan ýasaýarlar;
c) Ýarymgeçirijileriň arassasyndan ýagny monokristall görnüşinden-de taýýarlaýarlar.

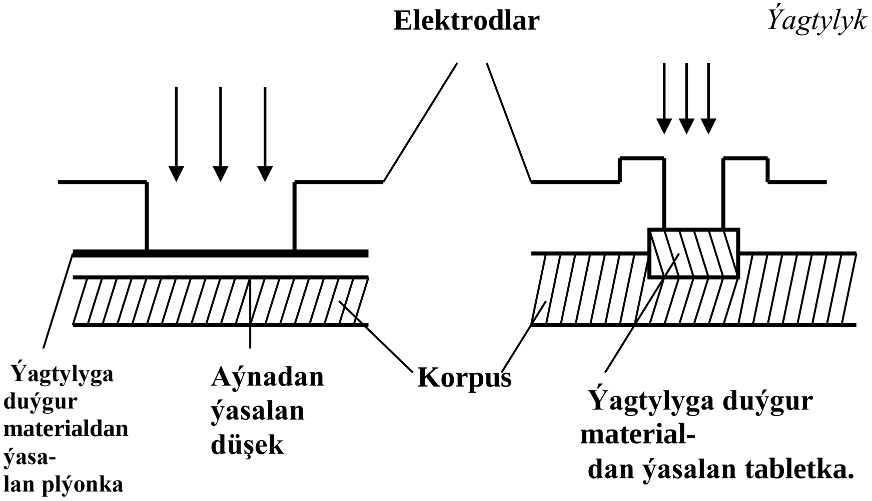
Soňky iki ýagdaýda elementi ýukajyk plastmassalara ýa-da ýukaldylan aýna bölegine ýelim bilen berkidýärler.Fotorezistoryň elektrodlary metallardan ýasalan ýukajyk plýonkalardan ýa-da fotorezist bilen elementi birleşdiriji ýörite elektrik geçirijili metall oýuklaryndan ýasaýarlar.

Fotorezistoryň iň ýönekeý gurluşy – korpussyzdyr. Onuň tok geçiriji elementi aýnadan ýasalan bölejige berk ornaşdyrlyp, daşky hadysalardan goraýan hem-de ýagtylyk şöhleleriniň yzyna serpilmän geçer ýaly dury plýonkalar bilen örtülýär. Bular ýaly fotorezistorlar

elektrik zynjyrlaryna ýöriteleşdirlen gysyjy kontaktlar bilen birleşdirýärler.

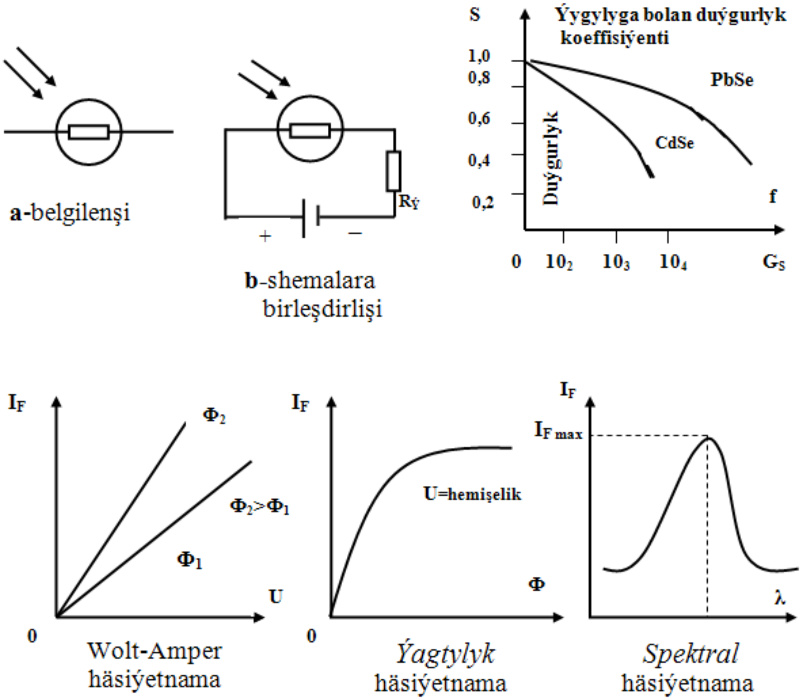
Fotorezistorlaryň aglabasynda tok geçiriji element dury aýnaly deşik bilen üpjün edilen metall-korpusyň (gutynyň) ýa-da plastmassa-korpusyň (gutynyň) içinde dury plýonka bilen ýapylyp berkidilýär. Bular ýaly fotorezistorlary elektrik zynjyrlaryna birleşdirmek üçin ýumşak ýa-da gaty simuçlary fotorezistorlar üçin çykalgalar bolup hyzmat edýär.

Ýagtylygy duýgyr elementleriň gurluşynyň ýönekeý görnüşi 29.3-nji çyzgyda şertli görkezildi



12.3-nji çyzgy. Ýadtylygy duýgur elementleriň gurluşlarynyň şertli düşündirlişi.

Fotorezistorlaryň şertli belgilenişi we elektrik shemalaryna çatylyşy hem-de olaryň dürli elementler üçin häsiýetnamalary 29.4-njy çyzgyda görkezildi.



12.4-njy çyzgy. Fotorezistorlaryň şertli belgilenişleri shemalara birleşdirlişleri we häsiýetnamalary.

Fotorezistorlar üçin çeşmäniň polýarlaryny (ýagny ± -ny) çalyşanyň täsir ermeýär, diýmek fotorezistorlaryň Wolt-Amper häsiýetnamalary koordinatanyň merkezine görä simmetrikdirler.

Fotorezistorlaryň harplar we sanlar bilen şertli belgilenişleri.

Köne markalanşy : Birinji ýazgy **ФС** – harplar – fotogarşylyk diýmek ; **Üçünji** ýazgy – **harp**, ýagtylyga duýgur materialyň görnüşini aňladýar (A – PbS – sulfidli gurşun, **K** – Cd·S – sulfidli kadmiý , **D** – CdSe – selenli kadmiý).**Üçünji** şertli ýazgy – **Sifr** – abzalyň ýygnalyşyny aňladýar.Г – harp sifriň öň ýanynda goýulýar we germetikdigini aňladýar, П – ýa-da M – hapr ýazylan bolsa, onda П – plýonkadygyny, M – monokristaldygyny aňladýarlar.

Täze markalanyşy.Belginiň birinji şertli ýazgysy – **СФ** harp (ýagtylyga duýgur garşylyk). Belginiň ikinji ýazgysy **sifr**, ýagtylyga duýgur elementiň tipini aňladýar (**1-PbS, 2 – CdS, , 3 – Cd·Se, 4 – Pb·Se**).

Belginiň üçünji şertli ýazgysy (defisden soň) – **sifr**, fotorezistorlaryň haýsy materiallardan gurnalandygyny aňladýar, meselem Г – germetikdigini aňladýar. Fotorezistorlaryň şertli belgi belgilenişlerine birnäçe mysallar : ФСЛ – Г1, ФСD-1, ФС3 – 1, ФСА – 6, ФСВ – 16АН, СФ4-2D.

12.5. Fotogalwaniki elementler

Fotogalwaniki element diýlip, ýagtylyk energiýasyny göni elektrik energiýasyna öwürýän ýarymgeçirijiden ýasalan abzallara aýdylýar.

Olaryň işleýşi fotogalwaniki effekte esaslanýar. (Bu effekt 7-nji bapda giňişleýin seredilipdi).

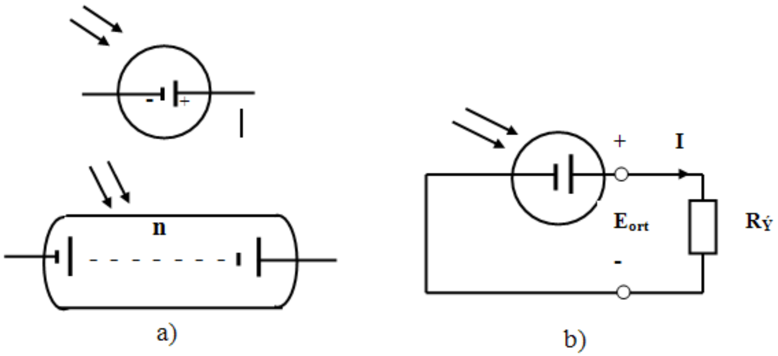
Fotogalwaniki elementler, başgaça-da dürli-dürli atlandyrylýar : Wentilli (diodly), fotoelement, ýarymgeçiriji fotoelement, Gün elementleri we ş.m.

Fotogalwaniki elementler Gün batareýleri hökmünde elektrik energiýany öndüriji çeşme hasaplanylýar we durmuşda, ösen tehnikalarda giňden ulanylýar.

Meselem fotometriýada, awtomatikada, ýagtylygy ölçeýji abzallarda (Lýuksmetrlerde), suratlar alynanda we kinolara düşürlende bolmaly ýagdaýy (ekspozisiýany) kesgitlemek üçin eksponimetrler hökmünde-de ulanylýar.

Fotogalwaniki elementler özleri üçin aýratyn iýmitlendiriji çeşme talap etmeýär. Şular ýaly elementleri taýýarlanlarynda Kremniý, Selen, Germaniý we başga-da birnäçe ýarymgeçirijiler giňden ulanylýarlar (ozal belläp geçişimiz ýaly, ähli p-n geçişler şol elementlerden döredilýär).

12.5-njy çyzgyda Gün elementleriň (Gün batareýleriniň) şertli belgilenişleri we elektrik shemalaryna birleşdirlişleri görkezildi.



12.5-njy çyzgy. Gün elementleriniň (batareýleriniň):
a – şertli belgilenişleri we **b** – elektrik shemalaryna çatylyşy.

Ýarymgeçiriji diodyň Wolt-Amper häsiýetnamasy şu aşakdaky deňleme bilen düşündirilse bolar.

$$I= I_0\ e\left(\frac{U}{U_T}1\right)$$

Bu ýerde, $\mathbf{I_0}$ – polýarlygy tersine wagty doýan toguň ters bahasy ,

U – p – n – geçelgedäki naprýaženiýe ,

$U_T= \dfrac{kT}{\mathbf{q}}$ temperaturanyň döredýän potensialy ,

$\mathbf{k=1,38 \cdot 10^{-23}}$ **[J/K]** – Bolsmanyň hemişeligi,

$\mathbf{q = 1,6 \cdot 10^{-19}}$**[Kℓ]** – elektronyň zarýady ,

T – temperatura (Kelwiniň absalýut şkalasy boýunça).

Ýarymgeçirijiniň **p-n** geçelgesi ýagtylandyrylanda foto EHG-niň döremegi netijesinde Wolt-Amper häsiýetnama öňki ýagdaýyndan ornuny üýtgedýär. Foto EHG-niň döremegi bolsa fotogalwaniki effekti bilen düşündirilýär .

Şular ýaly ýagdaýda Wolt-Amper häsiýetnamanyň beýan edilişini şu aşakdaky formula kanagatlandyrýar.

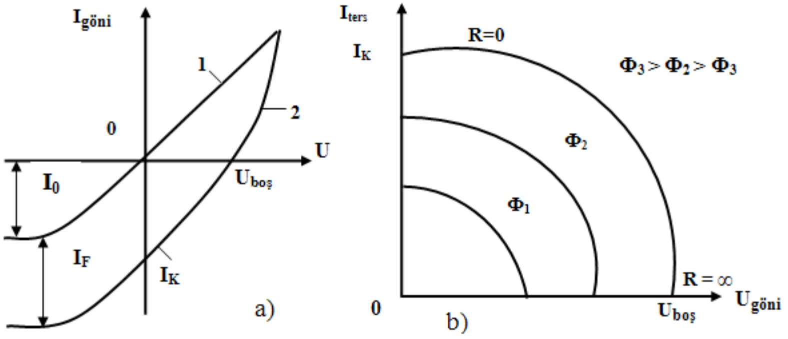
$$I=I_F-I_0\ e\left(-1\frac{U}{U_T}\right)$$

Bu ýerde I_F – fototok (fotogalwaniki effektiň esasynda döreýär).

29.6-nji çyzgyda ýagtylandyrylmadyk – **1**, we ýagtylandyrlan –2 ýarymgeçirijileriň Wolt-Amper häsiýetnamalary görkezildi.

Elektrik ýüküniň garşylygy $\mathbf{R_Ý=0}$ bolanda, fotogalwaniki elementiň zynjyryndaky (sakasyndaky) tok gysga utgaşma wagtyndaky $\mathbf{I_K}$ – bahasyna deň bolýar. $\mathbf{I_K = I_F = S\Phi}$

ýagny, $\mathbf{I_K}$ – tok, integrallanmagyň **S** – duýgurlygyna we ýagtylygyň, **Φ** – akymyna göni baglanşykdadygyny aňladýar.



12.6-nji çyzgy.Fotogalwaniki elementleriň Wolt-Amper häsiýetnamalary. **a) p-n** – geçelgeli ýarymgeçiriji diod üçin, **b)** fotogalwaniki element üçin.

Eger-de elektrik ýüki tükeniksize ($R_Ý=\infty$) deň bolsa, onda fotogalwaniki elementiň şahasynda tok döremez, şonuň üçin-de şahadaky tok **I=0** bolar (şahanyň boş iş düzgüni).

Fotogalwaniki elementiň boş iş düzgüninde onuň gysgyçlarynda döreýän naprýaženiýä fotoEHG – diýilýär.

FotoEHG-niň tapylyşy.

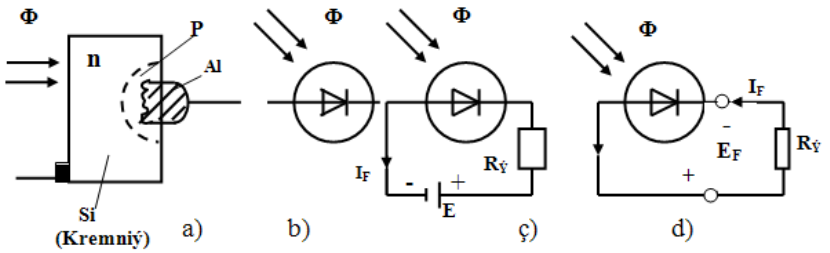
$$E_F=U_{boş}=\frac{KT}{q}\ln\left(1+\frac{I_F}{I_0}\right)$$

12.6. Fotodiodlar

Ýagtylygyň akymy bilen togy dolandyrylýan ýarymgeçiriji diodlara **fotodiod** diýilýär.

Fotodiodyň düzümi iki gatlakdan ýygnalan bir sany **p-n** – geçelgeli abzaldyr (29.7-nji **a** çyzga seret).

1. Elektrik shemalarynda fotodiodlaryň grafiki görnüşde şertli belgilenişi 12.7-nji **b** çyzgyda görkezildi .



12.7-nji çyzgy. Fotodiodlaryň şertli belgilenişleri we elektrik shemalaryna çatylyşlary : **a** – düzümi; **b** – belgilenişi; **ç** , **d** – shemalara birleşdirlişi.

Fotodiodyň esasy bölegi hökmünde Kremniý, Germaniý, Arsenid-Galliý ýaly ýarymgeçirijiler ulanylýarlar.

Fotodiodyň işleýiş düzgünini iki hilli ýagdaýda düşündirip bolýar.

1) Fotodiodly we 2) Fotogalwaniki düzgünler.

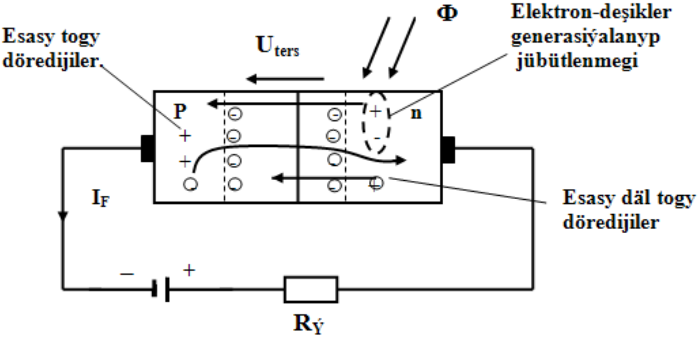
<u>Fotodiodly düzgün</u> bolanda daşky iýmitlendiriji çeşmäniň **E** – EHG-si bilen fotodiodyň polýarlary özära ters birleşdirilýärler

(29.7-nji **ç** çyzga seret).Bu düzgünde fotoeffekti ulanmak bilen, fotodiodda döreýän $\mathbf{I_F}$ – tok bilen belgilenen ters togy, ýagtylygyň akymy bilen dolandyrylýar.

Fotogalwaniki düzgün bolanda daşky iýmitlendiriji çeşme bolmaýar (29.7-nji **d** çyzga seret) . Bu düzgünde fotogalwaniki effekti ulanmak bilen, fotodiodda döreýän $\mathbf{E_F}$ – EHG-ni ýagtylygyň akymy bilen dolandyrylýar.

12.7. Fotodiodlaryň fotodiod we fotogalwanik düzgünlerinde işledilişleri

a) **Fotodiodyň iş düzgüni**. Fotodiodyň fotodiod düzgüninde işleýşiniň shemasy 29.8-nji çyzgyda görkezildi.



12.8-nji çyzgy. Fotodiodyň iş düzgüniniň shemasy.

Ýagtylyk akymynyň ýok (**Φ = 0**) wagty berilen ters (**U=U**$_{\mathbf{ters}}$) napryýaženiýede, tümlükde duran fotodioddan ujypsyz ters tok akýar, şonuň üçin-de bu toga tümlükde döreýän tok diýilýär we $\mathbf{I_T}$ – harp bilen belgilenýär. Kän bir uly bolmadyk bu ujypsyz toga esasydäl tok hem diýilýär.

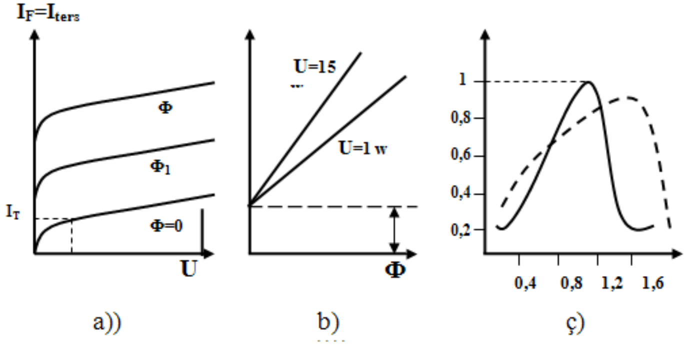
Fotodiodyň esasy bölegi (bazasy) hasap edilýän ýukajyk **n** – ýarymgeçirijiniň üstüne ugrukdyrylan ýagtylyk akymynyň täsirinden elektronlar bilen deşikleriň bilelikde generasiýalanmaklary bolup geçýär. Şeýlelikde, **n** – tipli ýarymgeçirijide esasydäl zarýad

hasap edilýän deşikleriň sany **n** – bölekde köpelip başlaýarlar, bu bolsa **p-n** – geçelgeden geçýän $\mathbf{I_{ters}}$ – toguň köpelmegine getirýär.

Ýagtylyk akymynyň täsirinden döreýän fotodioddaky toga fototok diýilýär we $\mathbf{I_F}$ – harpy bilen belgilenýär.

Fotodiodda döreýän fototoguň ululygy ýa-da kiçiligi fotodioda berilýän ters $\mathbf{U_{ters}}$ – napryaženiýe bilen ýagtylyk akymynyň (**Ф-niň**) ululyklaryna baglydyr.

Fotodioda degişli esasy häsiýetnamalar 29.9-nji çyzgyda görkezildi.



12.9-nji çyzgy. Fotodiodyň häsiýetnamalary : **a** – Wolt-Amper **b** – ýagtylyk, **ç** – spektral häsiýetleri.

Napryaženiýeden känbir bagly bolmadyk **n** – bölekdäki esasydäl hasaplanýan zarýadlary alyp barýanlaryň mukdary diňe ýagtylygyň şöhlesiniň ýitiligine baglydyr, sebäbi napryaženiýeni köpeldeniň bilen fotodiodyň togy artmaýar diýsek-de ýalňyş bolmaz (29.9-njy **b** çyzga seret).

Napryaženiýeni köpeldeniň bilen fotodiodda toguň känbir ulalmaýanlygynyň sebäbini ters $\mathbf{U_{ters}}$ – napryaženiýe ulaldylanda **p-n** geçelgäniň meýdany giňelýänligi bilen, şol, esasda-da **n** – bölegiň bazasynyň giňliginiň kiçelýänligi bilen düşündirilýär. Şular ýaly geçijilik döwürde-de deşikleriň az sany ýol ugruna elektronlar bilen rekombirlenmäge (jübütleşmäge) ýetişýärler, emma köp bölegi fotodiodda togy döretmekde aktiw gatnaşýarlar. Ýagtylygyň ýok wagty döreýän tümlük $\mathbf{I_T}$ – toguň ululygy **Ф=0** we **U=1w** ýagdaýda

kesgitlenilýär. Meselem ýagtylygyň ýok wagty fotodioddaky tümlük **I_T** – tok germaniý diodda **15 – 30 mkA** toweregi, kremniýde **1 mkA** toweregidir.Fotodiod **1 w** bilen iýmitlendirlende integrallanmak duýgurlygy kremniý üçin **3 – 7 mkA/Lm**, germaniý üçin bolsa **10 – 20 mkA/Lm** töweregidir.

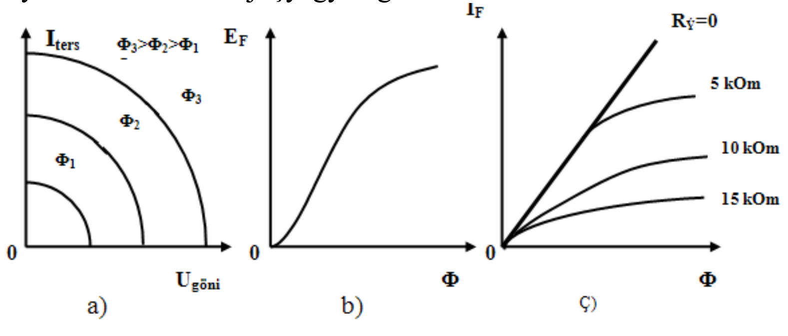
b) **Fotodiodyň fotogalwaniki iş düzgüni**. Fotogalwaniki düzgünde fotodiodlar daşyndan hiç hili iýmitlendiriji çeşme talap etmän işläp bilýärler. Fotodiodyň zynjyryna diňe elektrik ýüküniň **$R_Ý$** – garşylygy birleşdirilýär (8.13-nji d – çyzga seret).

Fotodiodyň **p-n** geçelgesi şöhlelendirilende **p-n** geçelgede elektron – deşikler jübütlenşip generirlenýärler.

Kontakt sebäpli döreýän potensiallaryň tapawutlarynyň täsirlerinden **p-n** geçelgede zarýadlaryň saýlanmaklary bolup geçýär : deşikler **p** – bölege tarap, elektronlar **n** – bölege tarap çekilýärler. Netijede, **p** – bölekde deşikleriň toplanmagy, **n** – bölekde bolsa elektronlaryň toplanmagy bolup geçýär.

Şeýlelikde, **p** – bilen **n** – bölekdäki simçykalgalarynyň aralarynda potensiallaryň tapawudy döräp, oňa foto EHG diýilýär we **E_F** – harpy bilen belgilenýär.

Fotogalwaniki düzgünde işleýän fotodioda degişli esasy häsiýetnamalar 29.10-nji çyzgyda görkezildi.



12.10-nji çyzgy. Fotogalwaniki elementiň esasy häsiýetnamalary :
a – Wolt-Amper, **b** – ýagtylyk EHG boýunça,
ç – ýagtylyk tok boýynça häsiýetleri.

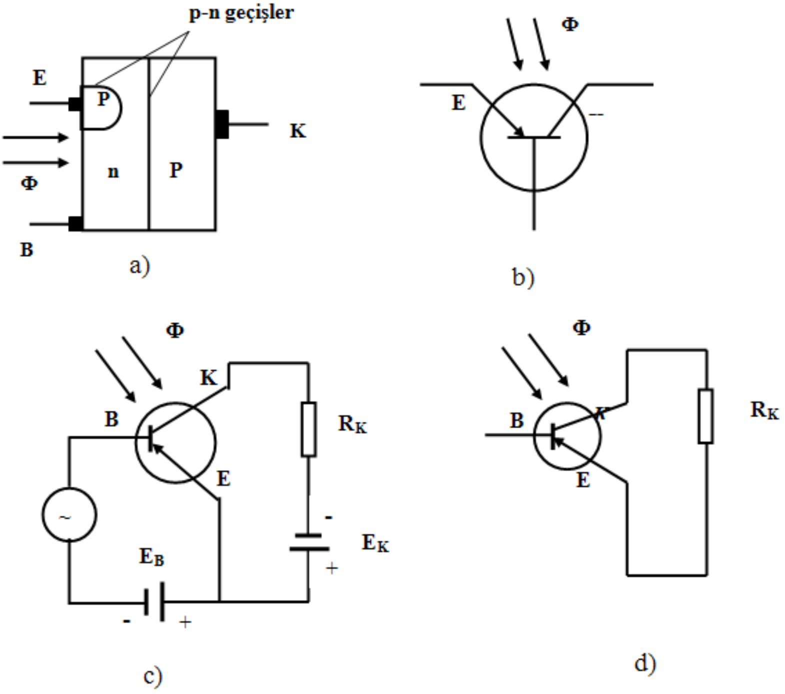
Ýagtylyk akymynyň artmagy bilen E_F – foto EHG ilki-başda çalt ösýär, soňra haýallanýar. (29.10-nji **b** çyzgy).

Elektrik ýüküniň **$R_Ý$** – garşylygyny ulaltdygyňça **$I_F(Φ)$** baglanşygyň häsiýeti egrelmek (**doýmak**) bilen bolýar (29.10-nji **ç** çyzga seret), bu bolsa fototoguň kiçelmegine getirýär. Çyzgydan görnüşine esaslansak, onda elektrik ýüküniň **$R_Ý$** – uly bahalarynda ýagtylygyň **Φ –** akymyny ýiteldeniň (ösdüreniň) bilen **I_F** – fototok känbir ösmeýär.

12.8. Fototranzistorlar

Fototranzistorlar – üstünden geçýän toguny ýagtylygyň **Φ –** akymy bilen dolandyryp bolýan, gurluşy boýunça adaty tranzistorlara meňzeş abzaldyr. Has takygy, tranzistorlaryň gurluşy iki polýarly tranzistorlara meňzeşdir. Emitterli we kollektorly iki sany **p-n** geçelgesi bolup **p-n-p** ýa-da **n-p-n** görnüşde ýygnalýarlar. Bazasy hasap edilýän gatlagy örän ýuka taýýarlanylýar.

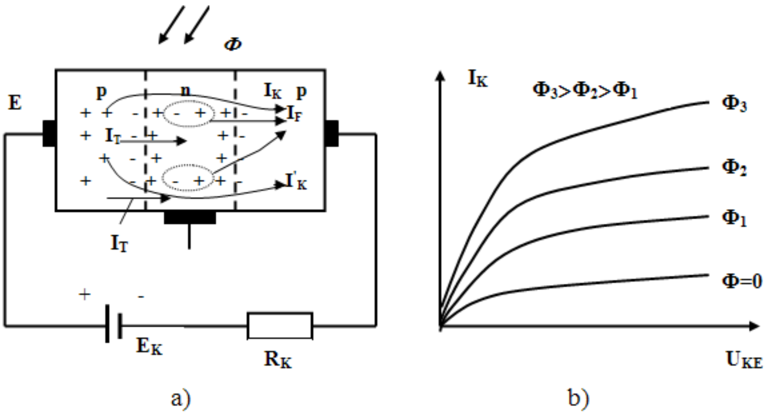
Düzümi ýarymgeçiriji kristallardan ýasalan fototranzistorlar ýöriteleşdirlen korpusyň içinde ýerleşdirilýär. Oňa ýagtylygyň şöhlesi düşüp durar ýaly korpusyň oňaýly ýerinde aýna böleginden ýasalan dury penjire berkidilýär. Fototranzistoryň gurluşy, şertli belgilenişi we shemalara çatylyşy 29.11-njy çyzgyda ýerleşdirildi.



12.11-njy çyzgy. Fototranzistorlaryň şertli belgilenişleri we elektrik shemalaryna çatylyşlary : **a** – düzümi, **b** – belgilenişi, **ç** we **d** – shemalara birleşdirlişi.

Iýmitlendiriji çeşmäniň zynjyryna fototranzistoryň çatylyşy adaty ikipolýarly tranzistorlaryň birleşdirlişlerine meňzeşdir, sebäbi emitterli geçelgesine göni napryaženiýe, kollektorly geçelgesine bolsa polýary ters napryaženiýe berilýär. Köplenç ýagdaýlarda emitteri umumylaşdyrlan shema ulanylýar (29.11-njy **ç** çyzga seret).

Köp ulanylýan shemalaryň ýene-de bir görnüşi, ol hem bazasy umumylaşdyrlan shemadyr (29.11-njy **d** çyzga seret). Çyzgyda görkezilişi ýaly bazanyň çykalga simi çatylman boş durmaly, hatda käbirlerinde simçykalga bazadan asla çykarylmaýar. Mysal hökmünde **p-n-p** tipli umumylaşdyrlan bazaly fototranzistoryň işleýiş düzgüni 29.12-nji **a** – çyzgyda ýerleşdirildi.



12.12-nji çyzgy. Fototranzistoryň işleýiş düzgüni **a** – çyzgyda, daşky Wolt-Amper häsiýetnamasy **b** – çyzgyda görkezildi.

Düzümi **p-n-p** tertipde gurnalan fototranzistoryň bazasy (ýagny **n** – bölegi) ýagtylyk bilen şöhlelendirlende elektron-deşik jübütleri emele gelýärler. Kollektor-emitter aralygy birleşdirlen $\mathbf{E_K}$ – çeşmäniň elektrik meýdanynyň zarbyna deşikler çydaman kollektora tarap geçip $\mathbf{I_K}$ – fototogy döredýärler, elektronlar bolsa **n** – bölekde (bazada) toplanyp emitter geçelgedäki potensial päsgelçiligi (barýeri) azaldýar. Netijede, emitterden baza tarap çüwdürlüp akýan (inžeksirlenýän) deşikleriň sany (mukdary) diýseň çalt köpelýär we kollektorly geçelgä tarap hereketlenip, onuň üsti bilen kollektora akyp barýarlar. Şular ýaly deşikleriň hasabyna, kollektordaky toguň düzüminde $\mathbf{I'_K}$ – goşulmasy emele gelýär.

Kollektordaky $\mathbf{I_K}$ – umumy tok, deşikleriň döredýän $\mathbf{I_K}$ – tokdan has köp derejede uludyr. Kollektordaky $\mathbf{I_K}$ – togyň şular ýaly birden köpelmegine ýagtylyk akymynyň täsiri bilen düşündirilýär.

Diýmek, fototranzistorlary güýçlendiriji abzal hökmünde-de ulanmak bolar.

Ýagtylygyň ýok wagty (tümlükde) kollektorly geçelgeden diňe tümlük wagty döreýän I_T – tok **akýar**. Beýle bir uly bolmadyk bu tok, deşikleriň emitter geçelgesinden **n** – bazanyň içine girip, soňra kollektor geçelgesini böwsüp kollektora tarap geçýär. Tümlük wagtyndaky I_T – toguň kiçijik bolmagyny, deşikleriň baza (**n** – bölege) geçenlerinde emitterli geçelgeden potensial päsgelçiliginiň (barýeriniň) köpelýänligi bilen düşündirilýär. Şeýlelikde, kollektordan akýan ähli toklaryň jemini şu aşakdaky ýaly düşündirilýär.

$$I_K = I'_K + I_F + I_T = \beta I_F + I_F + I_T = (\beta + 1)I_F + I_T$$

Bu ýerde, $\beta = h_{21E}$ – tok boýunça güýçlendiriş koeffisiýent.

Fototranzistorlarda fototoguň döreýänliginden başga-da signallary güýçlendirmek hadysasy-da bolup geçýär. Sonuň üçin-de bular ýaly fototranzistorlaryň integral duýgurluklary fotodiodlara garanyňda has ýokary bolýar.

Fototranzistorlaryň Wolt-Amper häsiýetnamalary diýlip kollektordaky toguň kollektor-emitter aralykdaky U_{KE} – napräýaženiýe bilen ýagtylyk akymynyň hemişelik (**Φ=const**) ýagdaýyndaky baglanşyklaryna aýdylýar.

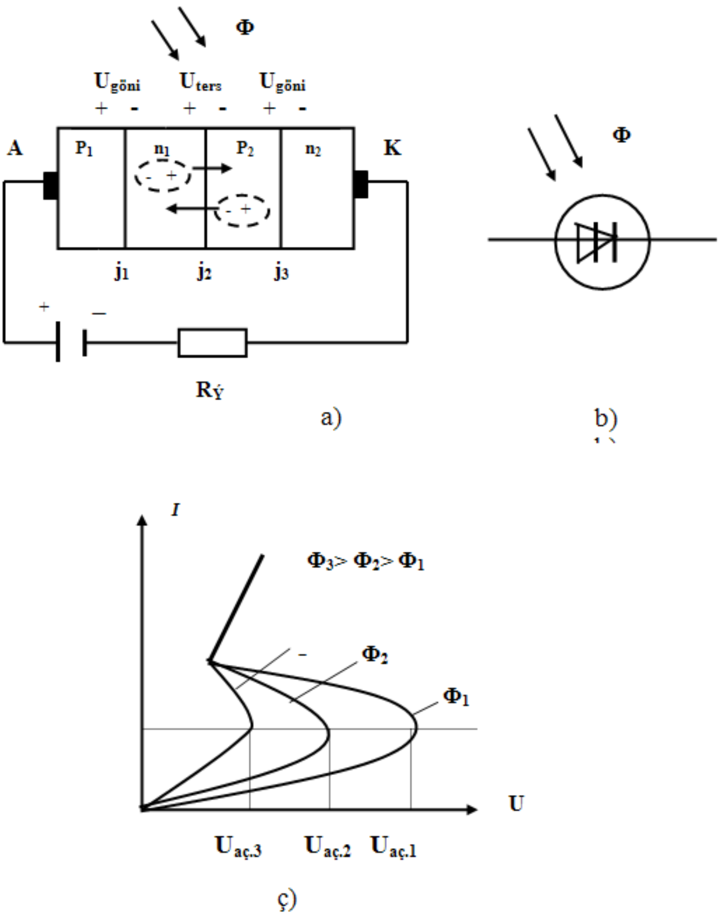
Şeýle seredeniňde bu baglanşyklar adaty iki-polýarly tranzistorlaryň baglanşyklaryna juda meňzeşdir.

Ýeke-täk tapawudy, ol hem hemişelik saklanýan ululuk adaty iki-polýarly bazadaky I_B**-const** bolsa, fototranzistorlarda ýagtylygyň akymydyr, **Φ-const** saklanylýar.

12.9. Fototiristorlar

Fototiristor – fotoelektrik abzaly bolup, togy ýagtylyk akymy bilen dolandyrylýan, gurluşy boýunça dört gatlakly (dört-tirkeşikli) diodly tiristordyr.

Fototiristorlaryň gurluşy, belgilenişi, Wolt-Amper häsiýetnamalary 29.13-njy çyzgyda görkezildi.



12.13-njy çyzgy. Fototiristorlaryň **a** – düzümi, **b** – şertli belgilenişi, **ç** – Wolt-Amper häsiýetnamalary.

Fototiristorlar hem adaty diodly tiristorlaryň gurluşy ýaly $\mathbf{p_1}$-$\mathbf{n_1}$-$\mathbf{p_2}$-$\mathbf{n_2}$ we üç sany **p-n** geçelgeleri bolup, olaryň çetki $\mathbf{j_1}$ we $\mathbf{j_3}$ geçelgeleriň polýarlygy göni, emma ortadaky $\mathbf{j_2}$ – geçelgäniň polýary ters ugurlydyrlar.

Fotorezistora berilmeli naprýaženiýeniň ululygyny anyklanlarynda ýagtylyk akymynyň ýok wagty fototiristor ýapyk ýagdaýda bolar ýaly saýlaýarlar.

Eger-de, adaty tiristorlarda açylýan napryaženiýe dolandyryjy tokdan
$U_{aç}$ (I_{dol}) bagly bolsa, onda fototiristorlarda açylýan napryaženiýe ýagtylygyň akymyndan **$U_{aç}$ (Φ)** baglydyr.

Fototiristorlary ýasanlarynda onuň içki gatlaklary hasap edilýän **n_1** we
p_2 –niň üstlerine ýagtylyk şöhleleri düşer ýaly dury aýnadan penjire goýýarlar. Sebäbi şeýle edilende elektron-deşiklik jübütleri döreýär. Netijede **j_2**-nji geçelgä berilýän ters alamatly **U_{ters}** – napryaženiýeniň täsirinden deşikler **n_1**-nji bölekden **p_2**-nji bölege geçýän bolsalar, elektronlar tersine **p_2**-nji bölekden **n_1**-nji
bölege geçýärler.

Elektron bilen deşikleriň **j_2**-nji geçelgeden yzly-yzyna geçip durmaklary netijesinde, şol ýerde potensialyň päsgelçiligi azalýar we elektrik böwsülmegi (fototiristoryň açylmagy) bolup geçýär.

Ýagtylygyň **Φ** – akymynyň ýitiligi näçe köp bolsa, şonça-da fototiristorlar kiçi **$U_{aç}$** napryaženiýelerde işläp başlaýarlar. Munuň şeýledigini 8.19-nji **ç** çyzgyda Wolt-Amper häsiýetnamanyň ýagtylyga görä üç ýagdaýy
(**$Φ_3$> $Φ_2$> $Φ_1$**) bilen düşündirilýär.

Fototiristor tümlük ýagdaýyndan ýagtylyk ýagdaýyna geçende
(1-mikrosekund wagtyň dowamynda) fotorezistoryň garşylygy 100-lerçe megeomdan 10-larça oma çenli kiçelýär.

Fotorezistorlar ýokary kuwwatly elektrik zynjyrlarynda kommutasiýa işlerini geçirmek üçin ulanylýar (meselem, gijelerine köçeleriň çyralaryny ýakmak ýa-da öçürmek).

Ýagtylygy duýgur abzallaryň harplar we sanlar bilen şertli belgilenişleri (markirowka)

Tehnikada tapawutlandyrlyşlaryna görä**,** ýagtylygy duýgur abzallary üç topara bölýärler, olar : 1. Fotoelektronly ; 2. Fotoelektriki ;
3. Ýylylygyň abzallary.

1. **Fotoelektrik** abzallaryň şertli belgilenişleri.

Birinji element-harp-fotokatodyň tipini görkezýär ; **СЦ** – surmaly we kükürtli , **Ц** – kislorodly-kükürtli, **Ф** – fotoelement,

ФЕК (ФЭУ) – çykalgasy koaksal görnüşli fotoelement, **KFE (ФЭУ)** – köpeldiji fotoelektron abzaly.

Ikinji element – **В** we **Г** – harplary – wakuumly gaz bilen doldurylgy fotoelementler.

Üçünji element – sifr (san) – fotoelement taýýarlanylanda onuň tertip nomeri.

Belgilere mysallar : **С ЦВ-3**, wakuumly element, surmaly we sezili, tertip nomeri üçinji. **ЦГ-4** – gazy zarýadsyzlanýan fotoelement kislorod – sezili, tertip nomeri dördünji.

Fotoelektron köpeldijiler iki elementli belgilenýärler : şertli belgilenişiň birinji elementi – harplar – köpeldiji fotoelektrondygyny aňladýar.

Ikinji elementi – sifrler – nirede işlenilip taýýarlanylsa şol ýeriň tertip nomeri.

Belgilere mysallar : **ФЭУ -19** – köpeldiji fotoelektron, tertip nomeri – **19**.

2. Fotoelektrik abzallaryň şertli belgilenişleri.

Birinji element – iki harp – abzalyň haýsy tapgyra degişlidigini we işleýiş prinsipini aňladýar. Meselem, **ФР** – fotorezistor, **ФD-p-n** geçelgeli abzallardyr, onda **ФУ-p-n** geçelgeli we içinden güýçlendiriji abzaldyr.

Ikinji element – harp – haýsy materialdandygyny aňladýar : **K** – Kremniý, **G** – Germaniý.

Üçünji element – san, **0,01**-den tä **999-**za çenli abzalyň taýýarlanyş tertip nomeri.

Dördünji element – harp – abzalyň haýsy toparlara degişlidigini aňladýar :

Б – iki polýarly (bipolýar) tranzistorlar, **У** – birpolýarly (unipolýarly) fototranzistorlar, **Т** – tranzistorlar.

Ýagtylyga duýgur abzallaryň üçinji bir görnüşi ýylylygyň abzallarydyr. Olaryň şertli belgilenişi.

Birinji element – harp – tapgyryň haýsy klassifikasiýa (topara) degişlidigini aňladýar : **ФР** – fotorezistorlar, **ФD** – fotodiodlar, **ФЭ** – ýarymgeçiriji fotoelementler, **Ф** – elektrowakuumly fotoelementler, **ФТ** – fototranzistorlar, **ФЭУ** (**KFE**) – fotokopeldijiler we ş.m.

Ikinji element – san (sifr) – abzal taýýarlanylanda onuň registirlenen (möhürlenen) nomeri (1-den tä 999-a çenli).

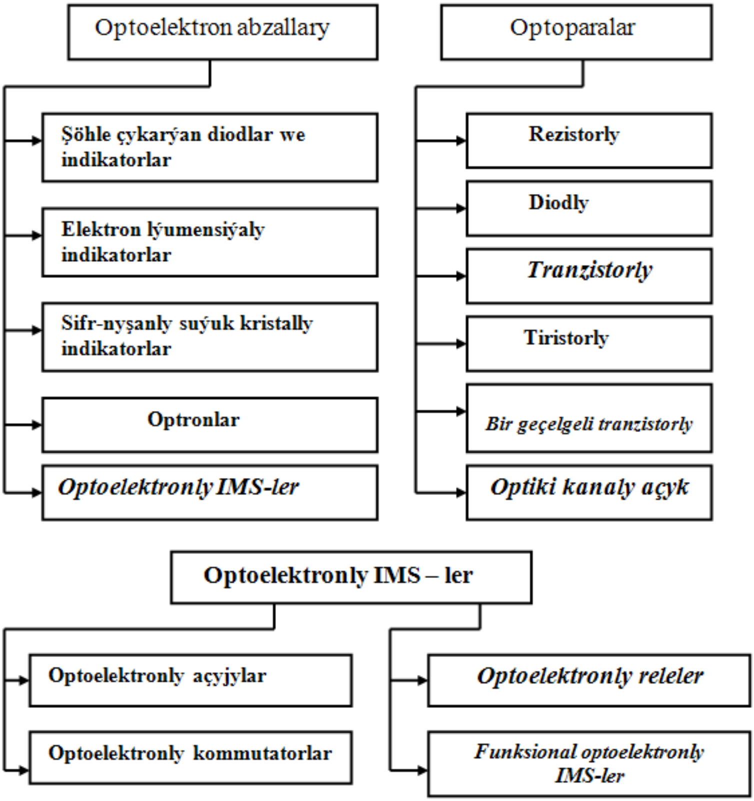
Üçünji element – harp ýa-da san-harp bilelikde.

Konstruksiýasynyň (gurluşynyň) özboluşly taýýarlanyşyny ýa-da haýsy-da bolsa bir parametrinde aýratyn üýtgeşikligiň bardygyny aňladýar.

12.10. Optoelektron abzallary

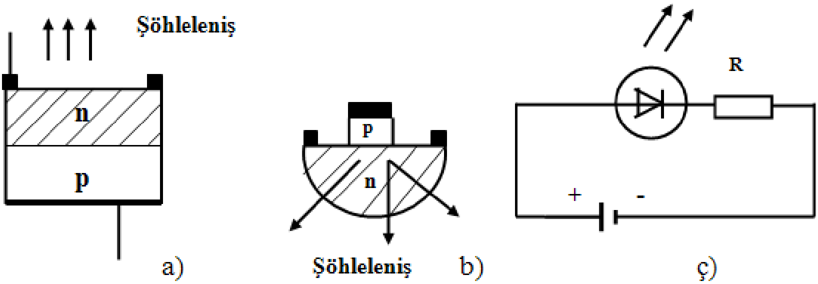
Kesgitlemesi. Optoelektron abzallary diýlip, elektrik signallaryny optiki signallara we tersine özgerdip bilýän ýarymgeçirijiden ýasalan abzallara aýdylýar.Optoelektron abzallarda ýagtylygyň şöhlesi bilen onuň iş düzgüni geregiçe dolandyrylýar. Ýagtylyk şöhlesiniň bitirýän işi edil üçelektrodly çyranyň torunyň, tranzistorlaryň bolsa bazasynyň bitirýän işlerine meňzeşdir.

Optoelektron abzallaryny öz bitirýän işlerine laýyklykda şu aşakdaky toparlara bölýärler : 1) optoelektron abzallary ; 2) optoparlar (optojübütler) ;
oproelektronly integral mikroshemalary (IMS).



Mysal hökmünde ýagtylyga duýgur diodlara (şöhledioda) seredeliň. Şöhlediod elektrik energiýany şöhleledýän ýagtylygyň energiýasyna göni özgerdýän bir sany **p-n** geçişli ýarymgeçirijili abzaldyr.

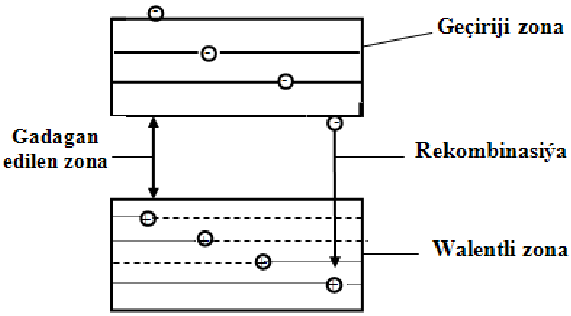
Şöhlediodlaryň ýasalyşynyň iki görnüşi 29.14-nji çyzgyda görkezildi.



12.14-nji çyzgy. **a** – konstruksiýasy tekiz; **b** – konstruksiýasy ýarymsfera; **ç** – shemalara çatylşy.

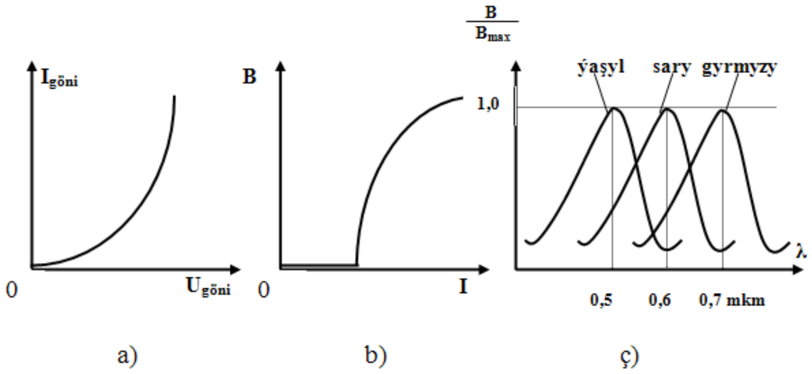
Eger-de şöhlediodlaryň polýarlaryny iýmitlendiriji çeşmäniň polýarlary bilen biratly çatyşdyrsak, onda **p-n** geçelgeden göni ugur boýunça tok akyp başlar. Öz gezeginde deşikler bilen elektronlaryň **p-n** geçelgede özara gapma-garşy hereket edenlerinde rekombinasiýa hadysasy döräp, elektronlaryň geçirijilik zonasyndan walentli zona geçýärkän ýol ugruna gadagan zonanyň giňişliginde şöhle görnüşde özünden energiýany bölüp çykarýar. (29.14-nji çyzga seret).

Energiýanyň şöhlä öwrülýändigini diňe gadagan zonasy giň bolan (arsenid galliýde – **1,5 eW**, fosforid galliýde – **2,2 eW**, karbid kremniýde – **2,5 – 3 eW**) ýarymgeçirijilerde görmek bolýar.Meselem ýöne germaniýde ýa-da kremniýde gadagan zonalarynyň örän (dar) kiçidikleri sebäpli, şöhleler spektoryň görünmeýän bölegine ýylylyk görnüşde bölünüp çykýar (29.15-nji çyzga seret).



29.15-nji çyzgy. Şöhlediodlarda rekombinasiýanyň düşündirlişi.

Şöhlediodlaryň esasy häsiýetnamalary hökmünde Wolt-Amper, ýagtylyk we spektral baglanşyklary kabul edilendir. Bu baglanşyklar 29.16-nji çyzgyda ýerleşdirildi.



12.16-nji çyzgy. Şöhlediodlaryň esasy häsiýetnamalary : **a** – Wolt Amper, **b** – ýagtylygyň şöhlenişiniň tokdan baglanşygy, **ç** – spektral baglaşyklary.

Çyzgyda **B** – ýagtylygyň ýitiligi, **B/B**$_{max}$ – ýagtylyk şöhlesiniň ýitiligini aňladýan düýgurlyk, **λ** – ýagtylygyň tolkun uzynlygy.

Şöhlediodlaryň esasy parametrleri hökmünde onuň iş wagty berilýän
U – naprýaženiýä, üstünden akýan , **I** – toga, bölünip çykýan ýagtylyk şöhlesiniň **B** – ýitiligine hem-de ýagtylygyň **λ** – tolkun yzynlygyna düşünilýär.
Şöhlediodlaryň işleýän wagty üstünden akýan togy **3 – 4 mA**, naprýaženiýesi
2 – 5 – 5,5 w töweregidir. Şöhlediodlaryň iň ýagty şöhlesi üstünden **3 mA** tok akanda **120 kd/m^2** deň bolan ýaşyl şöhledir. Beýleki şöhlediodlaryň ýagtylygy **20 – 50 kd/m^2** (**kd/m^2 – 1 metr** kwadrat meýdana düşýän şöhläniň ölçeg birligi, kendel – Iňl. – şöhle).Şöhlediodyň peýdaly täsir koeffisiýenti (**PTK**-sy) **1 – 3%** töweregidir. Täsirediş tizligi **10^{-7} – 10^{-9} sek.**

Şöhlediodlaryň ýagtylyga bolan duýgurlygy – diýlip ýagtylyk şöhlesiniň ýitiliginiň sähelçe **ΔB** üýtgemeginiň , üstünden akýan tok birliginiň sähelçe **ΔI** üýtgemegine bolan gatnaşygyna aýdylýar.

$$B_0 = \frac{\Delta B}{\Delta I}$$

Şöhlediodlaryň harplar we sifrler bilen şertli belgilenişleri.

Birinji element – **A** harpy, galliý birleşmäni aňladýar.

Ikinji element **Л** – şöhlelenýän dioddygyny aňladýar.

Üçünji element – **sifr** – işleýşini ýa-da nirede ulanylmagyny aňladýar.

Dördünji element – **sifr** – haýsy tapgyrdaky tertip nomeri.

Bäşinji element – **harp** – birtipli abzallaryň haýsy topara degişlidigini aňladýar.

Belgilenişine mysal : **АЛ307 Б** – Galliý birleşmäniň esasynda, ýagtylygy öndüriji diod, informasiýany wizual aňlaýar (3), **07** – ýygnalandaky tertip nomeri, **Б** – topary.

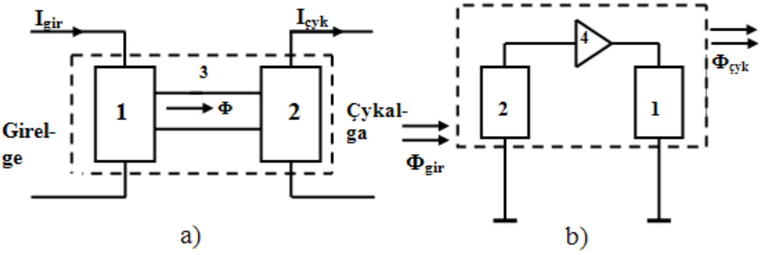
12.11. Optronlar

Kesgitlemesi. Optronlar optoelektronly ýarymgeçiriji abzal bolup, düzüminde ýagtylygyň şöhlesini öndüriji çeşmesi we şöhläni kabul ediji ýüki bolup, olar özara ýa optiki ýa-da elektrikleşdirlen optiki birleşdirmeleri bilen üpjin edilen abzaldyr.

Optronlaryň gurluşy (düzümi). Optronyň girelgesindäki we çykalgasyndaky simjagazlara daşky çatymlar diýilse, içindäkilere içki çatymlary diýilýär. Daşky we içki çatymlarynyň görnüşlerine görä optronlary iki topara bölýärler.

1. Içi foton baglanşykly, daşy bilen elektrik baglanşykly (29.17-nji **a** çyzgy).
2. Daşy bilen foton baglanşykly, içi elektrik baglanşykly (29.17-nji **b** çyzgy).

29.17-nji **a,b** çyzgylardaky belgileriň beýany :
1 – şöhläni dörediji, **2** – şöhläni kabul ediji, **3** – şöhläni geçiriji,
4 – elektrik signallaryny güýçlendiriji.



12.17-nji çyzgy. Optoelektronly elektronlar. **a** – içi foton daşy elektrik baglanşykly, **b** – içi elektrik daşy foton baglanşykly.

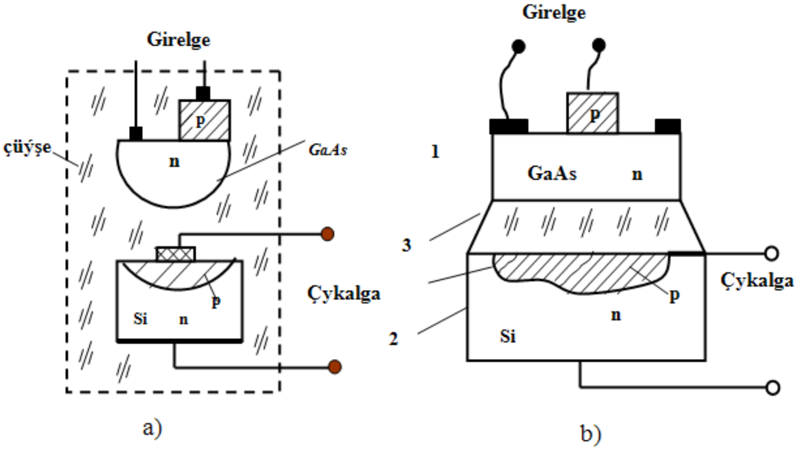
Içi foton, daşy elektrik baglanşykly optronlar elektrik signalyny – optiki signal – soňra ýene-de elektrik signalyna öwüriji bolsa, içi elektrik, daşy foton baglanşykly optronlar optiki signaly elektrik signalyna, soňra ýene-de optiki signala öwürüjidir.

Optron abzallarynyň gurluşynda iki görnüşi tapawutlandyrýarlar :

a) diskretli korpussyz elementlerden , **b) integral** mikroelektronly optron.

Diskret elementleri korpussyz optronlar, hemme elementleri bilen metaldan ýasalan germetik umumy korpusyň içinde ýerleşdirilýär.

Optronyň içine şöhlegeçiriji bolar ýaly ýörite aýna böleklerini eredip guý- ýarlar. Şular ýaly optronlaryň dört sany çykalga simi bolup, olaryň ikisi girelge, ikisi bolsa çykalga üçindir (29.18-nji çyzga seret).



12.18-nji çyzgy. Optronlaryň gurluşlary : **a** – diskretli korpussyz elementlerden , **b** – integral mikroelektronly.

Mikroelektronikada optron abzallary integral tehnologiýasynyň usuly bilen

taýýarlanylýar. Integral tehnologiýasynyň usuly bilen taýýarlanylan IMS-optronyň
gurluşy 29.18-nji **b** – çyzgyda görkezildi. Şeýle mikroelektronly optronlaryň esasy **n**
– tipli kremniýden bolup, onuň ýokarsynda **p** – gatlak emele gelenden soň planlaşdyrlan – diffuziýa boýunça şöhle kabulediji formalanýar (kemala gelýär).

Emele gelen **p-n** geçelgeli gurluşa fotodiod diýilýär. Onuň-da ýokarsyndan şöhlegeçiriji **3** – Selenli-aýna ýerlesdirilýär. Şol

Selenli-aýna böleginiň üstünden **n** – tipli **GaAs** – Arsenid galliý berkidilýar.Arsenid galliýniň ýokarsynda bolsa diffuzirlenen **p** – gatlak formalanýar (kemala gelýär). Her bir gatlakda-da daşky shema bilen birleşdirmek üçin Om garsylykly sim çykalgalar bilen üpjin edilýär.

Şeýlelikde, biz diodly optron abzala seretdik. Bu abzallarda ýagtylygyň çeşmesi şöhlediod bolup, kabuledijisi fotodioddyr. Şular ýaly diodly optronlaryň garşylygy örän uly (**10^2 – 10^4 MOm)** töweregi bolup, daşky shemalar üçin (optronyň girelgesinde-de, çykalgasynda-da) ýapyk ýagdaýy emele getirýär. Optronda şöhläniň döremegi bilen onuň girelgesindäki we çykalgasyndaky garşylyklar **10^2 – 10^4 Oma** çenli kiçelýär. Şeýle çalt kiçelmek ýa-da ulalmak toguň **10^6 – 10^7 Gs** töweregi ýygylykda amala aşýar. Şeýle optronlar shemalary açmak – ýapmak üçin açar hökmünde giňden ulanylýar.

Tranzistorly optronlar. Bu abzallarda kabulediji hökmünde fototranzistorlar ulanylýar. Tranzistorly optronlaryň ýagtylyga bolan duýgurlygy fotodiodlara garaňda has ýokarydyr. Şonuň üçin-de, tranzistorly optronlar ykdysady tarapdan has tygşytly hasap edilýär. Daşky shemalary açyp – ýapmak mümkinçiligi **10^5 Gs** töweregi ýygylykda amala aşýar.

Tiristorly optronlar. Bu abzallarda kabulediji hökmünde fototiristorlar ulanylýar. Tiristorly optronlaryň girelgesinde kiçijik (**10 mA** töweregi) impulsly tokda, onuň çykalgasynda örän ullakan (**5 A** töweregi) toguň impulsyny işletmäge mümkinçilik döredýär. Şular ýaly tiristorly optronlar uly kuwwatly daşky shemalar üçin giňden ulanylýar.

Ýokarda seredilen üç sany optronlaryň üçüsi-de gözaçyp-ýumasy salymda, tiztäsirli hem-de çylşyrymly shemalary açmak we ýapmak üçin, ýagny iki ýagdaýly açar hökmünde giňden ulanylýar.

Dürli häsiýetli elektrik zynjyrlaryny kontaktsyz awtomatiki usulda dolandyrmak gerek bolsa rezistorly optronlar (ýagtylygy kabul ediji fotorezistorlar) ulanylýar. Bu optronlaryň tiz-täsirligi beýle bir ýokary bolmasa-da, girelge signallary üçin giň diapazony we girelgedäki toklaryň tempiniň kiçiligi bilen tapawutlanýar.

Has çylşyrymly optronlar, ýagtylygy ýuwutmakdan ýa-da şöhlelendirmekden başga-da çykalgasy güýçlendiriji abzal hökmünde-de ulanylýar. Şeýle çylşyrymly optronlaryň elementleriniň hemmesi integral tehnologiýanyň usuly bilen bir bitewi korpusda ýerleşdirilýär.

Optronlaryň harplar, sifrler bilen şertli belgilenişleri :

Birinji element **A** – harpy, Arsenid-Galliý ýa-da başga ýarymgeçiriji materialy aňladýar, **K** – harpy, Karbid-Kremniý we başga birleşmeler.

Ikinji element – **O** – harpy, Optrondygyny aňladýar.

Üçünji element – **harp**, **P** – rezistorly, **Д** – diodly**, T –** tranzistorly,
У – tiristorly.

Dördünji element – sifr – nähili işe niýetlenendigini ýa-da abzalyň işlediliş prinsipini aňladýar.

1 – şöhle çykarýan diodlar (infrogyzyl).

2 – moduly şöhlelendiriji (infrogyzyl şöhle).

3 – maglumatlara (informasiýalara) wizual garaýan .

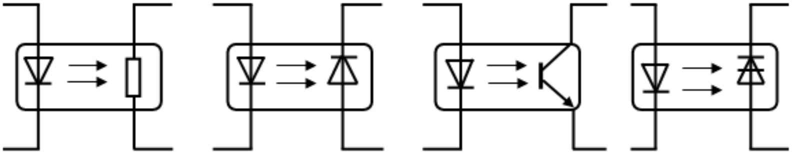
4 – nyşanly (belgili) indikatorlar.

Bäşinji element – **sifr**, abzal taýýarlanylanda onuň tertip nomeri.

Altynjy – element – **harp**, birtipli optron abzallaryň haýsy (nähili) topara degişlidigini aňladýar.

Meselem, **AOD101** – diodly optron-Arsenid-Galliýden ýasalandygyny, kiçi kuwwatlydygyny, tertip nomeriniň **01**-digini aňladýar.

Optronlaryň shemalarda grafiki görnüşde şertli belgilenişleri 29.19-njy çyzgyda görkezildi.



12.19-nji çyzgy. Optronlaryň shemalarda grafiki görnüşde şertli belgilenişi: **a** – rezistorly optron, **b** – diodly optron, **ç** – tranzistorly optron, **d** – tiristorly optron.

12.12. Ýarym geçiriji lazerler

Alymlar N.G.Basow, Ýu.M.Popow, O.N.Krohin 1961-nji ýylda ýarymgeçiriji materiallardan lazerleri döretmegi hödürlediler, 1964-nji ýylda bolsa olar fundamental barlaglar netijesinde ýarymgeçirijilerden (GaAs) döredilen kwant generatorlar üçin döwlet sylagyna mynasyp boldylar. Ýagtylyk diody bilen lazeriň tapawudy şundan ybarat, ýagny şöhlediodlardan şohlelenmek spontan (ýarylmak) we kogorent däl görnüşde, lazerlerde bolsa şöhlelenmek stimulirlenen we kogorent görnüşde bolýarlar. Şöhlediody kogorent optiki şöhläni döretmek üçin, ony açyk rezonatorda ýerleşdirmek gerek hem-de položitel ters aragatnaşygy üpjün etmeli. Ýarymgeçirijili lazerlerde rezonatoryň aýnasy deregine onyň (ýôrymgeçirijiniň) taraplary hyzmat edýärler.

“Kristal-howa” araçäkdäki döwülmek görkezijisiniň tapawudynyň bolmagy ýeterlik derejede yzyna serpikmek koeffisiýentini döredýär.

Lazerleriň bir görnüşli materialdan ýasalanyna, ýagny GaAs-dan, gomolazer diýilýär. Lazerleriň effektiw görnüşi, geterolazarler-geterogeçiş esasynda inžeksion lazerler alym J.I.Alferow tarapyndan görkezildi. Bular ýaly lazerde geçişleri döretmek üçin dürli gadagan zonalary bolan iki görnüşli ýarymgeçirijiler peýdalanylýar. Adatça olar GaAs we GaAlAs bolýarlar.

Geterolazerleriň iki görnüşi tapawutlendyrylýarlar: ikitaraplaýýn we birtaraplaýyn geterogurluşly. Birtaraplaýyn getegurluşy, p-n-geçişiň ýakynynda inžeksion tok äkidijileriň diffuziýa aralygyndan kiçi menzilde ýerleşen, p-n-geçiş bilen geterogeçişiň kombinasiýasy hasaplanýar (Surat 12.2.). Bular ýaly gurluşda döwülmek koeffisiýentiniň kiçelmegi we geterogeçişde potensial barýeriň ulalmaklygy netijesinde aktiw bölekde optiki şöhlelenmegiň we inžektirlenen äkidijileriň güýçli aýratynlaşmagyna (lokalizasiýa) ýetilýär. Birtaraplaýyn geterogurluşy ýuka P^{+}- tipli Ga_{1-x} Al_xAs birleşmäni ($0 \leq x \leq 1$), n-tipli GaAs podložkanyň (gatlagyň) üstünde döredilýär. Bellemeli zat P^{+} diýmeklik P-tipli GaAs materialyň has köp goşantlysy hasaplanýar, özi hem oňat optiki kontakty (sepleşmäni) üpjün edýär. Birtaraplaýyn geterogurluşlar gomolazerlere garanyňda oňat hem bolsa, onyň ýetmezçiligi bolýar. Onyň gomolazerler bilen araçäginde döwülmek görkezijisi az üýtgeýär, ol bolsa şöhläniň aýratynlaşmagyny peseldýär we passiw bölekde şöhle ýitgisine eltýär. Ondan başga-da gomogeçiş, tok äkidijileri üçin ýeterlik çäklendiriji barýer bolup bilmeýär, şoňa görä inžektirlenen öýjügiň uly süýşmeginde aktiw zonada äkidijileriň toplumy (konsentrasiýasy) kiçelýär. Bu ýetmezçilik ikitaraplaýyn geterogurluş P^{+}- we-n-bölekli $Ga_{1-x}Al_xAs$ ýarymgeçirijiniň arasynda ýerleşýän p-GaAs materiala aýdylýar. Köplenç bu gurluşy, elektron geçuirijili GaAs podložkada (materialda) ýerleşdirilýär, onyň üstünde bolsa elektrik sepi (kontakty) üpjün etmek üçin öýjükli geçirijisi bolan p-GaAs ýerleşdirilýär (surat 12.4). Bu görnüşli geterogurluşly lazeriň işleýişine seredeliň. P-P^{+}- geterogeçişde $Ga_{1-x}Al_xAs$ gadagan zolagyň giňligini ýone GaAs garanyňda ulaltmaklyk potensial barýeri (beýgelmegi) döredýär. Bu barýer bolsa inžektirlenýän elektronlary gaýtarýar. Ikinji n-p-geçiş (ýagny n-Ga_{1-x} Al_xAs-p-GaAs geçiş) öýjükleriň n-tipli bölegine geçmeklihe zyýan (päsgel) berýärler, ol bolsa öz gezeginde, elektronlaryň geçiş bölegine (oblastyna) inžektirlenmegine mümkinçilik bermeýär. Gomolazerler bilen deňeşdirileninde ikitaraplaýyn geterogurluşda toguň dykyzlyk çägi takmynan 20 gezek kiçelýär. Bu ýagdaý bolsa diňe suwuklandyrylan azodyň temperaturasynda alynýan uznüksiz şöhläni režimi temperaturasynda hem almaklyga mümkinçilik berýär.

Ikitaraplaýyn geterogurluşlaryň häsiýetnamalaryny ýene-de gowulandyrmak ýoly-lazeriň aktiw bölegini ondan ep-esli giň bolan

kristalyň passiw böleginiň içinde, zolak görnüşde döretmekden ybarat bolýar.

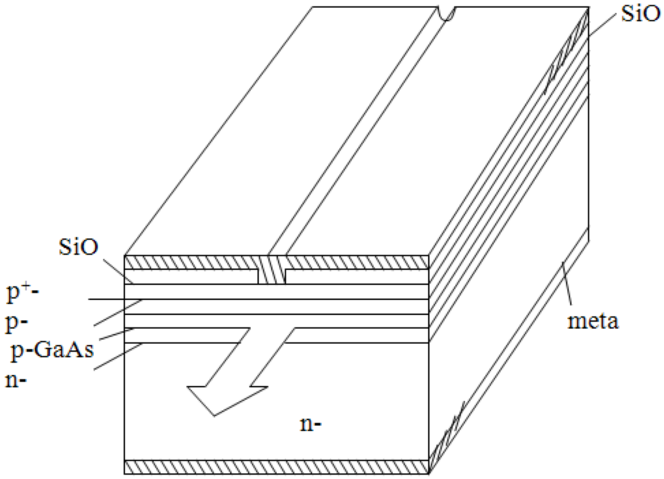
Bular ýaly lazerlere zolakly sepli ýa-da ýöne zolakly hem diýilýär, olaryň beýlekilerine garanyňda birnäçe oňaýly taraplary bolýarlar:

- Şöhle az meýdany bolan bölekden çykýar, beýle ýagdaýda lazery şöhleäkidiji bilen sazlamaklyk ýönekeý bolar.
- Ýygylygy aýyrmak oňat bolar, sebäbi ýygylyk bölünip çykýan bölek ýarymgeçirijiniň has pes temperaturaly böleginde-passiw zonanyň içinde ýerleşýär.
- Lazeriň iş togy kiçelýär.

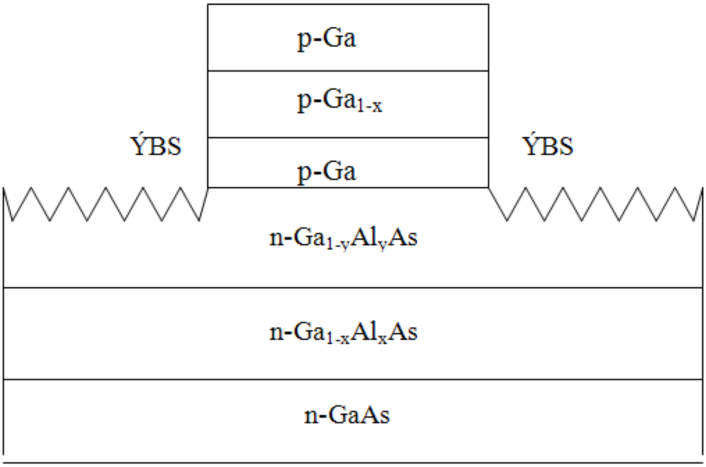
Ýöne, zolakly lazerde tok çäginiň dykyzlygy şol bir materialdan ýasalan tekiz lazere garanyňda birnäçe gezek uly bolýar. Zolakly sepi bolan lazeriň gurluşynyň birnäçe görnüşi bar, olaryň içinde iň kiçi tok çägi bolýany zolakly lazeriň mezagurluşy bolany hasaplanýar.

Integral-optika shemalary üçin lazeriň aýratynlyklary bolýarlar. Lazeriň açyk rezonatorlarynyň gandal gaýtaryjy üsti belli bir derejede komponentleri integrirlenende kynçylyk döredýär. Şoňa görä periodik gurluşyly ýarymgeçirijilerden inžeksion lazerler işlenip düzülen: breggowyň serpikdirijili ýaýradylan (BSÝ) we ters aragatnaşykly ýaýradylan (TAÝ) lazerleri döredilan.

Belli bolşy ýaly, periodiki gurluşda, tolkun ýaýramak mümkinçilik berilen ýygylyk zolaklary, tolkun ýaýramaklygy mümkin bolmaýan ýygylyk zolaklaryndan aýrylýarlar. Şoňa görä bular ýaly gurluşlar ýygylyk-saýlaýjy režektorly süzüjüler ýa-da serpikdiriji aýna hökmünde peýdalanylýar. Periodiki gurluşlar dielektrik tolkunäkidijiniň galyňlygyny ýa-da döwülmek görkezijisini periodik üýtgetmek usuly bilen alynýar. Bular ýaly periodik gurlyşlara başgaça difraksiýa gözenegi hem diýilýär. Difraksiýa görenigiň kömegi bilen serpikdiriji effekti almak üçin birnäçe ýüzlerçe ştrihler (periodlar) gerek bolýanlygy kesgitlenen. Özi hem ştrihlariň aralygy Breggiň şertini kanagatladyrmaly, ýagny $l_B=m\lambda_B/2$ deňlik bolmaly, bu ýerde m-difraksiýa derejesi; λ_B-dielektrik tolkunäkidiji materialdaky şöhläniň tolkun uzynlygy.



Surat.12.4. Ikitaraplaýyn geterogurluşy lazer.



Surat.12.5. Ýaýran breggow serpikdirijili lazerler.

Breggiň serpikdiriji ýaýramakly (BSÝ) lazeriň shemasy surat 12.5. getirilen. Bu lazeriň ýetmezçilik tarapy iş togunyň ýokary dykyzlykly bolmagy hasaplanýar, sebäbi aktiw bölekden çykarylan ýaýradylan serpikdirijilerde ýuwdulmak (siňmek) zerarly tolkun uzynlygynyň goşmaça ýitgisi bolýar.

Ters aragatnaşykly ýaýradylan (TAÝ) lazerde bolsa periodiki gurluş bütin generirlemegiň aktiw bölegi boýunça ýaýradylan. Položitel ters aragatnaşyk bolsa Breggiň ters ýaýramagynyň hasabyna döredilýär.

Bu görnüşde lazeriň tolkun uzynlygynyň temperatura duýujylygy bir dereje peselýär.

Ýarymgeçirijilerden ýasalan lazerler ýuwaş-ýuwaşdan we birbada (düzüminiň wagt boýunça üýtgemegi) netijesinde işlemek wagty (resursy) çäkli bolýar. Ýuwaş-ýuwaşdan degerdirlemek toguň dykyzlygyna we impulsyň çuňlygyna (skwažnostyna) bagly bolýar. birbada bolýan degredirlemek bolsa, lazer diodynyň aşa gyzmagy netijesinde, onyň gapdal üstleriniň zaýalanmagyna (döwülmekligi) hasaplanýar. Şöhle çeşmeleriniň esasy häsiýetnamalary tabl.12.1.-de getirilen.

Tablisa 12.1.

Şöhle çeşmeleriniň häsiýetnamalary.	Şöhlediodly	Lazer
Kuwwat, mWt.	1…5	Köpmodaly – 40’ Bir modaly – 5…10
Şöhlelenmek effektiwligi, %.	0,03	2 – 4
Modulýasiýa.	IKM	IKM
Maglumat ibermek tizligi, G bit/s.	0,1 çenli	5 çenli
Spektral liniýalaryň giňligi, nm.	30…50	0,1…0,5
Tolkun uzynlygy, mkm.	0,85	1,3
Işleýän wagty, sag.	$10^5…10^6$	10^4

Netijede, gaty jisimlerden ýasalan lazerleriň optiki süýümli aragatnaşyk liniýalarynda (OŞAL) peýdalanmak perspektiwalaryna seredeliň. OŞAL üçin gaty jisimli alýuminittriý granatyň [AIG-

(birleşmesiniň)] niodim (Nd) bilen goşant goşulan (gysgaça AIG Nd-lazer) ähmiýetli bolýar.

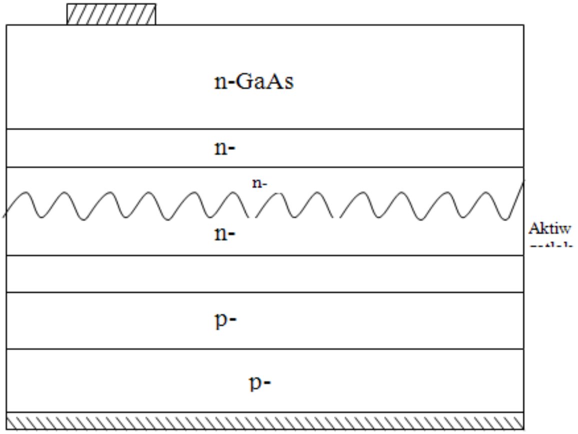
Gaty jisimli lazeriň gurluş shemasy 12.7-de getirilen. Steržen 1 (AIG Nd) gapdal üstünden (GaAlAs) 2 şöhlediodyň kömegi bilen şöhle energiýa berilýär (nakaçiwaýetsiýa). Plastina 3 ýylylygy alyp gitmek üçin peýdalanylýar. Şöhlediod we alýuminiittriý granat (AIG Nd) kristalynyň aralygy sazlaýjy material 4 bilen doldurylýar. Kristalyň gapdal üstleri bilen optiki rezonatr döredilen. Şöhle enrgiýasyny bermeklik haýsy hem bolsa bir gapdal üstünden amala aşyrylýar, beýlekisinden bolsa şöhle çykarylýar. Berilýän we çykarylýan şöhleleriň kiçi burç tapawudy bolany sebäpli, şöhläni girizmekligiň ýokary effektiwligini üpjün edýär. Bular ýaly lazerleriň ýene-de bir oňaýlygy şöhle spektriň giňliginiň kiçi we birmodoly režimde az galmagally işlemek mümkinçiliginiň bolmagydyr. Ýöne, häzire çenli optiki süýümli ulgamyň liniýasynda giňden peýdalanylmaýar, sebäbi, olar ýarymgeçiriji lazerlere garanyňda uly göwrümli, pes peýdaly täsir koeffisentli, az işlemek resursynyň bolmagy, daşky modulirlemegiň we daşky şöhle energiýasyny bermekligiň (nakaçki) gerek bolmaklygy ýaly ýetmezçiligi bar. Häzirki wagtda onyň göwrümini kiçeltmek, resursyny ýokarlandyrmak we peýdaly täsir koefisentini ulaltmak barada işler alynyp barylýar.

Optiki süýümli aragatnaştyk liniýalary üçin şöhle çeşmeleri we kabul edijiler kwant-elektron modullar (KEM) görnüşde döredilýär. Käbir KEM-iň esasy parametrleri tablisa 12.2-de getirilen.

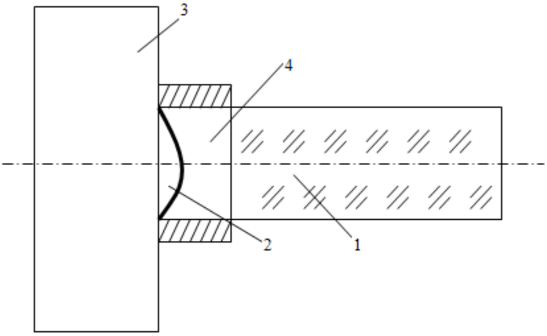
Tablisa 12.2.

Häsiýetnama	MPR-1-1A MPR-12A MPR-13A	KEM-8-4PRA	KEM-8-4PRB	KEM-34-4PRA	KEM-34-4PRB
Signalyň tizligi, Mbit/s.	8,5	8,5	8,5	34,5	34,5
Sign./galmag.=24 dB bolanda kuwwat çägi, Wt	$3\cdot10^{-6}$	$1,5\cdot10^{-6}$	$7,5\cdot10^{-7}$	$3\cdot10^{-6}$	$7,5\cdot10^{-6}$

Duýujylyk, W/Wt		$9\cdot 10^{+5}$	$9\cdot 10^{+5}$	$4\cdot 10^{4}$	$4\cdot 10^{4}$
Ýalňyşlyk ähtimallyk	$1\cdot 10^{-9}$	$1\cdot 10^{-9}$	$1\cdot 10^{-9}$	$1\cdot 10^{-9}$	$1\cdot 10^{-9}$
Geçiş häsiýetnamasynyň ösüş wagty, ns	10	20	20	7	7
Signalyň çykyşdaky napryaženiýesi, W		2	2		
Peýdalanylýan tok, mA	120	50	50	60	60
Umumy işläp biljek wagty, sag.	10^{4}	10^{4}	10^{4}	10^{4}	10^{4}
Temperatura Interwaly, ^{o}S	-50…+55	-10…+10	-10…+40	-10…+40	-10…+40



Surat.12.6. Ters aragatnaşykly ýaýradylan lazer.



Surat.12.7. Gaty jisimden ýasalan lazer.

Modullar germetiki mikropribor OŞAL boýunça maglumatlary standart tizlik bilen ibermek üçin (2,048, 8,448, 34, 448, 139, 264, 565 Mbit/s) işlenip düzülen. Olaryň öndürülişinde ýuka plýonkanyň gibrid tilsimaty peýdalanylan. Ibariji KEM-iň optiki razýomy (birikdiriji enjamy), diametri 50 mkm bolan optiki kabele niýetlenen. Ýarymgeçirijili lazer bilen razýomyň arasynda ýitgini azaltmak maksady bilen kem-de sazlayjy enjam peýdalanylan. KEM-ň elektron shemasy ony TTl görnüşli standart signal bilen ýa-

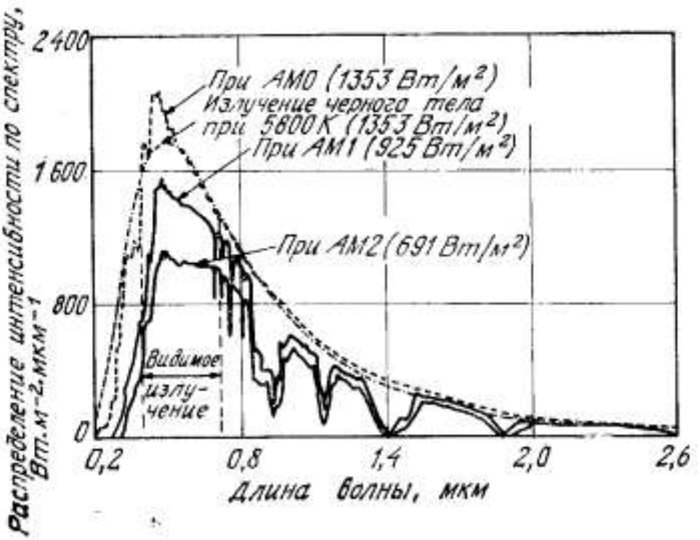
da SEL integral mydamalyk saklamak üçin nakaçka shemasy peýdalanylan.

13-nji bap. Gün batareýalary

13.1. Günüň şöhlelenmesi we üýtgetmäniň ideal effektiwligi

13.1.1. Gün şöhlelenmesi

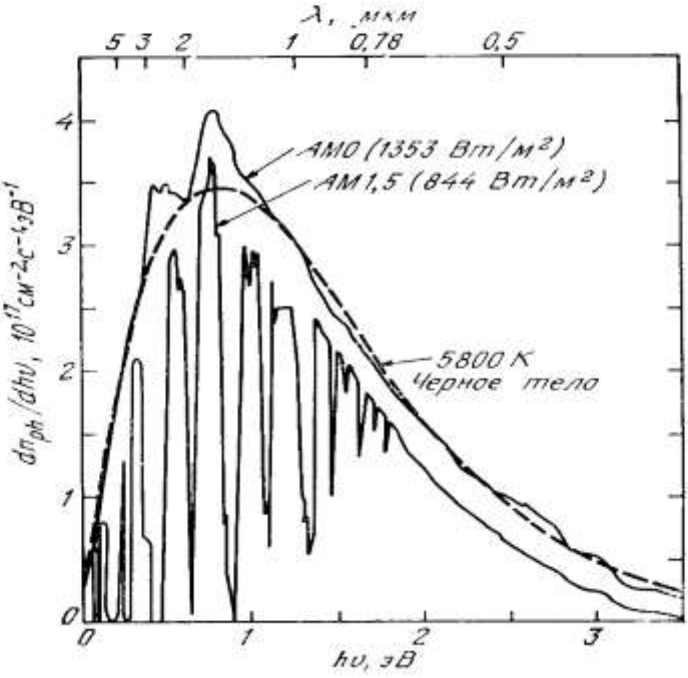
Gün şöhlelenmesiniň energiýa çeşmesi bolup termoýadro reaksiýasy hyzmat edýär. Her sekuntda takmynan $6*10^{11}$kg H_2 (wodorod) He (geliý) öwrülýär. Bu ýagdaýda massanyň defekti $4*10^3$kg deň bolup, $E=mc^2$ görnüşli Eýnşteýniň gatnaşygy netijesinde $4*10^{20}$ Joul Energiýanyň bolup çykarylmagyna getirýär. Bu energiýanyň esasy bölegi elektromagnit şöhle görnüşinde ultramelewşeden infra gyzyl şöhlä çenli diapazonda (0,2-3mkm) göýberilýär. Häzirki wagtda günüň doly massasy takmynan $2*10^{30}$kg deňdir we bu energiýanyň hemişelik bölünip çykmagyny takmynan (10^{10}) ýa-da 10 milliard ýyl üpjün edip biler.Günden Ýere çenli deň bolan ortaça aralykdaky boş güňişlikdäki gün şohlelenmesiniň intensiwligine gün hemişeligi diýilýär we onuň ululygy 1353 Wt/m^2 deňdir. Günüň ýagtylygy, atmosferanyň üstünden geçende, infragyzyl şöhleleriň suw buglary tarapyndan, ultramelewşe şöhleleriniň ozon gatlygy tarapyndan sindirilmegi netijesinde we howanyň düzümindäki tozanlaryň we aerozolyň şöhlelenmäni dargatmagy netijesinde azalýar.Ýeriň üstüne düşýän gün şöhleleriniň intensiwligini atmosferanyň edýän täsiriniň görkezijisi (AM) “howa massasy” bilen kesgitlenýär. Howa massasynyň ululygy gün bilen zenitiň arasyndaky burçuň sekansina geňdir (Sec Θ).13.1-nji suratda dört sany gün şöhlelenmeesiniň spektrler boýunça paýlanyşynyň intensiwligi görkezilendir.



13.1-nji surat. *Gün energiýasynyň spektrler boýunça paýlanyşyny görkezýän dört sany egri çyzyk.*

Ýokarky egri çyzyk gün spektriniň atmosferadan daşarda ýa-da howa massasy nola deň bolandaky (AMO) görnüşidir. Bu paýlanmany "gara jisimiň" 5800 Kelwin temperaturadaky intensiwliginiň paýlanşy bilen approksimasiýa edip bolar. AMO spektr kosmiki gämilerdäki we hemralardaky gün batareýalarynyň hilini kesgitleýär.

AMI spektr haçanda gün Zenitde bolandaky, ýeriň üstüne düşýän gün şöhlelenmesiniň paýlanyşynyň intensiwligini görkezýär. Bu ýagdaýda doly şöhlelenme kuwwaty takmynan ~925 Wt/m^2 deňdir. AM2 spektr haçanda $\Theta = 60^o$ deň bolanda ýüze çykýar. Bu ýagdaýda doly şöhlelenme kuwwaty 691 Wt/m^2 deňdir. Ýerdäki ortaça şöhlelenme intensiwlik 1,5 ululykly howa massasynyň üstünden geçen şöhlelenmäniň intinsiwligine geňdir we bu günüň gorizonta görä 45° ýagdaýyna gabat gelýär. 13.2-nji suratda ýekelik energetiki interwaldaky fotonlaryň sanynyň AMO we AM 1,5 şertlerde 1sekuntda 1cm^2 meýdandaky paýlanyşy görkezilendir.



13.2-nji surat. *AMO we AM 1,5 şertlerde günden gaýdýan fotonlaryň akymynyň spektral paýlanyşy.*

Biz tolkun uzynlygyny (mkm), fotonyň energiýasyny elektron (ElektronWolt,eW) öwürmek üçin aşakdaky formulany ulandyk:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{1,24}{h\nu} \qquad (13.1)$$

AM 1,5 şertde gün şöhlelenmesiniň doly kuwwaty 844 Wt/m^2 deňdir.

Gün elementlerini effektiw ulanmak üçin dürli regionlardaky ýylyň dowamyndaky düşýän gün energiýasynyň mukdaryny bilmek gerekdir.

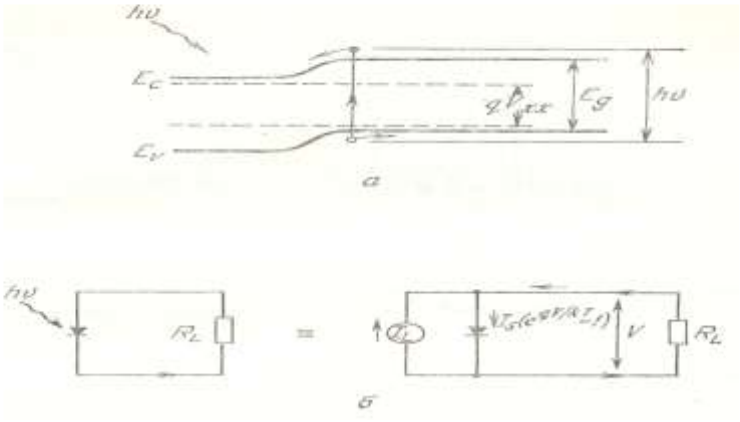
30.3-nji suratda ýeriň üstündäki gün energiýasynyň paýlanyşynyň kartasy görkezilendir.

13.3-nji surat. *Ýeriň üstündäki gün energiýasynyň paýlanyşynyň kartasy. Kontur çyzyklar deň şöhle düşýän oblastlaryň üstünden geçýär. Sanlar bilen ýylyň dowamyndaky ýagtyly sagatlaryň mukdary görkezilendir.*

Kontinentlerde gün şöhlesiniň düşýän ortaça derejesiniň ýokary ýeriniň köp bolanlygy üçin ýakyn geljekde gün energiýasy dünýä möçberinde giňden ulanylar.

13.1.2.Üýtgetmäniň ideal effektiwligi

Adaty (meselem: p-n geçiş) gün elementiniň diňe bir häsiýetli energiýasy – E_g rugsat berilmedik zolagy bardyr. Haçanda günüň ýagtysy elemente düşende, fotonlaryň energiýasy E_g -den pes bolsa, olar elementiň çykyş kuwwatyna täsir etmeýär. Energiýasy E_g –den köp bolan her bir foton, energiýasy E_g deň bolan çykyş kuwwatyny berýär, energiýanyň galan artyk bölegi bolsa ýylylyga öwrülýär. Ýýtgetmäniň effektiwligini (ýa-da ideal ПТК) kesgitlemek üçin ýagtylandyrylýan p-n geçişiň energetiki diagrammasyna seredeliň (13.4-nji a surat).



13.4-nji surat. *p-n geçişiň (a) gün şöhlesi düşen wagtyndaky energetiki diagrammasy,(b)gün elementiniň ideallaşdyrylan ekwiwalent shemasy.*

Gün elementiniň ideal wolt-amper häsiýetnamasy bar diýip çäk edeliň. Oňa degişli bolan zynjyr 13.4-nji (b) suratda görkezilendir. Ol shemada p-n geçişe parallel edilip I_L hemişelik tok çeşmesi girizilendir we ol shema gün şöhlelenmesiniň deňagramlaşmadyk äkidijileriniň oýandyrmasyny suratlandyrýar. Bu erde I_s doýdurma togy, R nagruzkanyň garşylygy.

Şeýle enjamyň wolt-amper häsiýetnamasy aşakdaky formula boýunça kesgitlenýär:

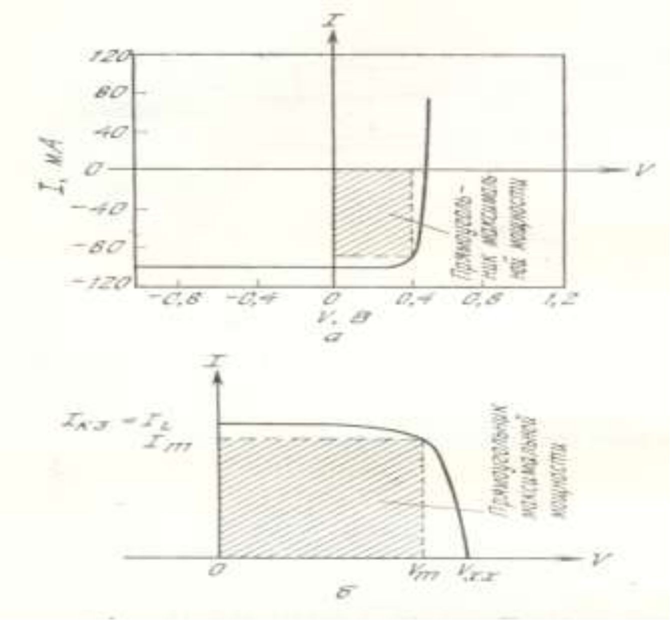
$$I = I_s(e^{qV/kT} - 1) - I_L \quad (30.2)$$

$$J_s = I_s/A = qN_C N_V \left(\frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\right)e^{-E_g/kT} \quad (13.3)$$

Bu formulada A enjamyň meýdany. (30.2) formula bilen kesgitlenýän wolt-amper häsiýetnamasynyň grafiki 13.5-nji suratda: I_L=100 mA, I_s=1 nA, A=4cm^2 we T=300K parametrler üçin görkezilendir. Wolt-amper häsiýetnamasynyň 4-nji kwadrantynyň

üsti bilen geçýänligi sebäpli, enjam tok çeşmesi hökmünde hyzmat edip biler.

Nagruzkanyň garşylygy saýlanylyp alnanda öndürilýän energiýa $I_{кз}$ V_{xx} köpeltmek hasylynyň 80%-e ýetip biler. ($I_{кз}$-gysga utgaşma togy, V_{xx}-elementleriň boş edilen naprýaženiýasy). WAH-y köplenç 13.5(b) suratdaky ýaly görkezýärler.



13.5-nji surat. *Gün düşüp guran gün elementiniň Wolt-Amper häsiýetnamasy.*

13.5(b) suratda I_m we V_m ululyklaryň-togun we naprýaženiýänyň, iň uly P_m çykyş kuwwatyny alyp bolýan bahalary;(P_m=$I_m V_m$).
(30.2) deňlemedeň (I=0 bolandaky) boş edilen naprýaženiýesiniň formulasyny alarys:

$$V_{xx} = \frac{kT}{q}\ln(\frac{I_L}{I_s}+1) \approx \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_L}{I_s}\right) \quad (13.4)$$

Diýmek, berlen I_L tokda, boş edilen napryýaženiýe I_s doýdurma togy kiçelen wagtynda logarifmiki artýar.Çykyş kuwwaty:

$$P = IV = I_s V\left(e^{qV/kT} - 1\right) - I_L V. \quad (13.5)$$

$\frac{dP}{dV} = 0$ diýip hasaplap, kuwwatyň maksimal şertini alarys:

$$I_m = I_s \beta V_m e^{\beta V_m} \cong I_L\left(1 - \frac{1}{\beta V_m}\right),$$

(13.6)

$$V_m = \frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{I_L/I_s + 1}{1 + \beta V_m}\right) \cong V_{xx} - \frac{1}{\beta}\ln(1 + \beta V_m),$$

(13.7)

Bu ýerde $\beta = q/kT$. Maksimal çykyş kuwwaty aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

$$P_m = I_m V_m \cong I_L\left[V_{xx} - \frac{1}{\beta}\ln(1 + \beta V_m) - \frac{1}{\beta}\right] = I_L\left(E_m/q\right),$$

(13.8)

Bu ýerde

$$E_m \equiv q\left[V_{xx} - \frac{1}{\beta}\ln(1 + \beta V_m) - \frac{1}{\beta}\right]. \quad (13.9)$$

E_m ululyk element daşky zynjyr bilen optimal ylalaşanda we nagruzkada bir foton siňdirilende bölünip çykýan maksimal energiýa deňdir.

Berlen ýarymgeçiriji üçin J_s doýdurma togun dykyzlygyny (13.3) formuladan kesgitleýäris. Kremniý üçin J_s toguň 300K minimal bahasy ~ 10^{-15} A/cm^2 deňdir. AM 1,5 bolanda $J_{кз}$ gysga utgaşma togunyň J_L deň bolan bahasynyň dykyzlygyny 2-nji suratda grafiki görnüşde alyp bolar.

$$J_{кз} = J_L(E_g) = q \int_{h\nu=E_g}^{\infty} \left({dn_{ph}}/{dh\nu} \right) d(h\nu).$$

(13.10)

Şeýle integrirlenmäniň bahasy 6-njy suratda (1-nji egri çyzyk) görkezilendir. Eger-de I_s we J_L belli bolsa, E_m ululygy (13.4) (13.7) we (13.9) transendent deňlemeleriniň san bahasyny goýup gözüp bolýar. E_m ululyk T_s baglydyr, ol ýene-de (τ , D we legirleme derejesi ýaly) materialyň parametrlerine baglydyr.Üýtgetmäniň ideal effektiwligi, haçanda J_s bahasy minimal bolanda, materialyň optimal bahalaryny saýlamak arkaly ýerine ýetirilýär. Dürli inli rugsat edilmedik zolagy bolan ýarymgeçirijiler üçin E_m ululygyň özüni alyp barşy 6-njy suratda görkezilendir. (2-nji egri çyzyk).P_{in} üýtgetmäniň ideal effektiwligi, maksimal çykyş kuwwatynyň daşky kuwwata (enjamyň üstüne düşýän şöhläniň kuwwatyna) bolan gatnaşygyna deňdir we grafiki görnüşde 6-njy suratdan kesgitlenip bilner:

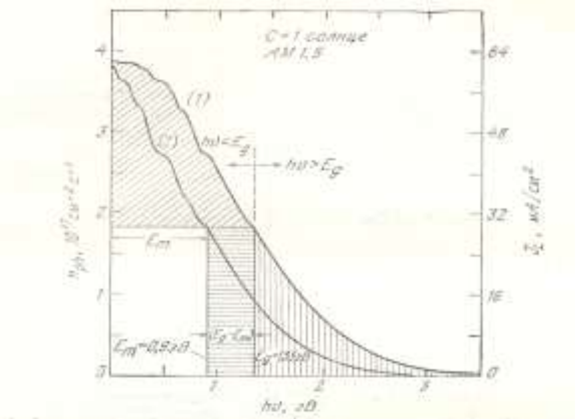
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_L\left({E_m}/{q} \right)}{P_{in}} = \left[V^2{}_m I_s \left({q}/{kT} \right) e^{{qV_m}/{kT}} \right] \Big/ P_{in},$$

(13.11)

ýa-da

$$\eta = \frac{E_m \ \ we \ \ n_{ph} \ \ taraplary \ \ bolan \ \ gonuburclyk}{1-nji \ \ egri \ \ cyzygyn \ \ asagyndaky \ \ meydan} \quad (13.11a)$$

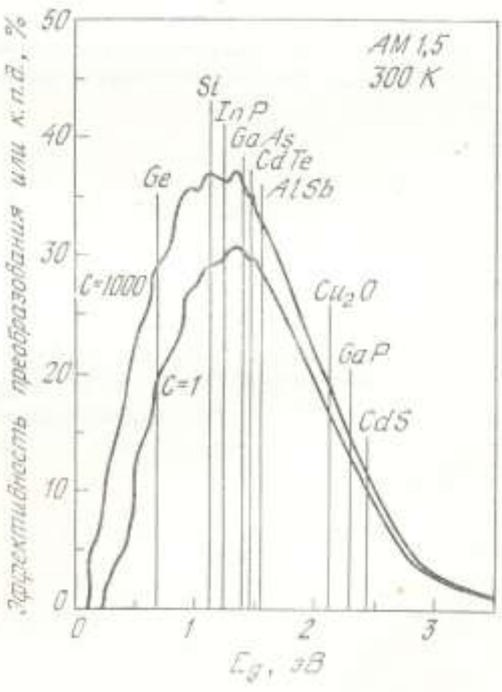
Bu ýerde 1 egri çyzygyň aşagyndaky egri çyzyk 5,2 10^{17} eV/(cm^2c). Iň uly effektiwlik 31% deň bolup, E_g=1,35 eV deň bolanda gazanylýar we $A^{III}B^V$ kysymly ýarymgeçirijilere mahsus bolan parametrler ulanylmalydyr.



13.6-njy surat.*Üýtgetmäniň effektiwligini grafiki kesgitlemek usuly we gün spektrindäki fotonlaryň akymynyň dykyzlygynyň fotonyň energiýasyna baglylygynyň grafigi.*

13.7-nji suratda 300°K gün elementiniň ideal effektiwliginiň rugsat berilmedik zolagyň inine baglylygy getirilendir. C=1 belgili egri çyzyk AM1,5 degişlidir. Ondaky uly bolmadyk üýtgemeler atmosferadaky şöhlelenmäni siňdirmäniň häsiýetnamasy bilen baglanyşyklydyr.Grafikden görnüşi ýaly,effektiwlik egri çyzygynyň örän giň maksimumy bardyr we onuň içinde P.T.K. E_g ululyga kän bagly däldir. Şol sebäpli hem, rugsat berilmedik zolagynyň ini 1-den 2 eV çenli bolan hemme ýarymgeçirijiler, gün elementlerini ýasamak üçin ýaramly material hasaplanýar.

13.7-nji suratda başga-da intensiwligi 1000 sany güne deň bolan (ýa-da 844 kWt/m^2) optiki konsentrirlenen şöhlelenmäniň effektiwliginiň ideal egri çyzygy görkezilendir.



13.7-nji surat. *Gün elementiniň ideal П.Т.К günüň şöhlesinde we gün şöhlesini 1000 esse (T=300K) konsetrasiýasy bolandaky,E_g baglylygynyň grafigi.*

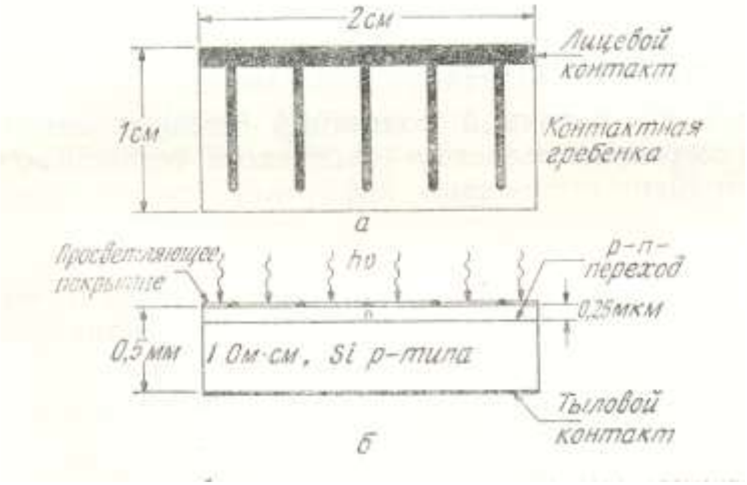
13.2. P-n geçişli gün elementleri

Bu ýerde biz ilki bilen kremnili p-n geçişli gün elementlerine seredip geçeris, sebäbi ol ähli gün batereýalary üçin etalon enjam hökmünde hyzmat edýärler. Köp wagtlaýyn uçuş döwründe ýeriň hemralarynda we kosmiki gämilerde tekiz gün batareýalary esasy tok çeşmeleri bolup hyzmat edýär. Munda esasy problema bolup üýtgetmäniň effektiwligi we elementleriň ygtybarlygy durýar, sebäbi daşky orbitalarda ýokary energiýaly bölejikleriň täsiri astynda elementiň häsiýetnamalary peselýär. Ýokarky problemadan başga-da birinji planda gün batareýalarynyň gymmatlygy durýar. Sebäbi ahyrsoňunda gün elementleri ýerdäki energiýanyň çeşmeleri bilen ýaryşyp biler ýaly. Bu maksatlar üçin

aşakdaky ýaly podložka ýasama usullary ulanylýar: lentaly filýoranyň üsti bilen ösdürmek,”plastina-plastina” we dendrit lentalaryny ösdürmek.

13.2.1. Spektral otklik

Nusgawy gün elementi shematiki görnüşde 9-njy suratda görkezilendir. Ol gün elementi üste ýakyn döredilen öwnük p-n geçişden, üstdäki omiki tekiz kontaktdan, arkadaky omiki tutuş kontaktdan we üst ýüzündäki ýagtyldýan örtükden durýar.



13.8-nji surat. *P-n-geçişli kremniý gün elementiniň shematik şekillendirilişi.*

Inžeksiýanyň derejesi pes bolanda yzyüzülmezligiň bir ölçegli stasionar deňlemesiniň görnüşi:

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp[-\alpha(\lambda)x]$$

(13.12)

P-tinli ýarymgeçirijidäki elektronlar üçin we

$$G_n - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} + \frac{1}{q}\frac{dJ_n}{dx} = 0$$

(13.13)

$$G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dx} = 0$$

(13.14)

n-tipli ýarymgeçirijidäki deşijekler üçün. Bu ýerde elektronlar we deşijekler üçün togun dykyzlygy degişlilikde aşakdaky formulalar boýunça kesgitlenýar:

$$J_n = q\mu_n n_p \xi + qD_n \frac{dn_p}{dx}$$

(13.15)

$$J_p = q\mu_p p_n \xi - qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (13.16)$$

Gün elementinde p-n geçişli we goşundylaryň hemişelik derejesi, geçişiň iki tarapynda elektrik meýdany bolmaýar. Eger-de p-tipli podložkaly geçişe seredilse we üst ýüzünde n-gatlagy bolan (13.12), (13.14)we (13.16) deňlemeleriň kömegi bilen geçişiň ýokarky bölegindäki esasy däl äkidijileriň paýlanmasyny suratlandyrýan deňleme alyp bolýar:

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} + \alpha F(1 - R)\exp(-\alpha x) = 0 \quad (13.17)$$

Bu denleme üçün umumy çözgüdin aşakdaky görnüşi bardyr:

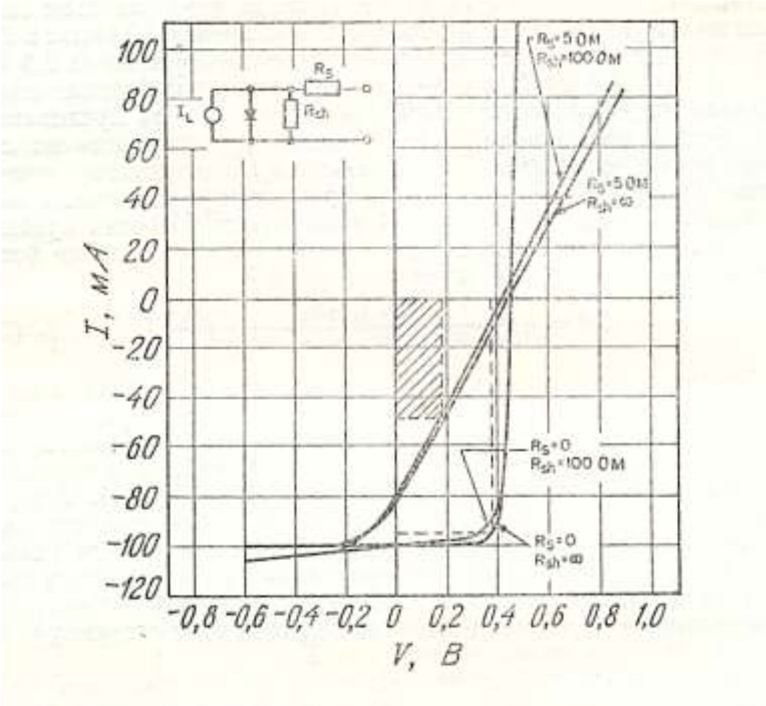
$$p_n - p_{n0} = A\,ch\left(\frac{x}{L_p}\right) + B\,sh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha F(1-R)\tau_p}{\alpha^2 L_p^{\ 2} - 1}\exp(-\alpha x)$$

(13.18)

Bu ýerde $L_n=(D_p\tau_p)^{1/2}$-diffuziýanyň uzynlygy.

13.2.2. Wolt-amper häsiýetnamalar

Hakyky (real) gün elementleri üçin, 4b suratda getirelen ideal ekwiwalent shemany azajyk üýtgetmeli bolýar. Şol sebäpli, oňa ýitme toklary bilen düşündirilýän şuntlaýan parallel garşylyk we üst ýüzdäki kontaktda napryýaženiýasynyň omly peselmesi bilen şertlendirilen yzygider garşylygy yzygider birikdirýäris (13.8-nji surat.)



13.9-nji surat. *Yzygider we parallel garşylyklaryň dürli bahalaryndaky gün elementiniň nazary wolt-amper häsiýetnamasy. Goşmaça-suratda ekwiwalent shema görkezilendir. Elementiň parameterleri 13.5-nji suratdaky ýalydyr.*

Eger-de diodyn togy (2) formula bilen kesgitlenýän bolsa, onda onuň wolt-amper häsiýetnamasyny aşakdaky deňleme kanagatlandyrýar:

$$In\left(\frac{I+I_L}{I_s}-\frac{V-IR_s}{I_sR_{sh}}+1\right)=\frac{q}{kT}\left(V-IR_s\right) \quad (13.19)$$

Bu deňlemäniň çözgüdi R_s we R_{sh} dürli kombinasiýalarynda 30.8-nji suratda getirilendir. I_s, I_L we T bahalary 13.5-nji suratdaky ýalydyr.

Suratdan görnüşi ýaly 100 Om bolan şunuň ýaly kiçijik şuntlaýan garşylyk hem, enjamyň çykyş kuwwatyna täsir edip bilmeýär, ýöne 5 Om bolan ujypsyz yzygider garşylyk bolsa çykyş kuwwatyny optimal bahasyndan 30% gowrak peseldýär.

Şonuň üçin geljekde R_{sh} täsirini hasaba almaýarys. Onda daşky zynjyrdaky tok we çykyş kuwwaty aşakdaky formulalar bilen kesgitlenýär.

$$I=I_s\left\{\exp\left[\frac{q\left(V-IR_s\right)}{kT}\right]-1\right\}-I_L \quad (13.20)$$

$$P=\left|IV\right|=I\left[\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I+I_L}{I_s}+1\right)+IR_s\right] \quad (13.21)$$

R_S degişlelikde 0,1,2,5 we 10 Om bolanda çykyş kuwwatyň otnositel iň uly bahasy 1; 0,77; 0,57; 0,27; we 0,14 deňdir. Gün elementiniň otnositel garşylygy geçişiň ýerleşýän ýeriniň çuňlugyna, п we p oblastlardaky garyndylaryň konsentrasiýasyna we üst ýüzdäki kontaktyň omiki garşylygynyň konstruksiýasyna baglydyr.

Kremniýli tipli gün elementiniň 13.9-njy suratdaky ýaly şekilli görnüşi üçin yzygider garşylyk, p-bazaly elementler üçin 0,7 Om-a deňdir, п-bazaly elementler üçin bolsa, 0,4 Om-a deňdir.

Garşylygyň ululygynyň tapawudy, п-tipli podložkanyň garşylygynyň otnositel pes bolmagy bilen düşündirilýär. 13.5 we 13.12-nji suratlaryň kömegi bilen FF doldurylma faktoryna kesgitläp bolar:

$$FF \equiv \frac{I_m V_m}{I_L V_{xx}} \qquad (13.22)$$

Elementiň üýtgetme effektiwligi (ПТК) deňdir:

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_L \cdot V_{xx}}{P_{in}} \qquad (13.23)$$

Maksimal ПТК almak üçin (13.23) deňlemäniň sag bölegindäki sanawjynyň üç sany köpeldijisini köpeltmeli bolýar.

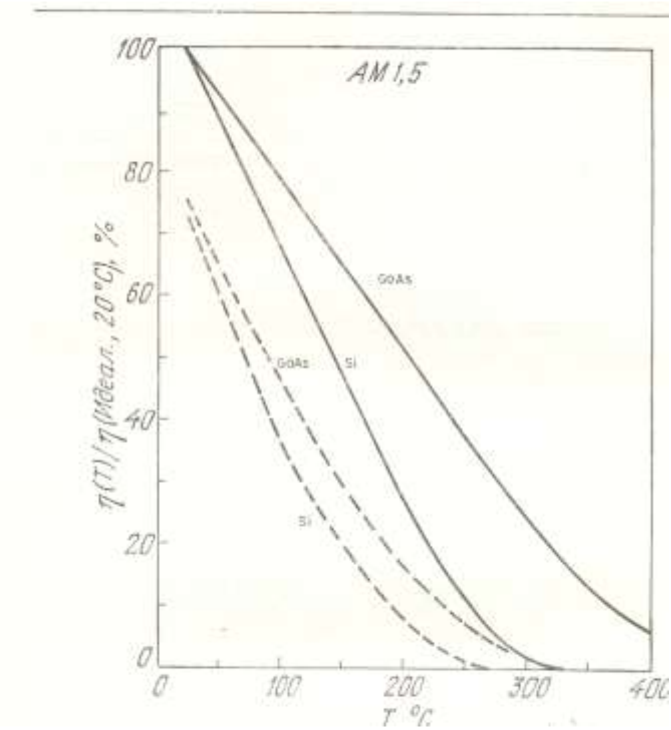
13.2.3. Radiasiýanyň we temperaturanyň täsiri

Temperatura ulalan wagtynda Si we GaAs-de diffuziýa uzynlygy artýär. Esasy däl äkidijileriň diffuziýa uzynlygynyň ulalmagy J_L artmagyna getirýär. Ýöne V_{xx} doýdurma togunyň temperatura eksponensial bagly bolanlygy üçin kiçelýär. Ondan başga-da ýokary temperaturada wolt-amper häsiýetnamasynyň ýuwaş üýtgemegi doldurylma faktorynyň kiçelmegine getirýär.

Şonuň üçin, umuman alanda temperaturanyň ýokarlanmagy üýtgetmäniň effektiwliginiň peselmegine getirýär.

Si we GaAs ulanylyp bejerilen gün batareýalary üçin ПТК formaly bahalary 30.9-njy suratda görkezilendir. Ideal toguň akma

şertlerinde effektiwlik temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ~200°C ýetende Si üçin,~300°C ýetende bolsa GaAs üçin çyzykly peselýär.



13.10-njy surat. *Si we GaAs esasyndaky p-n-geçişli gün elementleri üçin özgertmäniň normirlenen effektiwligi.*

Edebiýatlar

1. Türkmenistanyň Konstitusiýasy. Aşgabat, 2008.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
3. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. II tom. Aşgabat, 2009.
4. Gurbanguly Berdimuhamedow. Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, Halky söýmek bagtdyr. Aşgabat, 2007.
5. Gurbanguly Berdimuhamedow. Türkmenistan – sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. Aşgabat, 2007.
6. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň Ministrler Kabinetiniň göçme mejlisinde sözlän sözi. (2009-njy ýylyň 12-nji iýuny). Aşgabat, 2009.
7. Türkmenistanyň Prezidentiniň «Obalaryň, şäherleriň, etrapdaky şäherçeleriň we etrap merkezleriniň ilatynyň durmuş-ýaşaýyş şertlerini özgertmek boýunça 2020-nji ýyla çenli döwür üçin» Milli maksatnamasy. Aşgabat, 2007.
8. «Türkmenistany ykdysady, syýasy we medeni taýdan ösdürmegiň 2020-nji ýyla çenli döwür üçin Baş ugry» Milli maksatnamasy. «Türkmenistan» gazeti, 2003-nji ýylyň, 27-nji awgusty.
9. «Türkmenistanyň nebitgaz senagatyny ösdürmegiň 2030-njy ýyla çenli döwür üçin Maksatnamasy». Aşgabat, 2006.
10. Ökdirow A., Kuliýew T.A. Senagat elektronikasy – Aşgabat, Ylym, 2005.
11. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников: Изд. «Наука» - М., 1978.
12. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников: Изд. «Наука» - М., 1977.
13. Бриндли Кейт, Карр Джозеф Д. Карманный справочник инженера электронной техники, Издательство: Додека XXI век, 2009.
14. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1995 в 2 томах, Издательство: «Додека XXI век», 2008.
15. Валиев К. А. Физика субмикронной литографии. М.: Наука, 1990

16. Вендик О.Г., Горин Ю. Н., Попов В. Ф. Корпускулярно – фотонная технология. – М.: Высшая школа, 1984.
17. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов,
-М.: Радио и связь, 1990.
18. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник.- М.: Радио и связь, 1991.
19. Зеегер К. Физика полупроводников: Перевод с английского Р. Бразиса, А. Матулениса и А. Тетервова. Под ред. Ю. К. Пожелы. : Изд. «Мир» -М.: 1977.
20. Зи С. «Физика полупроводниковых приборов». В 2-х книгах, М: Мир, 1987.
21. Киреев П.С. Физика полупроводников: Учебное пособие для втузов. – М.: «Высш. школа», 1975.
22. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. /Под ред. Л. Ченга и К. Плога. М.: Мир, 1989.
23. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы (учебник для вузов, 7-е издание). СПб: Лань, 2003.
24. Пикус Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов – М.:, 1965.
25. Старосельский В. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учебное пособие. Изд-ство: «Высшее образование », 2009.
26. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры - М.: Радио и связь, 1989.
27. Физика полупроводников: Лабораторный практикум. Часть 1./ Под редаксией В.И. Ильина. – СПб. : СПбГТУ, 1994.
28. Физика полупроводников: Лабораторный практикум. Часть 2./ Под редаксией В.И. Ильина. – СПб. : СПбГТУ, 1996.
29. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников: Учебное пособие для вузов. – М.: «Высш. школа», 1984.
30. Шалимова К.В. Физика полупроводников: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Mazmuny

GIRIŞ.. 7

1-NJI BÖLÜM. ÝARYM GEÇIRIJILERIŇ FIZIKASY........ 4

1-nji bap. Kristallaryň gurluşy we olardaky defektler… 4

1.1. Kristallik gözenek. Brawe gözenegi. Ýönekeý we çylşyrymly gözenekler. Kristallarda düwünleriň, ugurlaryň we tekizlikleriň bellenilişi. Milleriň indeksi………………...**4**

1.2. Kristallarda defektler we olaryň görnüşleri: çyzykly, nokatlanç, üstleýin 8

1.3. Kristallarda nokatlanç defektleriň ýüze çykyşy we dolandyrylyşy 12

2-nji bap. Gaty jisimleriň zona nazaryýetiniň esaslary………………… 14

2.1. Zonalaryň elektronlar bilen doluşy. Jisimleriň metallara, dielektriklere we ýarym geçirijilere bölünişi…………………………………………… 14

3-nji bap. Ýarymgecirijilerde elektronlaryň we deşikleriň statistikasy... 32

3.1. Fermi-Diragyň statistikasy boýunça paýlanyş funksiýa………………… 32

3.2. Ýarymgeçirijilerde elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy……….. 34

3.3. Hususy ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesiniň ýerleşişi we erkin zarýadlaryň konsentrasiýasy…………………………………………….. 36

4-nji bap. Kinetiki hadysalar……………………………………….. 38

4.1. Elektrik meýdanynda erkin zarýadlaryň dreýfi. Erkin zarýadlaryň hereket edijiligi (podwižnost) ……………………………………….... 38

4.2. Udel elektrik geçirijiligi. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi………... 39

4.3. Galwanomagnit effektleri. Holluň effekti. Ettingsgauzeniň effekti.
Termomagnit effektleri.. 42
5-nji bap. Ýarymgeçirijilerde deňagramlykdaky däl zarýadlar................. 48
5.1. Deňagramlykdaky we deňagramlykdaky däl zarýadlar. Ferminiň

kwaziderejeleri…………………………………………………………….. 48
5.2. Erkin zarýadlaryň ýaşaýyş wagty……………………………………… 49
6-njy bap. Galtaşma (kontakt) hadysalary……………………………… 53
6.1. Iki metalyň galtaşmasy.. 53
6.2. Metal bilen ýarym geçirijiniň galtaşmagy... 55
6.3. Elektronly we deşijekli ýarymgeçirijiniň gatlaşmasy (p-n-geçiş)……….. 56

6.4. Daşky potensiallaryň tapawudynyň p – n – geçişe täsiri………………... 58
6.5. Termo-e.h.g. Zeýebekiň effekti. Peltýeniň effekti…………………….. 61
7-nji bap. Ýarymgeçirijilerde optiki hadysalar...................................... 64
7.1. Gaty jisimlerde (ýarymgeçirijilerde) ýagtylyk şöhlesiniň ýuwdulmagy we geçmesi.. 64
7.2. Ýarymgeçirijilerde şöhlelenme (lýuminessensiýa) hadysasy.................. 68
2-NJI BÖLÜM. BIPOLÝAR ABZALLAR…………………………... 72
8-nji bap.Ýarymgeçiriji diodlar 72

8.1. Ýarymgeçiriji diodlar. Olaryň alnyşy. Diffuziýa usuly, epitaksiýa usuly ……………………………………………………………………. 72
8.2. P-n-geçişiň deňagramlyk ýagdaýy……………………………………… 73
8.3. Deňagramlykda däl p-n-geçiş. P-n-geçişiň barýer sygymy. P-n-geçişdäki göni we ters toklar……………………………………….. 75
8.4. P-n-geçişiň böwsülmegi. Tunnel diodlary……………………………… 80
9-njy bap. Ýarymgeçiriji diodlaryň görnüşleri………………………….. 84
9.1. Ýarymgeçiriji geterogeçişli diodlar... 84
9.2. Dinistorlar we tiristorlar………………………………………………… 88
9.3. Syrgyn-uçuşly diodlar... 93
9.3.1. Statiki häsiýetnamalary... 93
9.3.2. Dinamiki häsiýetnamalar.. 96
9.3.3. Kuwwaty we peýdaly täsir koeffisiýenti.. 102
9.3.4. Syrgyn-uçuşly diodlardaky galmagallar... 103
9.3.5. Diodyň taýýarlanylşy... 107
10-njy bap. Tranzistorlar…………………………………………….. 109
10.1. Tranzistorlaryň işleýşiniň fiziki prinsipi……………………………... 109
10.2. Tranzistorlaryň umumy emitter boýunça birleşdirilişi. Dreýf 115

tranzistorlary……………………………………………… …..

3-NJI BÖLÜM. UNIPOLÝAR ABZALLARY……………………… 120

11-nji bap. Meýdan tranzistorlary……………………………….. 120

11.1. Meýdan (polewoý) tranzistorlary. Meýdan tranzistorlarynyň gurluşy we işleýiş prinsipi……………………………………………………. 120

11.2. Metal-okisel-ýarym geçiriji (MOÝ) tranzistorlary…………………… 123

11.3. Birhilli däl legirlemek we gizlin kanally abzallar…………………… 138

11.4. Gysga kanally effektler………………………………………………… 148

11.5. MOÝ tranzistorlaryň strukturasy. MOÝ strukturaly meýdan tranzistorlary……………………………………………… ………... 157

11.6. Ýuka plýonkaly tranzistor……………………………………………… 163

11.7. Huşuň energiýa bagly däl elementleri………………………………….. 170

4-NJI BÖLÜM. OPTOELEKTRON ABZALLAR........................... 176

12.1. Ýagtylygy duýgur abzallar.. 176

12.2. Daşky we içki fotoeffektleriň aýratynlyklary....................................... 177

12.3. Ýagtylygy duýgur abzallaryň esasy häsiýetnamalary we esasy parametrleri…………………………………………… ………… 179

12.4. Fotorezistorlar... 181

12.5. Fotogalwaniki elementler……………………………………………… 183
12.6. Fotodiodlar……………………………………………………………... 185
12.7. Fotodiodlaryň fotodiod we fotogalwanik düzgünlerinde işledilişleri…. 186
12.8. Fototranzistorlar……………………………………………………... 188
12.9. Fototiristorlar…………………………………………………………… 191
12.10. Optoelektron abzallary……………………………………………... 194
12.11. Optronlar……………………………………………………………… 197
12.12. Ýarym geçiriji lazerler... 200
13-nji bap. Gün batareýalary.. 206
13.1. Günüň şöhlelenmesi we üýtgetmäniň ideal effektiwligi...................... 206
13.1.1. Gün şöhlelenmesi.. 206
13.1.2.Üýtgetmäniň ideal effektiwligi.. 209
13.2. P-n geçişli gün elementleri... 213
13.2.1. Spektral otklik.. 214
13.2.2. Wolt-amper häsiýetnamalar... 215
13.2.3. Radiasiýanyň we temperaturanyň täsiri.. 213
Edebiýatlar.. 219

....