

NAZAROW NURÝAGDY

GATY JISIMIŇ ELEKTRONIKASY
(okuw gollanmasy)



Aşgabat – 2010

NAZAROW NURÝAGDY

GATY JISIMIŇ ELEKTRONIKASY
(okuw gollanmasy)

Aşgabat – 2010

BBK 22.37

N 41

UOK 539.2

N.Nazarow

GATY JISIMIŇ ELEKTRONIKASY

Okuw gollanmasynda gaty jisimiň elektronikasynyň, mikroelektronikanyň we optoelektronikanyň esasy bolan ýarymgeçiriji materiallarynyň fiziki häsiýetleri, metal-ýarymgeçiriji we ýarymgeçiriji- ýarymgeçiriji, m-s we p-n- geçişli strukturalaryň esasy häsiýetleri we olaryň esasynda taýýarlanylýan dürli abzallaryň işleýiş häsiýetleri seredilip geçilýär. Gollanma ýarymgeçirijileriň göwrüminde, p-n, m-s-geçişlerde we olaryň göwrüm zarýady gatlagynyň çäginde bolup geçýän elektron hadysalary öwrenýän bölümleri öz içine alýar.

Gollanma şu günň ösen talabyna doly gabat gelýär hem-de ýokary okuw mekdepleriniň fizika, radiofizika we elektronika, awtomatika, mikroelektronika, aragatnaşyk enjamlary we häzirki zaman aragatnaşyk tehnologiýasy, kompýuter-maglumat tehnika, energetika ugurlary boýunça bilim alýan talyplar, aspirantlar we hünärmenler üçin örän peýdaly bolar.

Türkmenistanyň Bilim ministrligi we Türkmenistanyň Ylymlar akademiýasy tarapyndan makullanyldy

BBK 22.37

UOK 539.2

MAZMUNY

Giriş	6
I BÖLÜM. KRISTALLARYŇ GURLUŞY. KRISTALLARDA DEFEKTLER	7
1. Kristallik gözenek. Brawe gözenegi. Ýönekeý we çylşyrymly gözenekler. Kristallarda düwünleriň, ugurlaryň we tekizlikleriň bellenilişi. Milleriň indeksi.	7
2. Kristallarda defektler we olaryň görnüşleri: çyzykly, nokatlanç, üstleýin	10
3. Kristallarda nokatlanç defektleriň ýüze çykyşy we dolandyrylyşy	13
3.1. Nokatlanç defektler we kristallaryň fiziki häsiýetleri	14
3.2. Defektleriň aňladylyşynyň kwazihimiki usuly	16
II BÖLÜM. GATY JISIMLERIŇ ZONA NAZARÝETINIŇ ESASLARY	19
1. Izolirlenen atomda elektronyň energetiki derejeleri. Elektronlaryň kristalda umumylaşdyrylyşy.....	19
2. Elektronyň kristaldaky tolkun funksiýasy. Brillýueniň zonalary.	21
3. Elektronlaryň kristaldaky öňe hereketi. Elektronlaryň daşky güýjüň täsiri esasyndaky hereketi.	24
4. Zonalaryň elektronlar bilen doluşy. Jisimleriň metallara, dielektriklere we ýarymgeçirijilere bölünişi.....	26
5. Hususy ýarymgeçirijiler. Deşikler hakynda düşünje. Gadagan zonadaky aýratyn derejeler.	27
III BÖLÜM. ÝARYMGEÇIRIJILERDE ELEKTRONLARYŇ WE DEŞIKLERIŇ STATISTIKASY	32
1. Fermi-Diragyň statistikasy boýunça paýlanyş funksiýa.....	32
2. Ýarymgeçirijide elektronlaryň we deşikleriň konsentrasıýasy.	33
3. Hususy ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesiniň ýerleşşi we erkin zarýadlaryň konsentrasıýasy.	35
IV BÖLÜM. KINETIKI HADYSALAR	37
1. Elektrik meýdanynda erkin zarýadlaryň dreýfi. Erkin zarýadlaryň hereket edijiligi (podwižnosti).....	37
2. Udel elektrik geçirijiligi. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi.	38
3. Galwanomagnit effektleri. Holluň effekti. Ettingsgauzeniň effekti. Termomagnit effektleri	40
V BÖLÜM. ÝARYMGEÇIRIJILERDE DEŇAGRAMLYKDAKY DÄI ZARÝDLAR	45
1. Deňagramlykdaky we deňagramlykdaky däl zarýadlar. Ferminiň kwaziderejeleri.....	45
2. Erkin zarýadlaryň ýaşayş wagty.....	46
3. Zonaara rekombinasiýa. Aýratyn derejeleriň üstünden rekombinasiýa.	47
VI BÖLÜM. SEPLEŞIK HADYSALARY. (KONTAKTNYÝE ÝAWLENIÝA)	49
1. Çykyş işi. Sepleşikdäki potensiallaryň tapawudy.....	49
2. Ýarymgeçiriji bilen metalyň arasyndaky sepleşik	50
3. Ýarymgeçiriji bilen metalyň arasyndaky göneldiş	51
4. Termo-e.h.g. Zeýebekiň effekti. Peltýeniň effekti.	52
VII BÖLÜM. ÝARYMGEÇIRIJI DIODLAR	56
1. P-n- geçişiň alnyşy. Diffuziýa usuly. Epitaksiýa usuly. P-n-geçişiň deňagramlyk ýagdaýy.....	56

2. Deňagramlykda däl p-n-geçiş. P-n-geçişiň baryer sygymy.	58
3. P-n-geçişden göni we ters toklar. P-n-geçişiň impuls we ýygylýk häsiýetleri	60
4. P-n-geçişiň böwsülmegi. Ýylylyk böwsülmesi. Lawina boýunça böwsülme. Tunnel böwsülmesi. Tunnel diodlary.....	63
5. Ýarymgeçiriji geterogeteçişler barada düşünje. Getrogeçişiň energetiki diagrammasy. Esasy häsiýetnamalary boýunça ýakyn geterojübütler.....	66
VIII BÖLÜM. TRANZISTORLAR	71
1. Bipolýar tranzistorlaryň işleýşi. Umumy baza boýunça birleşdirilişi.....	71
2. Tranzistorlaryň parametrleri we çykyş häsiýetnamalary.	72
3. Tranzistorlaryň umumy emitter boýunça birleşdirilişi.....	75
4. Tranzistorlarda geçiş hadysalary. Dreýf tranzistorlary.....	76
5. Meýdan tranzistorlary. Meýdan tranzistorlarynyň gurluşy we işleýiş prinsipi	79
IX BÖLÜM. DENISTORLAR WE TIRISTORLAR	82
1. S-görnüşli wolt-amper häsiýetnamaly priborlar. Uzyn bazaly diodlar.....	82
2. Dinistorlaryň we tiristorlaryň gurluşy we işleýşi.	82
X BÖLÜM. ÝARYMGEÇIRIJILERDE OPTIKI HADYSALAR	86
1. Gaty jisimlerde (ýarymgeçirijilerde) ýagtylyk şöhesiniň ýuwdulmagy we geçmesi. Hususy ýuwdulma.....	86
2. Ýarymgeçirijilerde lýuminessensiýa hadysasy. Ýarymgeçiriji strukturalarda rekombinasiýa şöhlelenmesi.....	88
XI BÖLÜM. INTEGRAL MIKROSCHEMALARY	92
1. Integral mikroshemalarynyň toparlary.....	92
2. Litografiýa usulynyň görnüşleri.....	93
3. Integral mikroshemalarynyň tehnologiýa aýratynlyklary. Integral mikroshemalarynyň gurluşy, işleýiş aýratynlyklary.....	94
EDEBIÝATLAR	96

Giriş.

Gaty jisimiň elektronikasy iň bir çalt depgin bilen ösýän ylmy ugurlaryň biri bolup, soňky 30-40 ýylyň içinde görülip-eşidilmedik derejede ösdi, özgerdi. 1960 ýyllarda gaty jisimler elektronikasynyň esasyňy kremniý, germaniý we beýleki ýönekeý ýarymgeçirijiler, olaryň esasynda taýýarlanylýan bipolar tranzistorlar, diodlar düzen bolsa, häzirk wagtda gaty jisimler elektronikasynyň esasynda ýönekeý ýarymgeçirijiler bilen bir hatarda dürli ýarymgeçiriji birleşmeleri, örän çylşyrymly uly integral mikroschemalary, dürli opoelektron guruluşlary we olaryň taýýarlanyşynyň ygtybarly tehnologiýasy duryýar.

Gaty jisimler elektronikasy – häzirk zaman elektronikasynyň düýpbiniýady bolup, ýarymgeçirijileriň göwrümünde bolup geçýän elektron hadysalary, olaryň fiziki häsiýetlerini, ýarymgeçiriji, ýarymgeçiriji-metal, ýarymgeçiriji-dielektrik(okis)-metal strukturalaryň gatlaklarynyň arasyndaky elektron-deşikli, m-s geçişleriň häsiýetnamalaryny, olaryň esasynda taýýarlanylýan abzallaryň işleýiş prinsipini, taýýarlanyş tehnologiýasyny öwrenýär.

Özleriniň udel elektrik geçirijiliginiň ululygy boýunça jisimleri üç topara bölmek mümkin: metallar, dielektrikler we ýarymgeçirijiler.

Metallar iň ýokary elektrik geçirijilige eýedir. Arassa metallaryň udel garşylygy 10^{-8} - 10^{-7} Om·m töweregidir. Garyndyly metallaryň udel garşylygy 10^{-7} - 10^{-6} Om·m çenli artýar. Metallarda elektrik geçirijiligi emele getirýan erkin elektronlaryň sany $n = 10^{22} \text{ sm}^{-3}$ barabar bolup, olaryň sany känbir temperatura bagly däldir. Temperaturanyň artmagy bilen metallaryň udel garşylygy temperatura proporsional artýar.

Adaty dielektrikler otag temperaturasynda, böwsülme elektrik meýdanyndan kiçi meýdanda, izolýatordyr. Olaryň udel garşylygy metallaryň udel garşylygyna seredende 15-25 dereje ýokary bolup, takmyndan 10^8 - 10^{17} Om·m. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ionlaryň hereket edijiliginiň (podwiznostynyň) artmagynyň netijesinde dielektrikleriň udel garşylygy azalýar.

Ýarymgeçirijiler udel elektrik geçirijiligi boýunça metallar we dielektrikleriň arasynda aralyk ýeri eýeläp, olaryň udel garşylygy 10^{-6} tä 10^8 Om·m çenli üýtgeýär.

Ýöne ýarymgeçirijileri häsiýetlendirýän esasy fiziki häsiýetleri diňe bir, olaryň udel elektrik geçirijiligi dälde, olaryň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylykda üýtgemek tebigatydyr: OK arassa ýarymgeçirijiler dielektriklere meňzeş izolýatorlardyr. Bu bolsa erkin elektronlaryň konsentrasiýasynyň nola deňdigini görkezýär. Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen ýarymgeçirijilerde erkin zarýdlar emele gelip (oýandyrylyp) olaryň konsentrasiýasy eksponenta boýunça artýar, metallarda bolsa erkin elektronlaryň konsentrasiýasy temperatura baglylykda kän üýtgemeyär.

Ýarymgeçirijilerde erkin zarýadlaryň konsentrasiýasynyň artmagy, olaryň udel garşylygynyň eksponenta boýunça kemelmegine, ýagny udel elektrik geçirijiliginiň artmagyna alyp gelýär. Belli boluşy ýaly, onuň tersine, ýokary udel elektrik geçirijiligi bolan metallarda, temperaturanyň artmagy bilen udel garşylyk artýar.

Ýarymgeçirijileriň udel elektrik geçirijiligini başga dürli daşky täsirleriň üsti bilen hem artdyrmak mümkin: energiýasy ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň giňliginden uly bolan ýagtylyk şöhesiniň täsiri, ýokary energiýaly elektron akymynyň we beýleki ýokary energiýaly bölejikleriň täsiri.

Kristallik, organiki, amorf materiallaryň gaty köpüsi ýarymgeçiriji we dielektrik häsiýete eýedir. Meselem Mendeleyewiň tablissasynyň IV^B topar elementleri we VI^B topar elementleri ýarymgeçirijilerdir. Mendeleyewiň tablissasynyň III-V topar elementleriniň aglabasynyň birleşmeleri ýarymgeçiriji häsiýete eýe bolup, bu ýarymgeçiriji birleşmeleri, ýönekeý ýarymgeçirijiler bilen bilelikde gaty jisimler elektronikasynnda giňden peýdalanylýar we häzirk zaman mikroelektronikasynyň we optoelektronikasynyň esasynda olardan taýýarlanylýan abzallar duryýar.

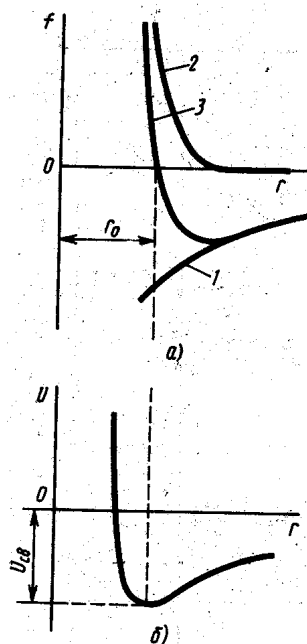
I BÖLÜM

KRISTALLARYŇ GURLUŞY. KRISTALLARDA DEFEKTLER.

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 güçleri ýüze çykýar (1.1.surat). Otnositel uzak aralykda atomlaryň we molekulalaryň arasynda özara dartýş 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 dartýş güýjüne seredende çalt artýar (2-nji egri).

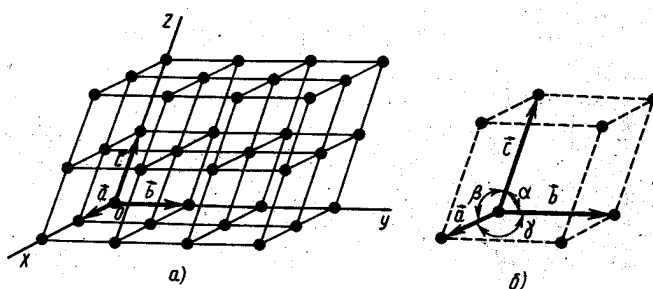


1.1.Surat. Bölejikleriň arasyndaky özara täsir güýjüň (a) we energiýanyň (b) olaryň arasyndaky aralyga baglylygy.

Belli bir $r = r_0$ aralykda özara dartýş 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 - kristal, emele getirýärler. Şeýle gurluşy häsiýetlendirmek üçin kristallik gözenek diýen düşünje girizilýär. Braweniň translyasiýa gözenegine we esasly gözenege seredeliň.

Brawe gözenegi.

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



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 - $a, 2a, 3a, \dots$ ma kesimler; OY-oky boýunça - $b, 2b, 3b, \dots$ nb

kesimler; we OZ-oky boýunça - c , $2c$, $3c$. .pc kesimler, bu ýerde m , n , p - bütin sanlar. Islendik böljegiň ýerleşen ýerni r wektoryň üsti bilen tapmaklyk mümkin

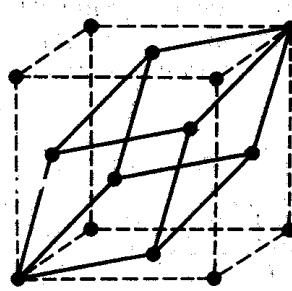
$$r = ma + nb + pc \quad (1.1)$$

a , b , c - translyasiya wektorlary, olaryň modullaryna - translyasiya peridy diýilýär.

Haýsy hem bolsa bir düwüni translyasiya 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 paralelepiped, kristallyň gözeneginiň elementar ülüşi diýilýär (1.2b surat). Kristallyň 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, geksoagonal, tetragonal we kubiki.

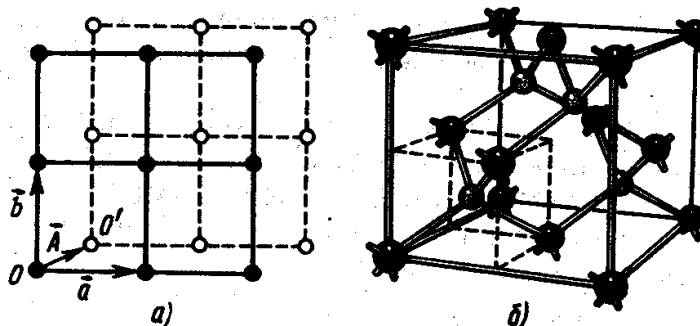
Ýönekeý we çylşyrymly gözenekler.

Gözenegiň ýönekeý ülsündäki düwünleriň sany boýunça, gözenegi ýönekeý we çylşyrymly görnüşlere bölýärler. Ýönekeý gözenekde bir ülsünde bir sany düwün ýerleşýär, emma çylşyrymly gözenegiň ülsünde 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. Muna mysal edip 1.3 suratda getirilen üst boýunça merkezleşdirilen gözenege seredip bolar.



1.3. Surat. Dört düwünli gapdal üst boýunça 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 ülsüni 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 ýerleşişini 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 önüne getirip gurup bolar. Bu gözeneklerin bir-birine görä süýşmesi, bazis diýilip atlandyrylýan goşmaça

\vec{A} wektoryň üsti bilen görkezilýär. Şeýle görnüşli gözeneklere bazisli gözenekler diýilýär. 1.4a suratda görkezilen gözenegi, 0 we 0' düwünlerden durýan bazisi parallel göçümeleklik bilen alyp bolýar. 1.4b suratda üç ölçegli gözenegiň mysaly hökmünde almazyň gözenegi görkezilen. Bu gözenegi bir-birine görä göwrüm diagonallary boýunça $\frac{1}{4}$ diagonalýň uzynlygyna süýşürilen iki sany üst boýunça merkezleşdirilen gözenegiň esasynda gurmak mümkin.

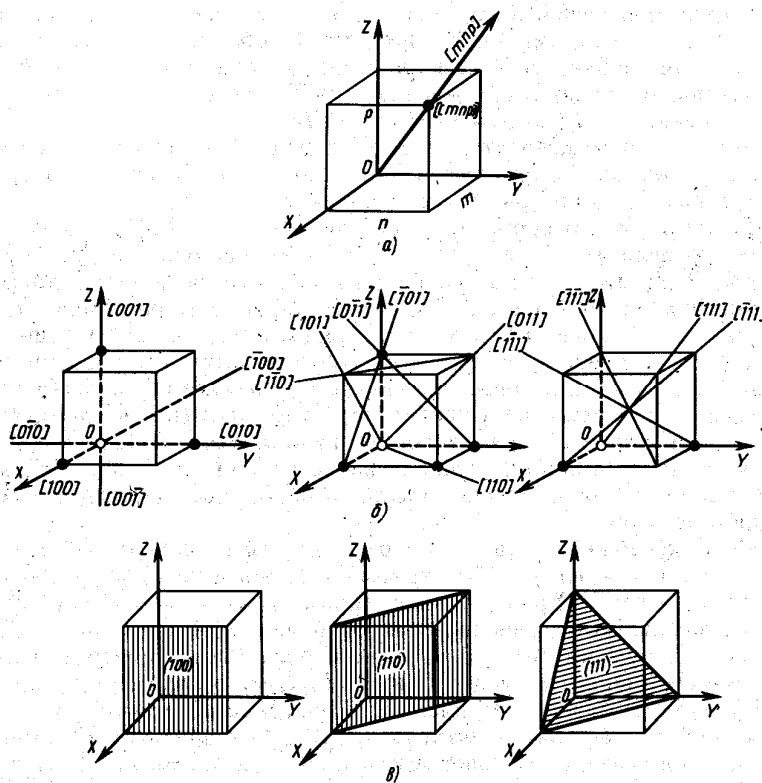
Kristallarda düwünleriň, ugurlaryň we tekizlikleriň belenilişi.

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

Ýönekeý ýagdaýda:

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

bu ýerde a, b, c - gözenegiň häsiýetnamalary. m, n, p – бүтін sanlar. Bu sanlara düwüniň indeksleri diýilip at berilýär we şeýle belenilýär [[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, koordinatlar başlangyjyndan geçýän göni çyzyk saýlanandyr.

Ugruň indeksleri [m n p] bilen belenilip, 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.

Milleriň indeksi.

Goý kristallografiki tekizlik koordinatlar okynda m, n, p kesimleri kessin. Şeýle tekizlik aşakdaky deňleme bilen ýazylýar.

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

Deňligiň hemme böleklerini umumy maýdalowja D getirip, alýarys

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

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

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

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

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

Bu ýerde $h = 2$; $k = 3$; $l = 6$.

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

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

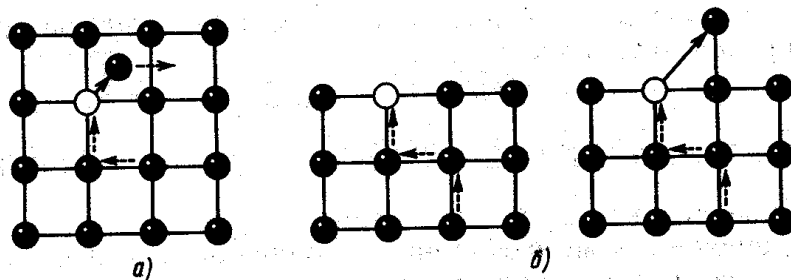
Kristallardaky defektler.

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

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

Eger-de kristallik gözenegiň haýsy hem bolsa bir uzeline (düzüninde) 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 Frenkel defektleri diýilip at berilýär (1.6 surat).

Käbir ýagdaýlarda atomlaryň ýerini ýitirmegi diňe bir kristalyň göwrümünde 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 bilýär.



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

Kristallardaky defektleriň dykzlygy, 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.

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

Üst (Şottki) defektleriniň deňagramlykdaky sany:

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

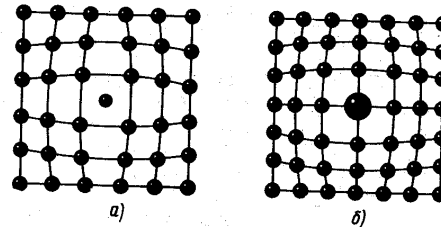
bu ýerde U_F , U_S - Frenkel we Şottki defektleriniň emele gelmeklik energiýalary.

Birmeňzeş düzümlü kristallarda Frenkel defektleriniň ýüze çykmaklyk mümkinçiligi gaty kiçi. Sebäbi atomlar diňe bir ýerinden çykmak, beýleki atomlary süýşürüp 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 bilýär.

Garyndylar kristallarda düwünleriň aralygynda (внедрение) we düwündäki atoma derek olaryň ýerinde (замещение) ýerleşip bilýär. 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.

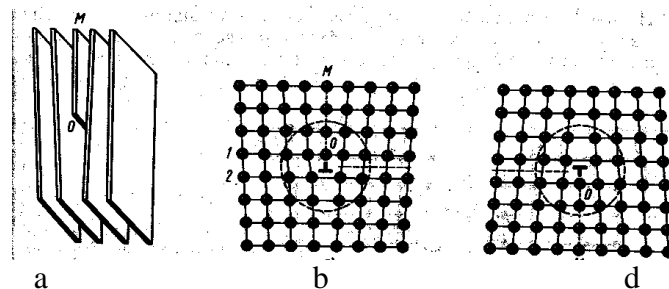
Dislokasiýalar kristallar ösdürilip taýýarlanylanda, plastiki deformasiýada, monokristal bölekleriniň çäklerinde ýüze çykýarlar. Häzirki wagtda birnäçe usuly ulanmaklyk esasynda dislokasiýalary öwrenmek mümkin. Elektronmikroskopiki usul bilen, ýörite düzülen tehnologiýa taýýarlama esasynda öwrenilýär.

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 eýýe bolup, olar himiki taýdan gaty işjeň bolýarlar. Şol sebäpli hem kristalyň defektli ýerleri çalt iýilip, defektler trawleniýeden soňra çukurjyklar görnüşinde ýüze çykýar. Dislokasiýalaryň mukdar häsiýetnamasy - ýagny dislokasiýalaryň dykzlygy diýilip kese-kesiğiň birlik meýdanyny kesip geçýän dislokasiýalaryň sanyna aýdylýar. Has ýokary derejede struktura taýdan kämil germaniý(Ge) kristalynda dislokasiýanyň dykzlygy takmyn 10^2 - 10^3 sm^{-2} töweregidir.

Çyzykly defektler.

Çyzykly defektlere gyra we aýlow (wintowoy) dislokasiýalar girýär.

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



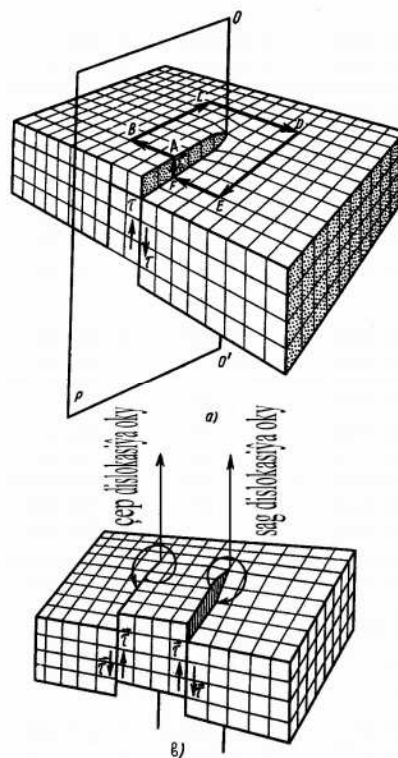
1.8. Surat. Gyra dislokasiýalarynyň shemasy:

a) Kristalyň içinde ýüze çykýan, M – tekizligiň gyrasy, gyra dislokasiýasyny emele getirýär; b) O – merkezde položitel dislokasiýaly atomlaryň ýerleşşi; d) Şol merkezde otrisetel 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 ýerleşşi görkezilendir. Artykmaç atom tekizligi bolan OM tekizlige ekstratekizlik diýilip, onuň üzülyän 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, dislokasiýa 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 ýerleşşi 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 Bürgersiň 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 girismek 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 köpenç mozaika görnüşli gurluşa eýedirler. Olar göni gurluşy bolan böleklerden düzülip, bir-birine takmyndan paralleldirler. Bu bölekleriň ululygy takmyndan $10^{-6} \div 10^{-4}$ sm bolup, olaryň arasynda emele gelýän burçlar birnäçe sekuntadan birnäçe minuda çenli üýtgeýär. Bu bölekleriň bir birine geçýän ýerinde dislokasiýalar emele gelip, olaryň aralygyndaky burçuň artmagy bilen defektleriň dykzlygy artýar.

Ýerleşme defektleri.

Kristallik gözenekde atomlaryň ýerleşiş tekizliginiň düzgün boýunça bolmalysyndan islendik gyşarmasyna ýerleşme (upakowka) defekti diýilýär. Atom gatlaklarynyň düzgünli ýerleşişiniň belenilişi 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 gatlagy derek c gatlagy ýerleşýär. Şeýle ýerleşme defekte aýrylma (wyçitaniýe) görnüşli defekt diýilýär. Ýerleşme defektleriň bulardan başgada birnäçe görnüşiniň ýüze çykmagy mümkin.

Dislokasiýalaryň, defektleriň dykzlygynyň hasaplanyşy.

Belli boluşy ýaly real kristallaryň göwrümünde we üstünde dürli defektler emele gelýär. Gaty jisimler elektronikasynada, optoelektronikada, fotoenergetikada, ýylylyk öwrüjilerinde we ş.m. dürli kristallary peýdalanmak üçin olaryň göwrümündäki, üstündäki defektleriň dykzlygyny anyklamaklyk, olaryň emele geliş sebäplerini öwrenmeklik zerur bolup durýar. Defektleriň dykzlygyny 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 dykzlygy uly ýalňyşlyga getirmeýär. Bu usul gaty jisim elektronikasynyň tehnologiýasynda epitaksial gatlaklaryň hilini öwrenmek üçin giňden peýdalanylýar.

3. Kristallarda nokatlanç defektleriň ýüze çykyşy we dolandyrylyşy

Gaty jisimleriň käbir fiziki häsiýetleri, ýagny dykzlyk, maýşgaklyk, 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 jisimler bilen deňeşdirilende defektleriň görnüşine we konsentrasiasyna baglylykda has ýokary derejede üýtgeýär.

Defektlerin toparlara bölünüşü 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 dislokasiýalarydyr;

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.

3.1. Nokatlanç defektler we kristallaryň fiziki häsiýetleri

Nokatlanç defekt diýilip, kristalyň periodiki gurluşynyň bozulmagyna (kämil bolmazlygyna) aýdylýar. Nokatlanç defektiň, ýagny kristalyň periodiki gurluşynyň bozulmagynyň täsir güýji dürli ugra gözenegiň hemişeligiň birnäçe ululygyna dowam edýär. Nokatlanç defektlere şu aşakdakylar degişli:

1) kristallik strukturalaryň **hususy defektleri**:

- kristallik gözenegiň düwünleriniň atomlar we ionlar bilen eýelenmedik boş ýerleri,
- kristalyň gözeneginiň düwünleriniň aralygyndaky boşluklarda ýerleşen hususy atomlary – düwünara atomlar,
- antifaza (antistruktura) defektleri, kristallik birleşmeleriň defektleri (mysal üçin, binar kristallarda atomlar gözenekde özüne degişli bolmadyk düwüni eýeleýärler, ýagny bir elementiň atomynyň ýerini beýleki bir elementiň atomy eýeleýär);

2) kristallik gurluşlarda garyndy defektleri:

- gözenegiň düwünleriniň ýa-da eýelenmedik boş düwünleriň garyndy atomlary tarapyndan (kristalyň hususy atomlaryndan başga atomlar bilen) eýelenmegi, çalyşma garyndysy,
- gözenegiň düwünleriniň aralygyndaky boşluklarda ýerleşen garyndy atomlary, girizme garyndylary.

Defektleriň haotiki paýlanmasynyň netijesinde, olaryň konsentrasiýasynyň artmagy özara täsiriň ýüze çykmagyna we birnäçe defektleriň birleşip, defekt kompleksiniň emele gelmegine getirýär. Şeýle birnäçe defektleriň üsmeginden duran komplekse, assosiant diýilip at berilýär. Olar öz elektron häsiýetleri boýunça, ýönekeý defektlerden tapawutlany, nokatlanç defektleriň hasabyna girýärler. Biwakansialar assosiatlaryň mysaly bolup durýar.

Gözenekde defektleriň ýerleşişiniň durnuklylygy iki sany faktor bilen kesgitlenilýär – energetiki (ulgamyň erkin energiýanyň minimumyna ymtylmagy) we geometriki (defektiň effektiv ölçegi bilen gözenekde onuň ýerleşen ýeriniň arasynda belli bir gatnaşygyň ýerine ýetmeginiň zerurlygy).

Energetiki faktor gözenegiň atomlarynyň we defektiň elektron konfigurasiýasynyň ýakynlygy bilen esaslanyp, özara dartyş we iteklekleşme güýçleriniň gatnaşygyna baglydyr. Şu esasyda MX görnüşli birleşmelerde orunçalyşma garyndylary, himiki tebigaty boýunça ýakyn atomlaryň gözenekdäki ornuny eýýelemeklige ymtylýar: metal atomlary M düwüni, metal däl elementleriň atomlary X düwünleri eýýeleýärler. Käbir ýagdaýda, dykyz ýerleşen gözeneklerde, girizme atomlar (hususy we garyndy) üçin geometriki faktor kesgitleýji bolup bilýär.

Defektiň **elektron gurluşy**, onuň kristalda özüni alyp barşynyň elektrik häsiýetini kesgitleýär. Eger defekt, gözenekde berkemek üçin zerur bolan walent elektronlaryna goşmaça (hususy ýa-da garyndy) bir ýa-da birnäçe artykmaç elektrona eýýe bolsa we bu elektronlar defekt bilen gowşak baglanşykly bolsalar, onda gözenegiň ýylylyk yrgyldysynyň netijesinde bu elektronlar öz merkezinden üzülip, hereketli geçiş elektrony görnüşinde kristalda umumylaşyp biler. Şeýle defektlere *donorlar* diýilip at berilýär, olaryň ýüze çykarýan geçirijiligi – *elektron geçirijiligi* ýa-da n -görnüşli geçirijilik diýilýär. Eger-de defekte (garyndy ýa-da hususy) dözenekde berkeme üçin hususy elektronlary ýetmeýän bolsa, onda ol ýetmeýän elektrony kristalyň esasy atomlarynyň walent baglanşygyndan alyp, *deşik* diýilip atlandyrylýan bu arabaglanşygyň bir ýa-da birnäçe položitel zaryadly boşlugyny döredýär. Şeýle defektler *akseptor* diýilip atlandyrylýar we olaryň emele

getirýän geçirijiligine – deşikli geçirijilik ýa-da p-görnüşli geçirijilik diýilip at berilýär. Şol bir kristalyň gözeneginde ýerleşiş ýagdaýyna baglylykda, donoryň hem-de akseptoryň funksiýasyny ýerine ýetirip bilýän garyndylara amfoter garyndylar diýilip at berilýär.

Donor atomyndan D elektrony goparyp aýyrmaklyga (hereketli geçiş elektronynyň e^- we hereketsiz položitel ionyň D^+ emele gelmegi) ýa-da elektronyň akseptor A atomynda berleşmegine (hereketli deşigiň e^+ we otrisatel ionyň A^- emele gelmegi) üçin zerur bolan energiýa, donor ýa-da akseptor merkeziniň ionlaşmak energiýasy diýilýär. Bu ululyklar deňşlilikde ∇E_D ýa-da ∇E_A görnüşde bellenilýär.

Köp ýagdaýlarda defektleriň elektron häsiýetini öňünden aýtmaklyga mümkinçilik berýän şu aşakdaky umumy düşüňjeleri kesgitlemek mümkin.

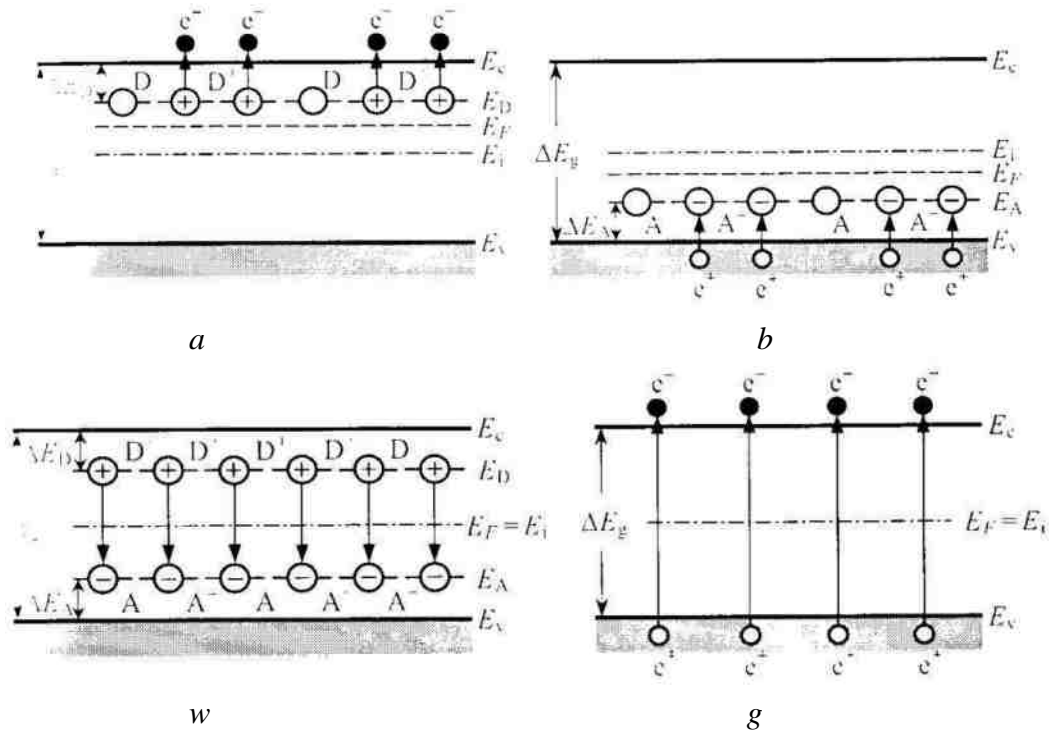
1. Çalyşma atomy (tersgurluş (antistruktura) görnüşli garyndy we hususy defektler) haçan-da olaryň walentligi çalyşýan atomynyň walent elektronlaryndan köp bolsa, onda donor ýaly özara täsirleşýärler, ters ýagdaýda – akseptor ýaly özüni alyp barýarlar. Meselem, dördünji toparyň elementleri bolan Si we Ge ýarymgeçiriji kristallarynda garyndy görnüşinde girizilen başynji toparyň elementleriniň (P,As,Sb) atomlary donordylar, emma üçünji toparyň elementleriniň atomlary (B,Al,Ga) akseptorlardyr.

2. Düwünleriň aralygynda ýerleşýän girizme atomlary (garyndy we hususy), haçanda olaryň daşky elektron gatlagy, elektronlar bilen ýarysyndan az doldurylan bolsa (adatça metallara mahsus), donor ýaly özüni alyp barýar, emma adatça metal dällere mahsus bolan ters ýagdaýda – akseptor häsiýetini ýüze çykarýar. Adatça düwünleriň aralygynda ýerleşýän girizme donordlar köp sanlydyr (Si,Ge,GaSb,ZnO materiallarynda Li; PbS-de Cu we ş.m.), emma düwünleriň aralygynda ýerleşen akseptorlar tebigatda gaty seýrek gabat gelýär.

3. Eger-de wakansiýanyň (boş ýeriň) ýakynyndaky jübütlenmedik elektronlaryň sany, şeýle (birmeňzeş) struktura taýdan kämil kristalyň walent elektronlarynyň umumy sanynyň ýaryndan az bolsa, onda wakansiýa özüni donor görnüşinde alyp barýar, tersine bolan ýagdaýda özüni akseptor görnüşinde alyp barýar. Meselem, GaAs ýarymgeçiriji kristalynda Ga we As –yň arasynda arabaglanşyk sekiz sany walent elektronynyň kömegi bilen amala aşyrylýar. Netijede, myşýagyň jübütlenmedik baş sany elektrony bilen gurşalyp alnan galliýniň wakansiýasy, otrisatel zarýadlanyp, akseptoryň funksiýasyny ýerine ýetirýär. Tersine, haçanda myşýagyň wakansiýasy, galliý atomlarynyň jübütlenmedik üç sany elektrony bilen gurşalyp alynsa, onda ol donordyr. Öň bellenilip geçilişi ýaly, köplenç ýagdaýda kristalyň real fiziki häsiýetleriniň defektlere baglylygy gaty uly bolup, ahyrky netijede bu häsiýetnamalar gaty jisimiň ilki gurluşy bilen kesgitlenmän, defektleriň görnüşini we konsentrasiýasy bilen kesgitleňýär. Şeýle fiziki häsiýetlere kristalyň elektrik geçirijiligi, lüminessent häsiýeti, termoelektron emissiýasy deňşlidir.

Ýarymgeçirijileriň elektrik häsiýetleri (elektrik geçirijilik) esasan ionlaşmak energiýasy (donordlar üçin ∇E_D we akseptorlar üçin ∇E_A) deňşlilikde 300 K-de kT -den, “ýylylyk kwantyndan” köp kiçi bolan ýüzleý ýerleşen garyndylaryň özüni alyp barşy bilen kesgitleňýär. Bu temperaturada, ýagny 300K ýüzleý garyndylaryň ählisi diýen ýaly ionlaşýar. Kristallarda elektronlaryň derejelerini düşündirmek üçin 1.10. suratda getirilen enegetiki diagrammalar peýdalanylýar.

Belli boluşy ýaly, defektler (garyndy we hususy) Blohyň funksiýasy bilen düşündirilýän hereketli elektronlara deňişli aýratynlaşmadyk derejelerden tapawutlylykda, aýratynlaşan energetiki derejeleri - ýagny donor we akseptor derejelerini döredýärler. Ýarymgeçirijileriň zona diagrammasynda elektronlaryň aýratynlaşmadyk energetiki derejelerine geçiş zonasy we deşiklere walent zonasy deňişli bolup, bu zonalar aýratynlaşmadyk energetiki derejeler üçin gadagan bolan, ∇E_g giňlikli energiýa aralygy bilen bölünendir. Gadagan zonanyň içinde diňe aýratynlaşan ýagdaýa deňişli energetiki derejeler ýerleşýärler. Defektiň geçiş zonasy ýa-da walent zonasy bilen çalyşyp biljek elektronlarynyň sanyna baglylykda, şol bir defekte birnäçe aýratyn energetiki derejeler deňişli bolup biler. Bu kop zarýadly diýilip atlandyrylýan merkezler: meselem, Au garyndysy Ge-de her haýsysyna gadagan zonada bir donor dereje (+1e zarýadly) ýa-da akseptor dereje (-1e, -2e, -3e zarýadly) deňişli bolan +1e, -1e, -2e, -3e zarýad merkezleriniň haýsy hem bolsa birinde bolup biler.



1.10 Surat. n-görnüşli (a), p-görnüşli (b) ýarmgeçirijileriň, kompensirlenen ýarmgeçirijileriň (w) we hususy ýarmgeçirijileriň (g) energetiki zona diagrammasy.

Ýüzleý ýerleşen donor garyndysy gadagan zonada geçiş zonasynyň E_c düýbüniň ýakynynda E_D energiýaly aýratyn derejäni döredýär (1.10a surat). Meňzeş ýüzleý ýerleşen akseptor garyndysy gadagan zonada walant zonasynyň E_v depesiniň ýakynynda E_A aýratyn energetiki derejäni döredýär (1.10b surat). Garyndy merkezleriniň ýylylyk oýandyrylmasy, elektronlaryň geçiş ugruna gabat gelip ýokary urukdyrylan strelkalar bilen şekillendirilýär (1.10 a,b surat):

a) n-görnüşli ýarmgeçirijiler üçin –donor ionyny D^+ we geçiş elektronyny e^- emele getirmeklik bilen, donor derejesinden E_D geçiş zonasyna E_c urukdyrylan (1.10a surat),

b) p-görnüşli ýarmgeçirijiler üçin – akseptor ionyny A^- we hereketli deşigi e^+ emele getirmeklik bilen walent zonasyndaky E_v akseptor derejesine E_A urukdyrylan (1.10b surat).

w) kompensirlenen ýarmgeçirijilerde donor we akseptor merkezleri takmyndan birmeňzeş konsentrasiýada bolup, bu ýagdaýda elektronlar minimal energiýa ymtymaklyk bilen öz-özünden donor atomlaryndan akseptor atomlaryna geçýärler we olary iona öwürýärler. Doly kompensasiýa ýagdaýynda donorlaryň we akseptorlaryň ionlaşmagynyň netijesinde ýüze çykan hereketli zarýadlar ýokdur. Kompensirlenen ýarmgeçirijilerde elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasynyň temperatura baglylykda üýtgeýşi, häsiýeti boýunça hususy ýarmgeçirijilere ýakyndyr (1.10g surat).

3.2. Defektleriň aňladylysynyň kwazihimiki usuly

Real şertlerde ýarmgeçirijilerde nokatlanç defektleriň (garyndy we hususy) sany oňnositel uly däl, ýagny olaryň konsentrasiýasy birlik göwrümdäki atomlaryň sanyndan köp azdyr. Meselem, kremniý üçin $N_{Si} = 5 \cdot 10^{22} \text{ sm}^{-3}$, şol bir wagtyň özünde örän ýokary derejede arassalanan ýarmgeçiriji materiallarynda tebigy garyndynyň galyndysy $10^{12} \div 10^{13} \text{ sm}^{-3}$, ýokary derejede garyndy girizilen ýarmgeçirijilerde bolsa garyndynyň konsentrasiýasy $10^{19} \div 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ barabardyr. Şu esasa görä hem real ýarmgeçiriji kristallaryny, örän az goşundyly ideal ergin, ýagny ýarmgeçiriji gaty ergini hökmünde seretmeklik mümkin. Şeýlelikde, ýarmgeçirijilerde defektleriň özüni alyp barşyny seljermekde, erginler teoriýasynyň termodinamiki gatnaşyklaryny peýdalanmak

mümkün. Himiki termodinamikanyň düzgünlerine esaslanan, kristallarda defektleriň emele gelmeginiň düşündiriliş usulyna *kwazihimiki usul* diýlip at berilýär.

Kwazihimiki usulyň ýarymgeçirijiler üçin peýdalanylmagy, kristalyň struktura ülüşlerini we olaryň konsentrasiýalaryny bellemeklik üçin ýörite adalgalaryň ulanylmagyny talap edýär (degişli elementleri kwadrat skopkada ýazmaklyk bilen):

M – ýönekeý ýarymgeçiriji (meselem, Ge we Si);
 $MX - A^{111}B^{V1}$ we $A^{111}B^V$ görnüşli binar ýarymgeçiriji (mysal üçin, CdS , $GaAs$ we ş.m.);
 M_1 we $X_1 - M$ we X düwünara atomlar (meselem, Ga_1 we As_1);
 $[M_1]$ we $[X_1]$ - düwünara M we X atomlaryň konsentrasiýasy (mysal üçin, $[Ga_1]$ we $[As_1]$);
 M_1^+ we X_1^- - M we X ionlaşan düwünara atomlar (mysal üçin, Ga_1^+ we As_1^-);
 $[M_1^+]$ we $[X_1^-]$ - ionlaşan düwünara M we X atomlaryň konsentrasiýasy (meselem, $[Ga_1^+]$ we $[As_1^-]$);
 V_M we V_X - M we X ornaşdyrylan gözeneklerde boş ýerler (meselem, V_{Ga} we V_{As});
 $[V_M]$ we $[V_X]$ - M we X ornaşdyrylan gözeneklerde boş ýerleriň konsentrasiýasy (meselem, $[V_{Ga}]$ we $[V_{As}]$);
 V_M^- we V_X^+ - M we X ornaşdyrylan gözeneklerde zarýdlanan boş ýerler (meselem, V_{Ga}^- we V_{As}^+);
 $[V_M^-]$ we $[V_X^+]$ - M we X ornaşdyrylan gözeneklerde zarýdlanan boş ýerleriň konsentrasiýasy (meselem, $[V_{Ga}^-]$ we $[V_{As}^+]$);
 D we A - donor we akseptor atomlary (meselem, P we B Si -de);
 $[D]$ we $[A]$ - donor we akseptor atomlarynyň konsentrasiýasy (meselem, $[P]$ we $[B]$ Si -de);
 D^+ we A^- - donor we akseptor ionlary (meselem, P^+ we B^- Si -de);
 $[D^+]$ we $[A^-]$ - donor we akseptor ionlarynyň konsentrasiýasy (meselem, $[P^+]$ we $[B^-]$ Si -de);
 $[e^-] \equiv n$ - elektronlaryň konsentrasiýasy,
 $[e^+] \equiv p$ - deşikleriň konsentrasiýasy.

Neýtral we zarýadlanan ýagdaýda düwünara atomlar we boş ýerler, elektronlar we deşikler bilen bilelikde garyndy atomlary we ionlary (donor, akseptir, amfoter) kwazihimiki reaksiýanyň düzüm bölekleri hökmünde seredilýär. Bu reaksiýalar, deňagramlyk ýagdaýynda, edil adaty himiki reaksiýalar ýaly, massanyň saklanmak kanunyna boýun egýär we temperatura bagly bolan deňagramlyk hemişeligi (konstantasy) bilen häsiýetlendirilip biliner.

Hereketsiz D^+ we A^- ionlary we hereketdäki elektronlary e^- we deşikleri e^+ emele getirmek bilen bolup geçýän donor we akseptor atomlarynyň ionlaşma hadysasy şu aşakdaky kwazihimiki deňlemeler görnüşinde ýazylyar:

$$D \cong D^+ + e^- \quad \text{we} \quad A \cong A^- + e^+, \quad (1.8)$$

Massanyň saklanmak kanunynyň (1.8) deňlikler üçin peýdalanylmagy şu aşakdaky netijäni berýär:

$$K_D(T) = \frac{[D^+]n}{[D]} \quad \text{we} \quad K_A(T) = \frac{[A^-]p}{[A]}, \quad (1.9)$$

Bu ýerde $K_D(T)$ we $K_A(T)$ - donoryň we akseptoryň ionlaşma hadysasynyň deňliginiň hemişeligi.

MX görnüşli ýarymgeçiriji birleşmelerinde hususy defektler zaryadlanan ýagdaýynda bolup bilýärler hem-de öň 3.1 paragrafda billenilişi ýaly donoryň we akseptoryň funksiýasyny ýerine ýetirip bilýärler. Sebäbi, MX kristallik gözenekdäki M we X atomlaryň arasyndaky himiki aragatnaşyk, Ge we Si gomeopolýar ýarymgeçiriji kristallarynda boluşy ýaly, arassa kowalent däl.

Bu aragatnaşyk belli bir ionlylyk derejesine eýedir, ýagny M we X üleşler käbir effektiv zaryad bilen zaryadlanandyr. MX görnüşli ýarymgeçirijilerde, adatça M öz häsiýetleri boýunça metallara ýakyn bolan himiki elementleriň periodiki tablisasiniň II we III toparyna degişlidir. Şol sebäpli hem gözenekde M atom položitel effektiv zaryadlanandyr. X element VI we V toparlara degişlidir we gözenekde otrisetel effektiv zaryada eýedir. Haçan-da, V_M ýa-da V_X boş ýer emele gelende, degişlilikde M ýa-da X elementler gözenegiň düwnünden neýtral atom görnüşinde daşlaşýarlar. Öň daşlaşan atoma degişli bolan, boş ýerde galan effektiv zaryad, onuň neýtrallygyny üpjün edip, boş ýer görnüşinde saklanýar. Gözenegiň ýylylyk yrgyldysynyň netijesinde bu zaryad deşik görnüşinde e^+ ýa-da e^- elektron görnüşinde boşap, degişlilikde V_M^- ýa-da V_X^+ zaryadlanan boş ýeri emele getirýärler. Başga söz bilen aýdanda, anionlaryň X^- kompensirlenmedik otrisetel zaryadlarynyň hasabyna, boş ýeri gurşap alýan, kation boş ýeriň effektiv zaryady V_M^- emele gelýär. Boş ýeriň ionlaşmak hadysasyny kwazihimiki deňlemeleriň üsti bilen şeýle ýazmak mümkin:

$$V_M \equiv V_M^- + e^+ \quad \text{we} \quad V_X \equiv V_X^+ + e^- . \quad (1.10)$$

(1.10) kwazihimiki reaksiýalar üçin massanyň saklanmak kanuny şu görnüşe eýedir:

$$K_{V_M}(T) = \frac{[V_M^-]p}{[V_M]} \quad \text{we} \quad K_{V_X}(T) = \frac{[V_X^+]n}{[V_X]} . \quad (1.11)$$

Kristallaryň düwünara ýerleşen hususy atomlary, kwazihimiki deňlemelere laýyklykda ionlaşyp bilýärler:

$$M_I \equiv M_I^+ + e^- \quad \text{we} \quad X_I \equiv X_I^- + e^+ . \quad (1.12)$$

(1.12) deňligiň ikinji reaksiýasynyň ähtimallygy kiçidir, sebäbi elektronyň birleşmegi, X elementiň effektiv ölçeginiň ulalmagyna getirýär, bu bolsa onuň düwünara ýerleşmegini gynlaşdyrýar. Kwazihimiki reaksiýa (1.12) üçin massanyň saklanmak kanuny (1.11) formulalara we (1.10) reaksiýalara meňzeş ýazylyar.

II BÖLÜM. GATY JISIMLERİN ZONA NAZARIYETİNİN ESASLARY.

1. Izolirlenen atomda elektronyň energetiki derejeleri. Elektronlaryň kristalda umumylaşdyrylyşy.

XX-asyryň başynda fizikler, atomlar we molekulalar derejesinde bolup geçýän hadysalary, diňe bir bölejigiň hereketi hökmünde, ýa-da tolkun hadysalary görnüşde, düşündirip bolmaýandygyna göz ýetirdiler. Mikrobölejikler - elektronlar, protonlar, atomlar-tolkun we korpuskulýar (bölejik) häsiýetlerine eýedirler we öz hereketlerinde iki häsiýeti hem ýüze çykarýarlar. Olary bölejik hökmünde duýup bolsada olaryň hereketleri Şredingeriň tolkun deňlemesi bilen düşündirilýär. Massasy m bolan mikrobölejik, elektromagnit meýdanynda hereket edip, $u(x,y,z,t)$ potensial energiýa eýe bolsa onuň hereketi üçin Şredingeriň deňlemesini şeýle görnüşde ýazyp bolýar.

$$-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) - u(x, y, z, t) \Psi$$

$$\Psi \cdot \Psi^* = |\Psi|^2 = (\psi_1 + i\psi_2) \cdot (\psi_1 - i\psi_2) = \psi_1^2 + \psi_2^2 \quad (2.1)$$

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi_1(x, y, z, t) + i\psi_2(x, y, z, t)$$

$$\Psi^* = \psi_1 - i\psi_2$$

$\Psi(x,y,z,t)$ funksiýa, şu deňlemäniň çözügi bolup, tolkun funksiýasy diýilýär. Onuň şeýle fiziki manysy bar. Ψ funksiýanyň şu funksiýa kompleksno soprýažonnyý Ψ^* funksiýa köpeltmek hasylyny dv göwrüme köpeltseň berlen elementar bölejigiň t wagtda dv göwrümde bolmagynyň ähtimallygyny berýär. Şredingeriň deňlemesine girýän U potensial energiýa umumy görnüşde koordinatalaryň we wagtyň funksiýasydyr. Emma köp amaly meseleler üçin U wagta bagly däl. Mikrobölejigiň şeýle ýagdaýyna, ýagny U potensial energiýanyň wagta bagly däl ýagdaýyna, durnukly ýagdaýy diýlip at berilýär.

Mikrobölejigiň durnukly ýagdaýyny tapmaklyk- gaty wajyp mesele, sebäbi durnukly däl ýagdaý hem durnukly tolkun deňlemeleriň superpozisiýasy görnüşde seredilip bilner. Emma Şredingeriň deňlemesiniň takyk çözügi diňe bir gaty ýönekeý ýagdaýlar üçin alnan, meselem wodorod atomy üçin. Protonlaryň Kulon meýdanyndaky elektron üçin Şredingeriň deňlemesiniň çözügi tükeniksiz köp durnukly ýagdaýy berýär. Olaryň energiýasy, erkin elektrona görä hasaplananda, ýagny elektron ýadro bilen baglanyşyksyz bolanda, şeýle formula bilen kesgitlenilýär.

$$E_{bd} = -\frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (2.2)$$

bu ýerde ε_0 wakuumda dielektrik syzyjylyk, \hbar - Plankyň hemişeligi. e we m - elektronyň zaryady we massasy; $n=1,2,3,\dots$, baş kwant sany. Wodorod atomynyň ýeke-täk elektrony iň aşaky esasy derejäni eýeleýär ($n=1$). Bu elektrony diňe daşdan belli bir energiýa bermeklik bilen ýokary boş derejelere geçirip bolar.

Köp elektronly atomlarda elektronlar diňe bir ýadro bilen täsir edişmän, olar bir-biri bilen hem täsir edişýärler. Şol sebäpli hem Şredingeriň deňlemesi örän çylşyrymlaşyp onuň takyk çözügini almaklyk mümkin däl.

Gaty jisimlerde atomlaryň aralygy örän golaý, şol sebäpli hem islendik atomyň walent elektrony goňşy atomlaryň güýçli täsirinde ýerleşýärler. Ikinji şertde gaty jisimiň atomlary gözenekde hereketsiz berkidilen diýip hasap etseň, Şredingeriň deňlemesini walent elektronlar ulgamynyň durnukly ýagdaýy üçin şeýle görnüşe eýe bolar.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z_i^2} \right) + U(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots) \Psi = E \Psi \quad (2.3.)$$

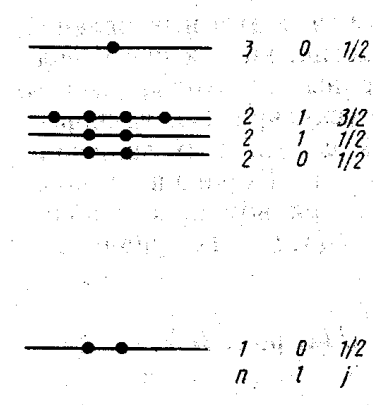
Bu ýerde x_i, y_i, z_i -i elektronynyň koordinatalary, E hemme elektron ulgamynyň energiýasy. Elektronlar ulgamynyň tolkun funksiýasy hemme elektronlaryň koordinatalaryna baglydyr.

$$\Psi = \Psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots)$$

(2.1.) deňlemede potensial energiýanyň U aňlatmasyna diňe bir elektronlaryň daş töweregindäki ionlar bilen täsiri girmän, eýsem elektronlaryň özara kulon täsiriniň energiýasy hem girýär. Şeýle çylşyrymly deňlemäni (2.1.) umumy görnüşde çözmek mümkin däl. Bu deňlemäni ýeke-täk elektron üçin, ýagny ψ_i funksiýany bir elektronynyň koordinatlaryna bagly ýagdaýda çözmegiň mümkinçiligi bar.

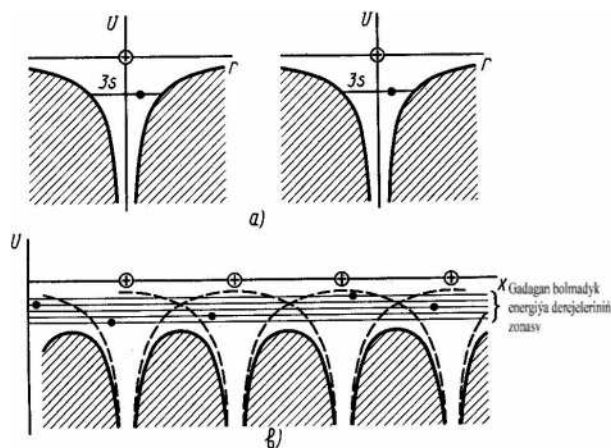
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial z^2} \right) + U_i(x, y, z) \psi_i = E_i \psi_i \quad (2.4.)$$

bu ýerde E_i i elektronynyň energiýasy. Bu meseläni çözmek gaty çylşyrymly, sebäbi her elektronynyň ýagdaýy $u(x, y, z)$ beýleki elektronlaryň ýagdaýyna bagly bolup galýar. Elektronlar ideal kristalda, ýagny periodik kristallik gözenekde, garyndy atom ýok ýagdaýynda seredeliň. Şeýle kristalda atomlar (ionlar) ideal potensial meýdanyny döredýär. Walent elektronynyň hereketini şeýle ideal kristalda, natriniň mysalynda seredeliň (2.1 surat).



2.1. Surat. Köpelektronly atomda elektronlaryň energiýalarynyň derejeleri.

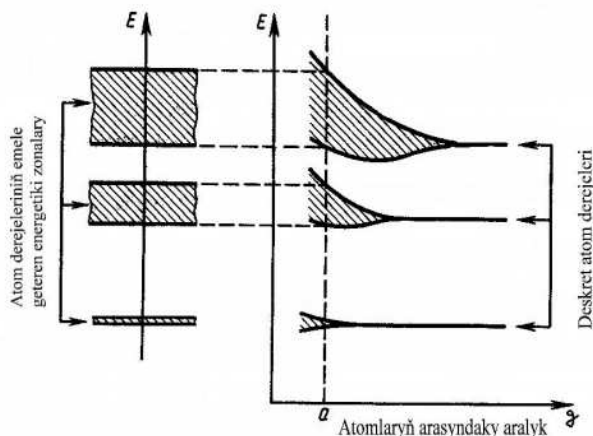
Natriniň N ionyny (atomyny) real kristalyň atomlarynyň gözenekde ýerleşşi ýaly ýerleşdireliň, emma özara täsiri hasaba almaz ýaly uzak aralykda ýerleşsinler. Bu ýagdaýda seredilýän elektron islendik atomyň ýanynda tükeniksiz wagtlap durup biler, sebäbi ony ionyň kulon meýdany tarapyndan ýüze çykarylan potensial päsgelçiligi saklaýar. (2.2-nji surat). Eger indi atomlar bir-birine golaýlaşdyrylsa (hakyky ýagdaýa çenli) onda potensial egrileri bir-biriniň üstüne gabat gelerler we jemleýji potensial egrisi öz real ýagdaýyna gider. Şeýlelikde atomlaryň arasyndaky potensial päsgelçiligiň ululygy kiçelip walent elektronlary bir atomdan beýleki atoma erkin hereket edip bilýär. Walent elektronynyň her haýsysy tutuş kristala degişli bolýar we şeýlelikde umumylaşan walent elektronlar, kristalda belli bir derejede erkin elektronlara meňzeş hereket edýärler. Eger-de potensial päsgelçilik gaty kiçelmedik ýagdaýynda hem elektronlaryň umumylaşmagy bolup geçýär, sebäbi elektronlaryň potensial päsgelçiligi böwsüp geçme hadysasy ýüze çykýar.



2.2. Surat. Atomlaryň golaýlamagy bilen elektronlaryň ýerleşiş ýagdaýynyň üýtgemegi.

Bu effekt, ýagny elektronýň tunnelirleme häsiýeti (böwsüp geçme häsiýeti) kwant häsiýetlidir, ýagny mikrobölejigiň tolkun häsiýeti ýüze çykýar.

Şeýlelikde, umumylaşan elektronlar kristalda özüni belli bir derejede erkin elektronlar ýaly alyp barýarlar. Seredýän mysalymyzda Na atomlarynda golaýlaşmazdan ozal 3s walent elektronlaryň her biri şol bir energiýa eýe bolup öz atomynda ýerleşýardiler. Gaty jisimiň emele gelmegi bilen elektronlar tutuş kristala degişli bolup, özleriniň häsiýetleri boýunça tapawutlanmaýarlar. Diňe olar tutuş kristal boýunça dürli hilli (ugury we tezligi boýunça) süýşýärler. Şol sebäpli hem dürli elektronlar bir-birinden energiýasy boýnça tapawutlanýarlar. Dar energetiki derejäniň energetiki zona, ýagny elektronlaryň hereket edip bilýan derejeler ulgamyna ýaýramasy ýüze çykýar. Kristalda elektronlaryň energetiki spektriniň umumy görnüşi 2.3 suratda görkezilen.



2.3.Surat. Energetiki derejeleriň ýaýylmagy we kristalda energetiki zonalaryň emele gelmegi.

2. Elektronýň kristaldaky tolkun funksiýasy. Brillýueniň zonalary.

Kristalyň her ýönekeý öýjügiň (ýaçeýkasynyň) içinde elektronýň tolkun funksiýasy elektronýň atomdaky tolkun funksiýasyna ýakyndyr. Şol bir wagtyň özünde elektronýň ýönekeý ýaçeýkadaky hereketi erkin elektronýň tolkun funksiýasyna meňzeş bolmaly. Erkin elektronýň durnukly ýagdaýy üçin tolkun funksiýasy şeýle görnüşe eýedir.

$$\psi = Ce^{i(kr - \omega t)} \quad (2.5)$$

bu ýerde C - hemişelik koeffisiýent, k -elektronýň tizligini we energiýasyny kesgitleýän tolkun wektory.

Blohyň teoremasyna laýyklykda elektronýň durnukly ýagdaýynyň tolkun funksiýasy şeýle görnüşe eýedir.

$$\psi(\mathbf{r}, t) = u(\mathbf{r}) e^{i(kr - \omega t)} \quad (2.6)$$

bu ýerde $u(\mathbf{r})$ - gözenegiň periodyna bagly (deň) periodik köpeldiji. (2.6) gatnaşyga Blohyň funksiýasy diýilip at berilýär. Bu funksiýalar bir-birine meňzeşdir, sebäbi ikisinde-de şol bir köpeldiji $e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r}-\omega t)}$ bar. Tapawudy bolsa, Blohyň funksiýasyndaky, kristalyň haýsy ýerinde elektronyň bolmagynyň ähtimallygyny kesgitleýän periodiki köpeldiji $u(\mathbf{r})$, her ýönekeý ýaçaýkada koordinata baglydyr. Tolkun wektorynyň (\mathbf{k}) şol bir bahalary üçin bu funksiýa haçan-da dürli zonalaryň elektronlaryna seredende birmeňzeş däl. Eger ýene-de n -indeks girizilse (zonanyň nomeri) onda, bu ýagdaýda periodiki köpeldiji umumy görnüşde şeýle ýazylýar.

$$u(\mathbf{r})=u_{n,k}(\mathbf{r}) \quad (2.7)$$

Onda Blohyň funksiýany şeýle görnüşde ýazyp bolar.

$$\psi_{n,k}(\mathbf{r})=u_{n,k}(\mathbf{r})e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} \quad (2.8)$$

Bu funksiýanyň anyk görnüşi Şredengeriň deňlemesine girýän $U(r)$ potensial energiýanyň görnüşi bilen kesgitlenilýär. Değişlilikde, erkin elektronlara seredeninde, kristalyň periodiki meýdanynynda hereket edýän elektronlaryň dispersiýa gatnaşyklary hem üýtgemeli. Birinjiden, görnüşi ýaly, bu elektronlaryň energetiki spektri zona häsiýetine eýe bolýar; atomlaryň değişli E_a derejeleriniň emele getiren gadagan bolmadyk energiýa zonalary, energiýanyň gadagan zonasynyň gatlagy bilen bölünendir. Ikinjiden, hasaplamalaryň görkezişi ýaly, her bir zonanyň içinde elektronyň energiýasy k tolkun wektorynyň periodiki funksiýasydyr we a häsiýetnamaly (hemişelikli) bir ölçegli kristal üçin (atom zynjyry) şu gatnaşyk görnüşinde ýazylýp biliner:

$$E(k) = E_a + C + 2A \cos ka, \quad (2.9)$$

bu ýerde E_a - zonany emele getiren atom derejesiniň energiýasy; C – goňşy atomlaryň meýdanynyň täsiri bilen bu derejäniň süýşmesi; A –atomlaryň tolkun funksiýalarynyň egrileriniň müngeşmesiniň netijesinde kristalyň elektronlarynyň bir atomdan ikinji bir atoma geçmeginiň mümkinçiligini hasaba alýan *çalyşma integraly* diýlip atlandyrylýan ululykdyr. Ol, tolkun funksiýalarynyň egrileri näçe köp müngeşýän bolsa, şonçada uludyr, ýagny goňşy atomlar şonça ýokary ýyglykda öz elektronlaryny çalyşyp bilerler.

s – dereje üçin $A_s < 0$, p - dereje üçin $A_p > 0$, şol sebäpli hem (2.9) gatnaşygy s -we p -zonalar üçin aýratynlykda ýazmaklyk maksadalaýykdyr:

s – zona üçin

$$E_s(k) = E_s^1 - 2A_s \cos ka; \quad (2.10)$$

p -zona üçin

$$E_p(k) = E_p^1 + 2A_p \cos ka, \quad (2.11)$$

bu ýerde $E_s^1 = E_{as} + C_s$; $E_p^1 = E_{ap} + C_p$; A_s, A_p - bu derejeler üçin çalyşma integralynyň absolyt bahalary.

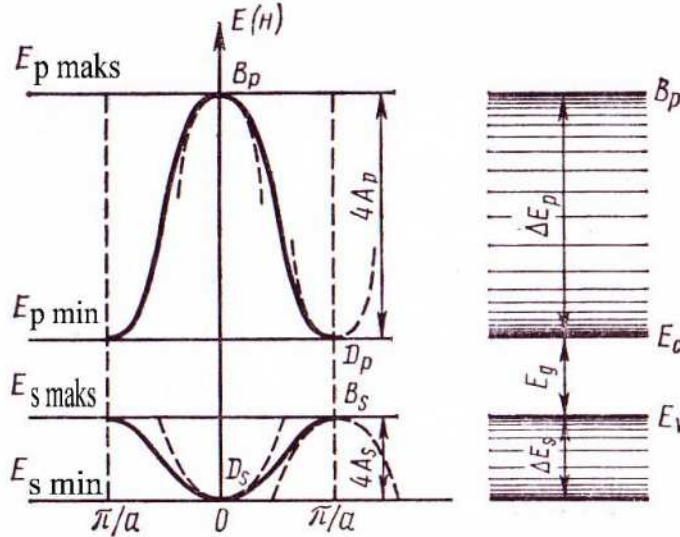
2.4 suratda 2.10 we 2.11 deňlemeleriň esasynda gurulan, s we p zonalar üçin $E(k)$ dispersiýa egrileri getirilen. S - dereje üçin E_s haçanda $k=0$ bolanda minimal baha eýe bolýar $E_{s\min} = E_s^1 - 2A_s$. Tolkun wektory k artmagy bilen $\cos ka$ kiçelýär we $E_s(k)$ artýar, özüniň maksimal bahasyna $E_{smaks} = E_s^1 - 2A_s$ haçanda $k = \pi/a$ bolanda ýetýär. Tolkun wektory k 0-dan $-\pi/a$ aralygynda üýtgän ýagdaýynda hem $E_s(k)$ takyk şeýle üýtgeýär. $E_{s\min}$ - dan E_{smaks} aralygynda ýerleşen gadagan bolmadyk s -zonanyň giňligi, şu aşakdaky ýaly kesgitlenilýär:

$$\Delta E_s = E_{smaks} - E_{s\min} = 4A_s \quad (2.12)$$

(2.12) deňlikden görnüşi ýaly gadagan bolmadyk s zonanyň giňligi, goňşy atomlaryň tolkun funksiýalarynyň müngeşmek derejesine baglyly bolan çalyşma integralynyň absolýut bahasy bilen kesgitlenilýär.

P-dereje üçin $E_{p\min} = E_p^I - 2A_p$ tolkun wektory $k = \pm\pi/a$ aralygynda ýerleşýär, $E_{p\max} = E_p^I + 2A_p$ $k=0$ bolanda. Gadagan bolmadyk p-zonanyň giňligi ýene-de çalyşma integrally A_p ululygy bilen kesgitlenilýär.

$$\Delta E_p = E_{p\max} - E_{p\min} = 4A_p \quad (2.13)$$



2.4. Surat. Birölçepli kristalda Brillýueniň birinji zonasy.

Tolkun wektory k bagly periodiki funksiýa hökmünde elektronyň energiýasy $E(k)$, öz üýtgemesiniň çäginde doly bir sikline eýýe bolsa, onda k tolkun wektorynyň bahalarynyň oblastyna (sebtine) *Brillýueniň zonalary* diýlip at berilär. Bir ölçepli kristal üçin (atom zynjyry), Brillýueniň birinji zonasy $k = -\pi/a$ -dan $k = \pi/a$ çenli dowam edýär we dowamlylygy $2\pi/a$ deň bolar (2.4. surat). Dispersiýa egrisi ekstremumlaryň ýakynynda, ýagny $k = 0$ we $k = \pm\pi/a$ (Brillýueniň birinji zonasyň ortasynda we araçäginde), $\cos ka$ -ny ka boýunça yzygiderlige dargatmak mümkin (haçanda ekstremum Brillýueniň zonasyň ortasynda bolanda k 0-dan hasaplanylýar, haçanda ekstremum Brillýueniň zonasyň araçäginde bolanda $k = \pm\pi/a$ -dan hasaplanylýar we dargamanyň ilkinji iki agzasy bilen çäklenilýär:

$$\cos ka = 1 - (ka)^2 / 2 + \dots$$

$\cos ka$ - nyň bahasyny (2.7) we (2.8) deňliklere goýup alýarys:

$$E_s(k) = E_{s\min} + A_s(ka)^2, \quad E_p(k) = E_{p\max} - A_p(ka)^2.$$

$E(k)$ dispersiýa egrisiniň minimumyna energetiki zonanyň düýbi diýilýär, maksimumyna ýokary çägi ýa-da depesi diýilýär. Şol sebäpli hem alnan gatnaşyklary umumy görnüşde şeýle ýazmak bolar:

$$E_{du}(k) = E_{\min} + A_{du}(ka)^2 \quad (2.14)$$

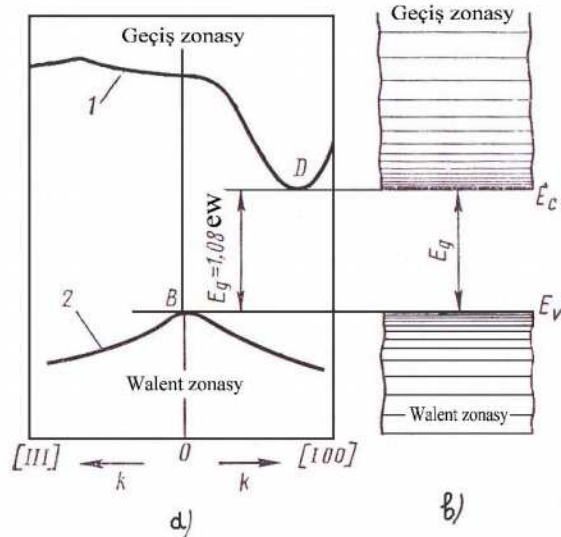
-zonanyň düýbi üçin;

$$E_{dep}(k) = E_{\max} - A_{dep}(ka)^2 \quad (2.15)$$

-zonanyň depesi üçin.

Şeýlelikde, energetiki zonanyň düýbünde we depesinde elektronyň energiýasy tolkun wektorynyň kwadratyna proporsionaldyr. 2.4 suratda (2.14) we (2.15) deňliklere degişli parabolalar, punkter çyzyklar bilen görkezilýär. Real kristallarda $E(k)$ baglanşyk, köplenç örän çylşyrymlydyr.

2.5 suratda, mysal hömünde kremniniň geçiş zonasyny (1-nji egri) we walent zonasyny (2-nji egri) çäklendirýän dispersiýa egrileri getirilen. Suratdan görnüşi ýaly, geçiş zonanyň düýbi D Brillýueniň zonasynyň ortasynda ýerleşmeýär, [100] ugurda onuň araçäginin ýakynynda ýerleşýär. Kremniniň walent zonasy Brillýueniň zonasynyň ortasynda ýerleşip, depesi B bolan parabolany ýada salýan egri bilen çäklenen. Emma, dispersiýa egrileriniň çylşyrymlydygyna seretmezden, zonalaryň düýbi we depesi üçin $E(k)$ özüniň kwadrat baglanşygy häsiýetini saklap galýar.



2.5. Surat. Kremniý ýarymgeçirijisiniň geçiş zonasyny we walent zonasyny çäklendirýän dispersiýa egrisi.

Walent zonasy bilen geçiş zonasynyň arasyndaky iň kiçi aralyk, gadagan zonanyň giňligi hökmünde kabul edilýär; 2.5 suratda ol E_g bilen bellenen.

Köplenç ýarymgeçirijileriň energetiki diagrammalarynyň gurluşlary ýönekeýleşdirilen görnüşde seredilende, geçiş zonasyny we walent zonasyny çäklendirýän hakyky dispersiýa egrilerine derek, iki sany parallel göni çyzyk geçirilýär: biri – geçiş zonasynyň düýbüne galtaşma, ikinjisi – walent zonasynyň depesine galtaşma (2.5, b surat). Birinji göni çyzyk geçiş zonasynyň aşaky çägi (düýbi) hökmünde kabul edilýär, ikinji – walent zonasynyň ýokarky çägi (depesi) hökmünde kabul edilýär. Bu iki göni çyzygyň aralygy gadagan zonanyň giňligine, E_g deňdir.

3. Elektronlaryň kristaldaky öňe hereketi. Elektronlaryň daşky güýjüň tasiri esasyndaky hereketi.

Elektronlaryň toparlaýyn tolkun hereketiniň geňişlikdäki tizligi - elektronyň toparlaýyn tizligi – onuň tolkun wektory bilen şeýle gatnaşyk boýunça baglydyr.

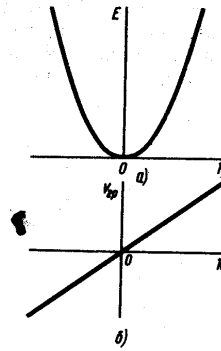
$$v_t = \frac{\hbar}{m_e} \cdot k, \quad (2.16)$$

bu ýerde $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg – elektronyň massasy.

Erkin elektronyň energiýasy:

$$E = E_k = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{m_e \hbar^2 k^2}{2m_e^2} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \quad (2.17)$$

Şeýlelikde erkin elektronyň energiýasynyň tolkun wektory bilen baglanşygy parabola görnüşindedir. Şeýle elektronlar üçin $v_t = f(k)$ baglanşyk göni çyzyklydyr. (2.6. surat).



2.6. Surat. Erkin elektronyň tolkun wektoryna baglylykda dispersiýa çyzygy (egrisi) (a) we toparlaýyn tizligi (b).

Haçanda kristaldaky elektronlar üçin, tolkun wektorynyň (k) belli bir ýakyn bahalaryny hasaba alsak, onda elektronyň tolkun toplumynyň (paketiniň – toparlaýyn tolkun hereketi) kristaldaky tizligi şeýle kesgitlenilýär.

$$v_t = \frac{1}{\hbar} \text{grad}_k E \quad (2.18)$$

Bu ýerden tizligiň x oky boýunça düzüjisi

$$v_t = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{\partial E}{\partial k_x} \quad (2.19.)$$

Şeýlelikde elektronyň paketiniň (toplumynyň) tizligini y , z oklar boýunça hem tapmak bolar.

$$v_t = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{\partial E}{\partial k_y} \quad ; \quad v_t = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{\partial E}{\partial k_z} \quad (2.20.)$$

Elektronyň daşky güýjüň täsiri esasyndaky hereketi.

Haçanda ideal kristalda daşky güýç täsir etmese, elektron islendik durnukly ýagdaýda tükeniksiz wagtlap durup biler. Daşky elektrik meýdany tolkun wektorynyň (k) üýtgemegine getirýär. Tolkun wektory k -nyň wagt bilen üýtgemegini energiýanyň saklanmak kanunundan almak mümkin: elektronyň toparlaýyn tizliginiň ugruna, daşky güýjüň täsiri esasynda, elektronyň energiýasynyň üýtgemesi:

$$dE = F dx = F v_t dt \quad (2.21)$$

$$\text{Öz gezeginde} \quad v_t = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{\partial E}{\partial k_x}$$

$$\text{onda} \quad dE = \frac{F}{\hbar} \frac{dE}{dk} dt \quad (2.22.)$$

$$\text{ýa-da umumy görnüşde} \quad \frac{d}{dt}(\hbar k) = F \quad (2.23)$$

Indi elektronyň daşky güýjüň täsiri esasynda alan tizlenmesini tapalyň (ýönekeýlik üçin, güýç hereketiň ugruna täsir edýär diýip alalyň):

$$a = \frac{dv_t}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} \right) \quad (2.24)$$

Energiýaanyň wagta baglylygynyň çylşyrymly funksiýadygyny göz önünde tutup: $E=E(k(t))$, alýarys:

$$a = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2 E}{dk^2} \frac{dk}{dt} \quad (2.25)$$

Tizlenmäniň deňlemesinde dk/dt gatnaşygy, ýagny tolkun wektorynyň wagty boýunça üýtgemesini, F güýjüň üsti bilen aňladyp alýarys.

$$a = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{d k^2} F \quad (2.26.)$$

Bu aňlatmada $\frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{d k^2}$ Nýutonyň ikinji kanundaky $1/m$ -iň ornuny tutýar. Başga söz bilen aýdanyňda elektron kristalyň periodiki potensial meýdanynda daşky güýjüň täsiri esasynda, m_0 massaly erkin elektronyň şol güýjüň täsiri esasyndaky hereketi ýaly, hereket şeýle massa, ýagny effektiw massa eýe bolanda edýär

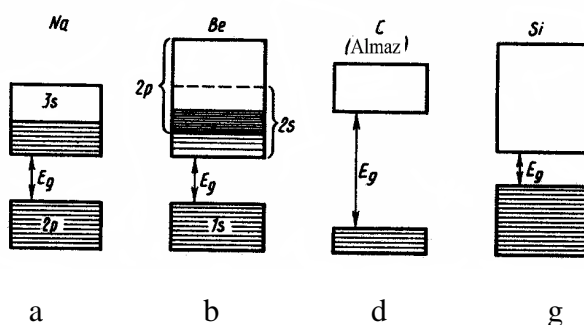
$$m_{ef} = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}} \quad (2.27.)$$

m_{ef} - ululyga elektronyň effektiw massasy diýilip at berilýär. Kristalyň periodiki üýtgeýän potensial meýdanyndaky elektronyň massasyny m_{ef} diýip kabul etmeklik bilen onuň hereketini erkin elektronyňky ýaly kabul edip bileris. Emma effektiw massa elektronyň kristaldaky hereketini häsiýetlendirmek bilen, özboluşly üýtgeşik ululykdyr. Ol položitel hem-de otrisatel bolup bilýär, onuň massasynyň ululygy erkin elektronyň massasyndan uly hem-de kiçi bolup bilýär.

4. Zonalaryň elektronlar bilen doluşy. Jisimleriň metallara, dielektriklere we ýarymgeçirijilere bölünişi.

Gaty jisimlerde, elektronlaryň sanynyň kesgitliligi sebäpli, diňe pes energetik derejeleriň birnäçesi elektronlar bilen doludyr. Zonalaryň elektronlar bilen doluş häsiýeti boýunça hemme jisimleri iki sany uly topara bölüp bolar.

Birinji toparyna, doly zonalaryň ýokarsynda elektronlar bilen dolmadyk zonasy bar bolan gaty jisimler girýär (2.7-nji surat). Aşgar metallarda boluşy ýaly, şeýle doly däl zona, ony emele getirýän dereje doly bolmadyk ýagdaýynda ýüze çykýar. Bölekleyin doldurylan zona ýene bir ýagdaýda ýüze çykýar, olam haçan-da doly zona boş zona bilen müngeşip duran ýagdaýynda. Meselem, bu ýagdaý berilliý elementinde ýüze çykýar (2.7-nji surat). Elektronlar bilen bölekleyin doly zona (частично заполненная зона) metallarda gabat gelýär.



2.7. Surat. Metallarda (a,b), dielektriklerde (d) we ýarymgeçirijilerde (g) zonalaryň elektronlar bilen doluşy.

Ikinji topara doly zonanyň ýokarsynda boş zonasy bar jisimler girýär. Mendeleyewiň tablasasynyň IV toparynyň elementleri, kremniý, germaniý, çal (seroýe) olowo muňa mysal bolup olaryň almaz görnüşü gurluşy bar. Ýene-de bu topara birnäçe himiki elementler we olaryň birleşmeleri girýär.

Gaty jisimleriniň zona teoriýasyna laýyklykda, olaryň metaldygyna ýa-da dielektrikligine garamazdan, daşky energetiki derejeleriniň elektronlarynyň hereketiniň birmeňzeş erkinligi bar. Emma bu jisimleriniň elektrik häsiýetleri, ylaýta-da udel elektrik geçirijiligi birnäçe dereje tapawutlanýar: metallarda $\sigma \approx 10^7 \text{Om}^{-1} \text{m}^{-1}$, dielektriklerde $\sigma < 10^{-11} \text{Om}^{-1} \text{m}^{-1}$.

Şeýlelikde, kristalda hereket edip bilýän, erkin elektronynyň bolmagy, jisimleriniň geçirijiligi üçin zerur şert bolup, entäk ýeterlik däl. Ýeterlik şerti göz önüne getirmeklik üçin kristallaryň doly we bölekleyin doldurylan zonalaryndaky erkin elektronlaryň daşky meýdanyň täsiri esasyndaaky hereketine seredeliň.

Kristalda daşky E elektrik meýdanyny döredeliň. Her bir elektrona bu meýdan $F = -eE$ güýç bilen täsir edip elektronlaryň tizlik boýunça paýlanyşyny bozmaga ymtylýar. Daşky meýdanyň ugruna hereket edýän elektronlaryň tizligi kemeler. Elektronlaryň tizliginiň üýtgemegi elektronynyň energiýasynyň üýtgemegine getirýär, bu bolsa elektronlaryň ýokarky ýa-da aşaky kwant derejesine geçmegine getirýär. Şeýle geçiş diňe bir ýagdaýda ýüze çykyp biler, haçanda elektronynyň degişli bolan energetik zonasynnda boş dereje bar bolan ýagdaýynda ýa-da zona doly däl bolan ýagdaýynda. Bu ýagdaýda eýýäm uly bolmadyk elektrik meýdany hem elektrona goşmaça impuls berip, ony ýakyndaky boş derejä geçirip biler. Jisimde elektronlaryň meýdanyň garşysyna hereketi ýüze çykyp, elektrik togunyň emele gelmegine getirýär. Şeýle jisimler gowy geçirijilerdir.

Indi kristalyň ýokarky zonasy elektronlar bilen doly bolsun. Şeýle zona walent zonasy diýilip atlandyrylýar (2.7-nji surat). Goý walent zonasy, ýokarda ýerleşen erkin zonadan giň energetiki boşluk bilen uzaklaşan bolsun. Kristalda şeýle energiýanyň gadagan aralygyna - gadagan zona diýilip at berilip, onuň giňligine gadagan zonanyň giňligi diýilýär. Gadagan zonadan ýokardaky zona geçiş zonasy diýilip at berilýär. Bu zona elektronlar bilen doly bolman, ýokary elektrik geçirijiligi ýüze çykarýar.

Daşky meýdan walent zonasyndaky elektronlaryň hereketini üýtgedip bilmeýär, sebäbi daşky meýdan elektrony ýokarda ýerleşen geçiş zonasyna geçirip bilmeýär. Walent zonanyň içinde boş derejäniň ýoklugy sebäpli elektronlaryň hereketiniň tizligi üýtgemeyär. Şol sebäpli hem şeýle kristallarda daşky elektrik meýdany elektronlaryň ugrukdyrylan hereketini ýüze çykarmaýar.

Şeýlelikde jisimlerde ýokary elektrik geçirijiligiň ýüze çykmagynyň ýeterlik şerti, energetik zonalarynda elektron bilen doly bolmadyk zonanyň bolmagydyr. Bu şert metallarda doly ýerine ýetýär.

Ikinji topara degişli bolan gaty jisimlerde şeýle zonanyň bolmazlygy (0 K temperaturada), olarda erkin hereket edýän elektronlaryň bolmagyna garamazdan, olaryň elektrik toguny geçirmezligine getirýär.

Ikinji topara degişli jisimler gadagan zonasynyň giňligi boýunça ikä bölünýär: ýarymgeçirijiler we dielektrikler. Dielektriklere, oňositel, gaty giň gadagan zonaly jisimler girýär $E_g > 3 \text{ eV}$. Meselem: almaz $E_g = 5.2 \text{ eV}$; boryň nitridi $E_g = 4.6 \text{ eV}$; a Al_2O_3 üçin $E_g = 7 \text{ eV}$.

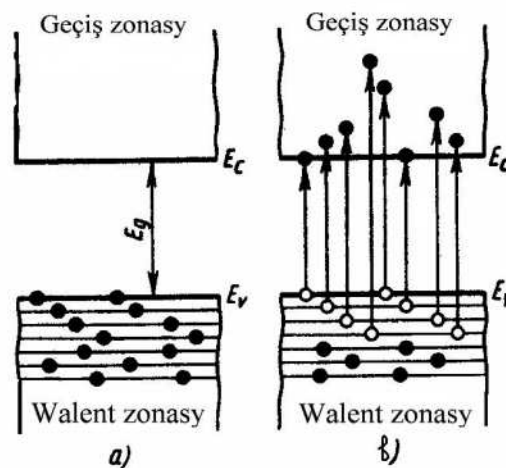
Ýarymgeçirijilere dielektriklere seredeniňde, dar gadagan energetiki zonaly jisimler girýär. Olaryň mysaly: germaniý $E_g = 0.7 \text{ eV}$ kremniý $E_g = 1.1 \text{ eV}$; arsenid galliý $E_g = 1.43 \text{ eV}$.

Mundan beýläk bu toparyň jisimlerine jikme-jik seredip geçeriş.

5. Hususy ýarymgeçirijiler. Deşikler hakynda düşünje. Gadagan zonadaky aýratyn derejeler.

Himiki arassa ýarymgeçirijilere hususy ýarymgeçirijiler diýilýär. Hususy ýarymgeçirijilere birnäçe himiki elementler (germaniý, kremniý, selen, tellur we ş.m) we köp sanly himiki birleşmeler (arsenid galliý GaAs, arsenid indiý InAs; antimonid indiý InSb, karbid kremniý SiC) girýär.

2.8-nji suratda hususy ýarymgeçirijiniň zona gurluşynyň ýönekeýleşdirilen shemasy getirilen. Haçanda $T = 0 \text{ K}$ bolanda ýarymgeçirijiniň walent zonasy elektronlar bilen doly, onuň ýokarsynnda ýerleşen geçiş zonasy boşdur. Şol sebäpli hem $T = 0 \text{ K}$ -de hususy ýarymgeçirijiler, dielektriklere meňzeş, elektrik toguny geçirmeýär.



2.8. Surat. $T=0K$ temperaturada ýarymgeçirijilerde zonalaryň elektronlar bilen doluşy (a) we temperaturanyň ýokarlanmagy bilen elektronlaryň geçiş zona geçişi (b).

Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen, elektronlaryň ýylylyk oýandyrylmasy sebäpli walent zonadaky elektronlaryň belli bir mukdary, gadagan zonadan aşyp, geçiş zona geçer ýaly energiýa eýe bolýar (2.8-nji surat)

Bu bolsa geçiş zonada erkin elektronyň, a walent zonada - şu zonanyň elektronlary geçer ýaly boş derejäniň emele gelmegine getirýär. Eger şeýle kristala daşdan elektrik meýdany berilse, onda olarda elektronlaryň bir tarapa ugrukdyrylan hereketi ýüze çykýar (geçiş zonada hem-de walent zonada). Ýarymgeçiriji kristal elektrik toguny geçirýär.

Gadagan zona näçe dar bolsa, ýa-da kristalyň temperaturasy näçe uly bolsa şonça köp elektron geçiş zona geçýär we kristal ýokary elektrik geçirijilige eýe bolýar. Mysal üçin germaniý kristalyna seredeliň: $E_g \approx 0.7$ eW, bireýýäm otag temperaturasynda germaniýniň geçiş zonasyndaky elektronyň konsentrasiýasy $n_i \approx 10^{19} \text{ m}^{-3}$ udel garşylygy $\rho \approx 0.48$ Om.m Gadagan zonasynyň giňligi $E_g \approx 2.24$ eW bolan fosfid galliý kristaly şeýle häsiýetnamalara diňe ýokary temperaturada ýetip biler ($T=900$ K).

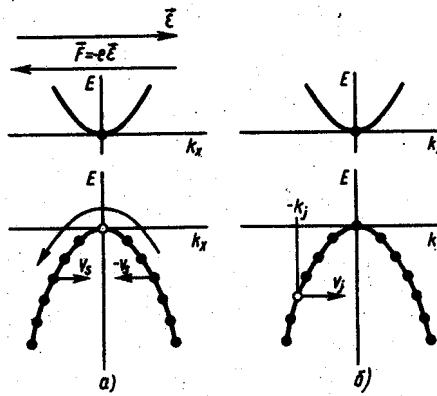
Ýokarda aýdylanlardan şeýle iki sany netije gelip çykýar.

Ýarymgeçirijileriň geçirijiligi oýandyrylan geçirijilikdir: ol elektrony walent zonadan geçiş zona geçirip (aşyryp) bilýän, daşky täsiriň esasynda ýüze çykýar. Şeýle daşky täsirler ýarymgeçirijini gyzdymaklyk, ýagtylyk we ionlaşdyryş şöhesi bilen şöhlelendirmeklik bolup biler.

Jisimleriň ýarymgeçirijä we dielektrige bölünmegi şertlidir. Meselem, fosfid galliý otag temperaturasynda ýarymgeçiriji häsiýetlerine eýedir, emma pes temperaturada dielektrige golaýdyr.

Deşikler hakynda düşünje.

Elektronlaryň belli bir böleginiň walent zonadan geçiş zona geçen ýagdaýynda, walent zonada elektronlaryň hereketine seredeliň. (2.9-njy surat). Daşky meýdanyň täsiri esasynda walent zonadaky elektronlar emele gelen boş derejelere geçip bilýarler we walent zonada hereket edip elektrik toguny dörederler.



2.9. Surat. Deşik düşüncesine düşündiriş.

Eger-de, walent zonada, v_s tizlik bilen häsiýetlendirilýän bir sany derejeden başga derejeleriň ählisi boş däl diýip göz önüne getireliň. Şeýle zona boýunça togyň dykzlygy

$$J = ev_s \quad (2.28)$$

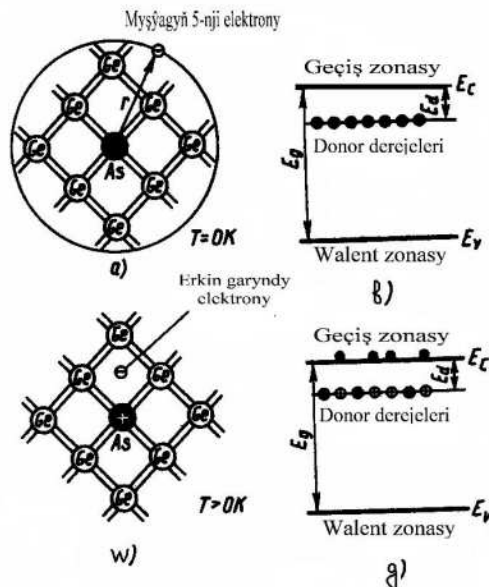
Sebäbi başga derejedäki elektronlar togyň geçişine gatnaşmaýar. Şeýlelikde, bir sany boş derejesi bolan, walent zonadaky hemme elektronlaryň togunyň jemi, položitel zarýadly $+1$ bir bölejigiň (çastisanyň) şol derejedäki hereketi esasynda ýüze çykýar. Şeýle göz önüne getirilýän bölejige deşik diýip at berilýär. Şeýlelikde, deşigiň effektiv massasy diýilip, walent zonasynyň depesindeki elektronyň effektiv massasynyň ters ululygyna düşünilýär.

Gadagan zonadaky aýratyn derejeler.

Ýarymgeçirijiler gaty arassa bolan ýagdaýynda-da elmydama özünde garyndylaryň atomlaryny saklaýarlar, olar bolsa özleriniň hususy energetik derejelerini döredýär. Bu derejelere garyndylar derejesi diýilýär. Şeýle derejeler ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň içinde ýa-da gadagan däl zonalarda geçiş zonanyň düýbünden we walent zonanyň depesinden dürli aralykda ýerleşip bilýärler. Käbir ýagdaýlarda ýarymgeçirijä gerek häsiýetleri bermeklik üçin garyndylar ýörite goşulýar.

Garyndy derejeleriniň esasy görnüşlerine seredip geçeliň.

Donor derejeleri. Goý germaniý (Ge) kristalynda germaniý atomlarynyň belli bir bölegi baş walentli myşýak (As) atomlary bilen çalşylsyn. Germaniý almaz görnüşli gözeneg eýe bolup, her atom daşky dört sany atom bilen gurşalyp alnandyr we olar bilen walent güýçleri boýunça özara baglydyr (2.10-njy surat). Germaniýniň atomy özüniň boş orbitallaryna goňşy atomlardan bir elektrondan alyp, öz gezeginde goňşy atomlar bilen özüniň dört walent elektronyny paýlaşýar. Şeýlelikde germaniýniň 8-orbitaly hem eýelenendir. Myşýagyň atomy hem germaniý materialynyň gözeneginde öz goňşy atomlary bilen özara baglanyşýar. Myşýagyň walent gatlagyndaky 5-nji elektrona bu derejede ýer ýetmeýär we ol elektron öňki orbitasyndan uzakdaky derejelere geçýär. Şeýlelikde artyk elektronyň ion bilen baglanyşyk güýji ϵ gezek gowşaýar (germaniýniň dielektrik syzyjylygy, $\epsilon=16$) onuň orbitasy giňelýär.



2.10. Surat. T=0K (a) we T>0K (w) temperaturada ýarymgeçirijide donor atomy; T=0K (b) we T>0K (g) temperaturada donor derejesiniň elektronlar bilen doldurylyşy.

Şeýle ýagdaýda elektronyň ion bilen arabaglanyşyk energiýasy şeýle formula bilen aňladylýar.

$$E_d = \frac{e^4 m_n}{8(\epsilon \epsilon_0)^2 h^2} \quad (2.29)$$

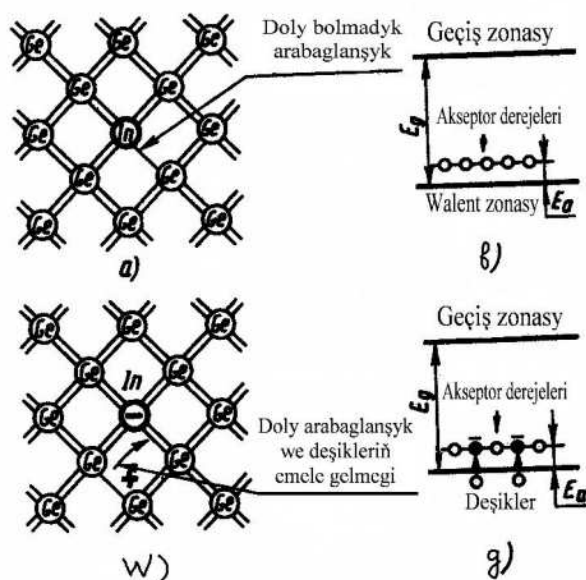
Eger germaniý üçin $m_n = 0.22m_0$ we $\epsilon = 16$ bolýandygyny hasaba alsak, onda $E_d \approx 0.01 \text{ eV}$.

Eger-de elektrona 0.01 eV möçberinde energiýa berilse onda ol atomdan aýrylyp, erkin elektrona öwrüler (2.10-y surat).

Geçiş zonasyndaky elektronlaryň çeşmesi bolan garyndylara, donorlar diýilip at berilip, bu garyndylaryň energetik derejelerine - donor derejeleri diýilýär. Donor garyndylary bar bolan ýarymgeçirijilere elektron ýarymgeçirijileri ýa-da n-görnüşli ýarymgeçirijiler diýilýär.

Akseptor derejeleri.

Goý indi germaniniň gözeneginde käbir düwünlerde (uzellerde) germaniý atomy üç walentli indiý (In) atomy bilen çalşylsyn (2.11 surat). Indiniň atomynda goňşy dört germaniý atomy bilen baglanyşsara bir elektron ýetmeýär. Şol sebäpli hem bir özara baglanyşyk ýeri boş galýar. Şeýlelikde walent baglanyşyk ulgamynda bir ýer boş galýar. Bu boş ýeriň we daş-töweregindäki elektronlaryň özüni alyp barşy şeýle kwazibölejigiň özüni alyp barşyna deşige-ekwiwalentdir. Şeýlelikde, germaniýniň gözenegine III topar elementleriniň atomy girizilende walent zonada deşigiň emele gelmegine getirýär. Emma bu deşikler garyndy atomy bilen bagly bolmaly. Hakykatdan-da, indiý atomynyň daş-töwereginde hemme özara baglanyşyklar doly bolsa, atom otrisatel zaryadlanan iona öwrülýär we položitel zaryadly deşigi özüne çekýär. Şeýle ýagdaýda položitel zaryadly ionuň daşynda elektronyň aýlanyşy bilen, otrisatel ionyň daşynda deşigiň aýlanyşynyň meňzeşligi bardyr. Ion bilen deşigiň özara baglanyşygynyň energiýasyny (2.29) formulada m_n -i m_p -çalyşyp alýarys. Eger-de özara baglanyşykdaky deşige $E_a \approx 0.01 \text{ eV}$ energiýa berilse, iondan aýrylyp erkin ýagdaýa geçýär.



2.11. Surat. $T=0K$ (a) we $T>0K$ (g) temperaturada ýarymgeçirijide akseptor atomy; $T=0K$ (b) we $T>0K$ (g) temperaturada akseptor derejesiniň doldurylyşy.

Umuman aýdanyňda walent zonasynyň depesiniň golaýynda, ýagny $E_a \approx 0.01 eV$ aralykda elektron bilen doldurylmadyk indiy atomynyň derejesi bar. Bu derejäniň walent derejesine ýakynlygy sebäpli eýýäm ýokary bolmadyk temperaturada walent zonasyndan elektronlar garyndy derejesine geçýärler. Olar indiy atomy bilen baglanyşyp germaniýniň kristallik gözeneginde hereket etmek mümkinçiligini ýitirýärler. Şol bir wagtyň özünde walent zonasynda erkin hereket edip bilýän deşikler emele gelýär.

Walent zonasyndan elektronlary özüne kabul edip bilýän garyndylara akseptorlar diýilýär, bu garyndylaryň energetik derejelerine-akseptor derejeleri diýilýär.

Şeýle garyndylary özünde saklaýan ýarymgeçirijilere, deşikli ýarymgeçirijiler diýilip ýa-da p-görnüşli ýarymgeçirijiler diýilip at berilýär.

III BÖLÜM. ÝARYMGECIRIJILERDE ELEKTRONLARYŇ WE DEŞIKLERIŇ STATISTIKASY.

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 $E+\Delta E$ 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 önüne getirip bolar. Eger-de derejeleriň doly bolmagynyň ähtimallygyny $f(E)$ diýip bellesek, onda

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

$f(E)$ 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.

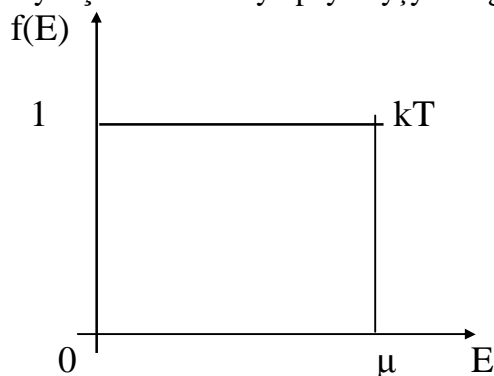
$$F(E) = (e^{(E-\mu)/kT} + 1)^{-1} \quad (3.2)$$

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

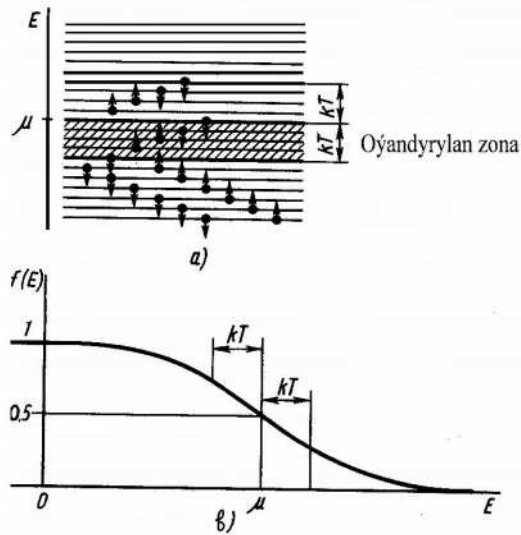
(3.2) funksiýa Fermi-Diragyň funksiýasy diýilýär. Ilki bilen bu funksiýanyň $T \rightarrow 0$ K ýagdaýyna seredeliň. Bu ýagdaýda μ -den kiçi bolan E energiýadaky derejeleriň islendigi üçin $f(E)=1$. Şol bir wagtda islendik $E > \mu$ dereje üçin $f(E)=0$ (3.1-nji surat).

Şeýlelikde, $T=0$ K temperaturada $E < \mu$ bolan energetik derejeleriň hemmesi elektronlar bilen eýelenendir, emma $E > \mu$ energetik derejeler boşdyr. Başga söz bilen aýdanyňda, $T \rightarrow 0$ 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 öz ýerlerinde üýtgemän galýarlar, sebäbi kT energiýa olary Ferminiň derejesinden ýokary geçirmeklige ýetik däl.

Ýylylyk oýandyrmasy esasynda elektronlaryň oň 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. $T=0$ K 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).

2. Ýarymgeçirijilerde elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy.

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

$$n = \int_{(g.z.b)} n(E) dE = \int_0^{E_{zona.dep}} g(E) f(E) dE \quad (3.3.)$$

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.

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \frac{((2m_n)^{3/2})}{\hbar^3} \int_0^\infty \frac{\sqrt{E} dE}{e^{(E-\mu)/(kT)} + 1} \quad (3.4.)$$

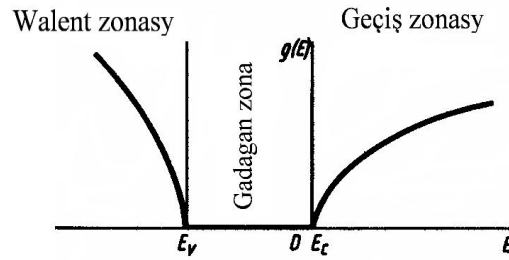
$$E(k) = -E_g - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_p}$$

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

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

$E_w = -E_g$ - walent zonanyň depesindäki energiýa.

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



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

Eger Fermiň derejesi μ geçiş zonanyň düýbünden $E_c=0$, aşakda ýerleşen bolsa, ýagny $(E-\mu) \gg kT$, onda Fermi-Diragyň funksiýasynyň maýdalawjysyndaky birliги hasaba almasada bolýar.

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

Bu ýagdaýda geçiş zonanyň derejeleriniň elektronlar bilen doly bolmak mümkinçiligi kiçidir

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

(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:

$$n(E)dE \approx \frac{(2m_n)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} \sqrt{E} \cdot e^{\mu/(kT)} \cdot e^{-E/kT} \cdot dE \quad (3.7.)$$

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 Fermiň 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 effektiv 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 elektronlaryň konsentrasiýasy näçe az bolsa, Fermiň derejesi şonça aşakda ýerleşendir.

Indi walent zonasyndaky deşikleriň konsentrasiýasynyň Fermiň 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.

$$P = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-(\mu - E_v)/(kT)} = N_v e^{\frac{(\mu + E_g)}{(kT)}} \quad (3.11.)$$

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

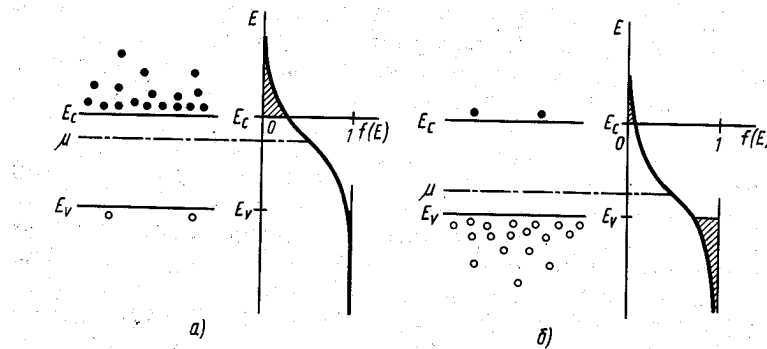
3. Hususy ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesiniň ýerleşşi we erkin zaryadlaryň konsentrasiýasy.

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

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

Bu ýerde i indeks, hususy ýarymgeçirijä degişiligi 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 dälidiginden ($1-f(E)$) gaty köpdür (3.4 a surat).



3.4. Surat. n-görnüşli ýarymgeçirijilerde ($n \gg p$) (a) we p-görnüşli ýarymgeçirijilerde ($p \gg n$) (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 dykzlygy dürlüdür.

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

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

Eger (3.13) deňlikden Ferminiň derejesiniň bahasyny tapalyň

$$\begin{aligned} \frac{N_v}{N_c} &= e^{\left(\frac{\mu_i}{kT} + \frac{\mu_i + E_g}{kT} \right)} \\ \ln \frac{N_v}{N_c} &= \ln e^{\left(\frac{\mu_i}{kT} + \frac{\mu_i + E_g}{kT} \right)} \\ \ln \frac{N_v}{N_c} &= \frac{\mu_i}{kT} + \frac{\mu_i + E_g}{kT} = \frac{2\mu_i}{kT} + \frac{E_g}{kT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{2\mu_i}{kT} &= -\frac{E_g}{kT} + \ln \frac{N_v}{N_c} \\ \mu_i &= -\frac{E_g}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} \\ N_v &= \frac{2(2\pi m_p kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \\ N_c &= \frac{2(2\pi m_n kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \\ \frac{N_v}{N_c} &= \left(\frac{m_p}{m_n} \right)^{\frac{3}{2}}\end{aligned}$$

$$\mu_i = -\frac{E_g}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right)^{\frac{3}{2}} = -\frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \cdot \ln \frac{m_p}{m_n} \quad (3.14.)$$

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

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot e^{-E_g / (2kT)} = \frac{2(2\pi \sqrt{m_n m_p} \cdot kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-E_g / (2kT)} \quad (3.15.)$$

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

IV BÖLÜM. KINETIKI HADYSALAR.

1. Elektrik meýdanynda erkin zarýadlaryň dreýfi. Erkin zarýadlaryň hereket edijiligi (podwizhnost).

Daşky elektrik meýdanynyň täsiri esasynda, erkin zarýadlaryň urukdyrylan hereketiniň ýüze çykmaklygyna – dreýf diýilýär. Daşky elektrik meýdany erkin zarýadlara tizlenme berip, bu tizlenmäniň ugry deşikler üçin daşky meýdanyň ugryna urukdyrylandyr, emma elektronlar üçin ters ugra urukdyrylandyr.

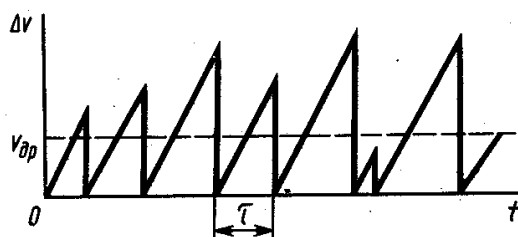
Eger güýjenmesi E bolan elektrik meýdany effektiw massasy m^* zarýady e bolan bölejige täsir etse, onda ol şeýle tizlenme bilen hereket eder:

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

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

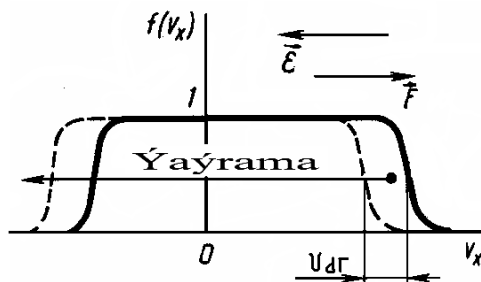
$$v_{dr} = \frac{a \langle \tau \rangle}{2} = \frac{1}{2} * \frac{e}{m^*} \langle \tau \rangle E. \quad (4.2)$$

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



4.1. Surat. Dreýf tizliginiň hasaplanylşyna düşündiriş.

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



4.2. Surat. Daşky elektrik meýdanynda elektronlaryň tizligi boýunça 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_0 - meýdanyň aýrulan 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 çözüdi esasynda alýarys:

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

(4.2) we (4.3) deňlemelere seretseň relaksasiýa wagtyňyň t_{rel} we erkin hereket wagtyňyň $\langle \tau \rangle$ 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.

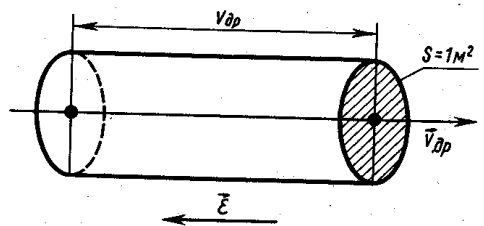
$$u = \frac{|v_{dr}|}{E} = \frac{e}{m^*} \tau_{rel} \quad (4.4)$$

Zarýadyň podwižnosti m^2/Vs ýa-da cm^2/Vs birliklerde ölçelinýär.

2. Udel elektrik geçirijiligi. Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi.

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

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



4.3. Surat. Togyň dykzlygynyň aňlatmasynyň çykarylyşyna degişli çyzgy.

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

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

Onda

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

Deşikler üçin

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

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

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

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

Ýarymgeçirijileriň elektrik geçirijiligi.

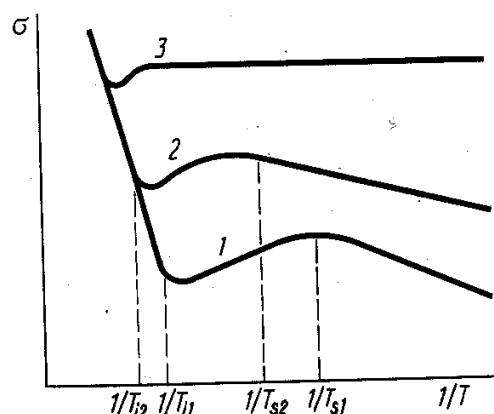
Umumy görnüşde ýarymgeçirijileriň udel elektrik geçirijiligi elektronlaryň (n) we deşikleriň (p) konsentrasiýasy bilen kesgitlenilýär:

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

Emma has kiçi temperaturalarda, ýarymgeçirijilerde, esasy zaryadlaryň konsentrasiýasy, esasy däl zaryadlaryň konsentrasiýasyndan has köpdür. Şol sebäpli hem (4.9.) deňlikdäki goşuljylaryň biri galdyrylyp ýazylýar, meselem, n -gönüşli ýarymgeçirijiler üçin erkin elektronlara degişli goşulyjy galýar:

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

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



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

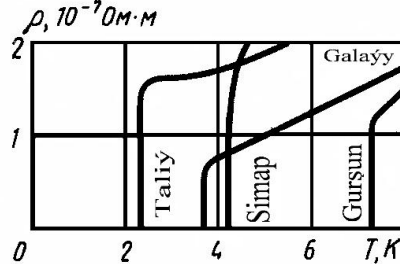
Pes temperaturalarda $\ln \sigma = f(1/T)$ baglylygyň a böleginde udel elektrik geçirijilik ýagny erkin zaryadlaryň artmasy donorlaryň ýa-da akseptorlaryň hasabyna artýar. Baglansygyň b bölegi garyndylaryň erkin zaryadlary berip bilijilik ukýbynyň gutarandygyny aňlagýar. Baglylygyň üçünji bölegi c hususy geçirijilige, ýagny walent we geçiş zonalaryň arasyndaky zonaara geçişiniň hasabyna ýüze çykýar.

Ýarymgeçiriji näçe ýokary derejede garyndyly bolsa, şançada udel elektrik geçirijiligi ýokary bolup, a , b , c , bölekleriň arasyndaky çäkler umumyлаşyp başlaýar.

Aşageçirijilik hadysasy.

1911 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 (скачком) 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 çykarylady. Jisimleriň aşageçirijilik ýagdaýa geçýän temperaturasy, kritiki temperatura diýilip, dürli jisimler üçin 0-20K aralykda ýerleşýär. 1990-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 ýyllarda Türkmenistanyň Ylymlar akademiýasynyň Fizika-tehnika institutynda hem birnäçe ylmy işler ýerine ýetirildi. Meselem YBaCuO₇ we BiSrCoCuO₇ birleşmeleri köp dürli garyndy garylyp alyndy (Pb, Sb, Li, K, Na). Bu keramiki materiallar ulgamynda aşageçirijilik 88-112K aralykda ýüze cykarylady. Olaryň alnyş tehnologiýasy we esasy fiziki häsiýetleri öwrenildi.

Umuman aýdanynda 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 diamagnetizmdir. Bu häsiýet 1933 ýylda Meýsner we Oksenfeld tarapyndan açyldy. Bu häsiýetiň düýp mazmuny şundan durýar. 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 doňdurýlar.

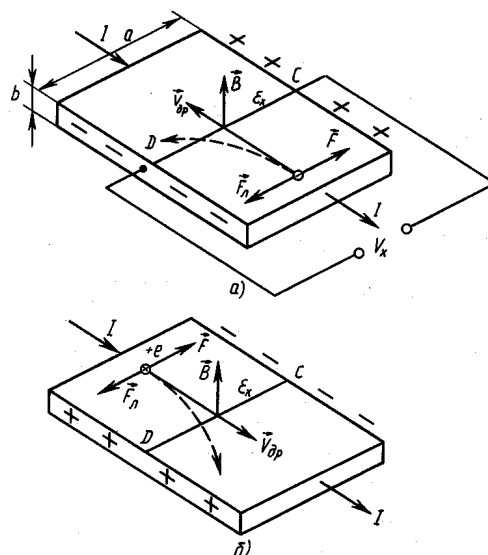
Şeýlelikde aşageçirijiligiň mazmuny şeýle zatdan, ýagny bir-birine bagly bolmadyk iki sany fundamental häsiýetiň ýüze çykmagydyr: ideal geçirijilik we ideal diamagnetizmdir.

3. Galwanomagnet efektleri. Holluň effekti. Ettingsgauzeniň effekti. Termomagnet efektleri.

Holluň effekti.

Haçanda geçiriji plastinkadan tok goýberilip, daşky magnit meýdanyna perpendikulýar ýerleşdirilse, onda hereketdäki zarýadlar bilen magnit meýdanynyň täsiri esasynda, geçiriji plastinkanyň gapdal üstünde potentsiallaryň 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 potentsiallaryň tapawudy nola deňdir. Haçan-da tok geçýän nusga (plastinka) magnit meýdanyna ýerleşdirilse we magnit meýdanynyň induksiýasy B toguň ugruna perpendikulýar bolsa, onda C we D nokatlaryň arasynda U_H potentsiallaryň 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 görkeziji ýaly, U_H gaty uly bolmadyk magnit meýdanynyň induksiýasyna B , tok güýjüne I göni proporsional we geçiriji plastinkanyň galyňlygyna ters proporsionaldyr (b).

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

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

Bu ýerde i – ýarymgeçiriji nusgadaky toguň dyklyzlygy; a - nusganyň ini; Proporsionallyk koefisiýenti 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.

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

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

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

Lorensiň güýjüniň täsiri esasynda elektronlar plastinkanyň daşky gapdal üstüne gyşarar we bu üst otrisatel zarýadlanr. 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 ugra täsir eder. Eger $F = F_L$ bolsa onda zarýadlaryň garşylykly üstlere toplanmagy tamamlanýar. Deňagramlyk şerti esasynda

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

bu ýerden

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

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

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

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

Bu ýerde Holluň hemişeligi

$$\begin{aligned} R_H &= - 1/(en) \\ R_H &= 1/(ep) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Haçan-da biz E_H -yň bahasyny tapanymyzda (4.13) elektronyň diňe ugrukdyrylan hereketiniň tizligini, ýagny V_{dr} göz önünde 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 dreyf tizliginiň onuň ýerleşen zonasyna baglylygyny we başga birnäçe fiziki häsiýetnamalary göz önünde tutup, takyk hasaplamalar geçirilse, onda Holluň hemişeligini şeýle görnüşde ýazmak bolýar.

$$R_H = A / (en) \quad (4.18)$$

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 kesgitlep bolýar. Onda Holluň hemişeligi

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

p-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin we

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

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.

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

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

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

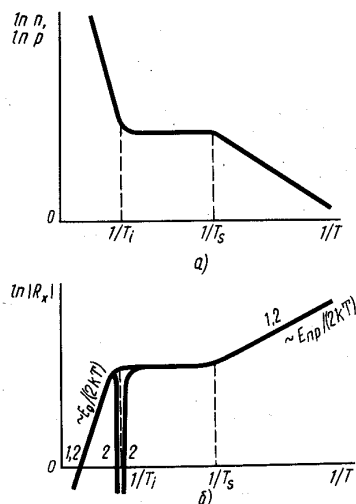
Holluň hemişeligini (R_H) udel elektrik geçirijilige ($\sigma = en u_n$) köpeldip, gatnaşygy alýarys:

$$\begin{aligned} R_H \sigma &= A e u_n / en ; \\ R_H \sigma &= A u_n \end{aligned} \quad (4.22)$$

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

$$u_n = R_H \sigma / A$$

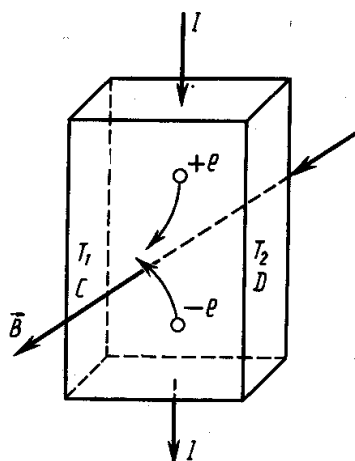
Soňky ýyllarda Holluň effekte esasanan datçikler gaty köp ýerlerde tehnikada, radioelektronikada, magnit meýdanyny ölçemek bilen baglanyşykly gurallary işläp düzmeklikde we taýýarlamakda giňden ulanylýar.



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.

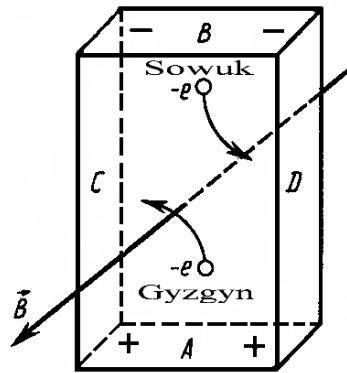
Öňki seredip geçişimiz ýaly, şeýle ýarymgeçirijilerde elektronlar we deşikler magnit meýdany tarapyndan şol bir ugra gysardylýar. Şol sebäpli hem kristalyň bir gapdal üstünde elektronlaryň we deşikleriň sany deňagramlyk ýagdaýyndan artykmaç bolup rekombinasiýa prosesi ýylylyk generirlenme prosesinden 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.

$$T_1 - T_2 = \Delta T$$

Termomagnit efektleri.

Temperatura gradiýentli geçirijilere magnit meýdanynyň täsiri esasynda ýüze çykýan effektlere termomagnit efektleri 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 zaryadlaryň haotiki hereketiniň ortaça tizligi hem ýokarydyr (termodiffuziýa). Erkin zaryadlaryň gyzgyn tarapdan sowuk tarapa akyp geçmegi, nusgaň 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 zaryad geçirijileriniň dreýfini ýüze çykarýar. Emma şeýle-de bolsa nusganyň gyzgyn tarapyndan sowuk tarapyna hereket edýän tokly zaryadlaryň ortaça tizligi ýokarydyr. Şol sebäpli hem gyzgyn üstden sowuk üste hereket edýän zaryadlar 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 gradiýent temperaturaly nusga, magnit meýdany täsir edende başga-da köp sanly efektler ýüze çykýar.

V BÖLÜM. ÝARYMGEÇIRIJILERDE DEŇAGRAMLYKDAKY DÄL ZARÝADLAR.

1. Deňagramlykdaky we deňagramlykdaky däl zarýadlar. Ferminiň kwaziderejeleri.

Deňagramlykdaky däl zarýadlar hakynda düşünje.

Ýarymgeçirijilerde, OK 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 prosesiň başlanmagy bilen bir wagtda rekombinasiýa prosesi hem başlanýar we generirlenen elektronlar öňki ýerlerine gelýärler. Bu iki prosesiň arasynda islendik temperaturada ýüze çykýan deňagramlyk zarýadlaryň konsentrasiýasynyň deňagramlygyna getirýär we şeýle zarýadlara deňagramlykdaky zarýadlar diýilýär.

Ýarymgeçirijilerde ýylylyk oýandymasyndan başgada ýagtylygyň we başga täsirleriň esasynda erkin zarýadlaryň oýandymasy 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:

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

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.

$$\begin{aligned} n &= N_e e^{\mu/(kT)} \\ p &= N_v e^{-(\mu+E_g)/(kT)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Deňagramlykda däl şertlerde elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy deňagramlykdaky ýagdaýdan tapawutlanýar:

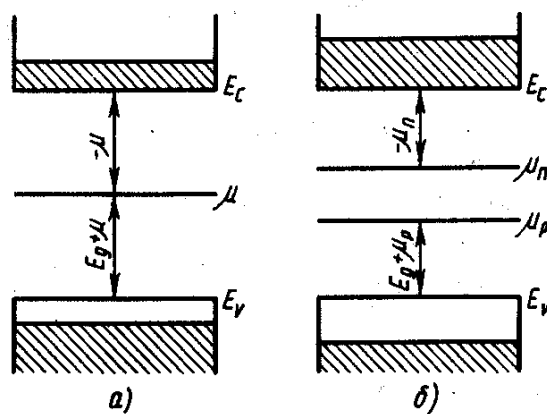
$$n = \Delta n + n_0 \quad p = \Delta p + p_0, \quad (5.3)$$

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 önünde tutup özgertmeli.

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

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

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

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, rekombinirlenýänça, 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

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

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

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

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

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 başgada zarýadlaryň ýaşaýyş wagty deňagramlykdaky däl zarýadlaryň üýtgemegi bilen üýtgeýär. Eger-de $\Delta n = \Delta p$ bolsa, (5.7) deňligi şeýle görnüşde ýazyp bolýar :

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

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

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

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 wagty τ diýip, zarýadlaryň rekombinasiýa tizligini tapalyň.

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

Minus alamat rekombinasiýa wagtynda zarýadlaryň konsentrasiýasynyň azalýandygyny görkezýär.

Ýagtylyk şöhlisiniň 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 alýars.

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

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

$$\Delta n = \Delta n_0 / e \quad \text{haçanda } t = \tau.$$

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

3. Zonara rekombinasiýa. Aýratyn derejeleriň üstünden rekombinasiýa.

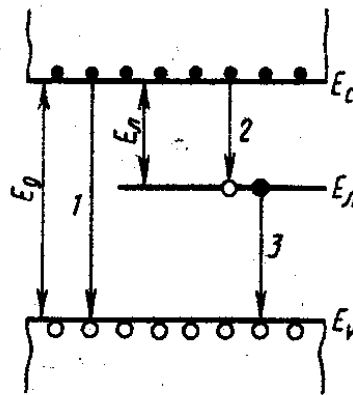
Termodinamiki deňagramlalyk ýagdaýynda zonara rekombinasiýanyň tizligi R_0 elektronlaryň (n_0) we deşikleriň (p_0) konsentrasiýasyna proporsionaldyr we generasiýa tizligine deňdir g_0

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

Bu ýerde proporsionallyk koefisiýenti

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

γ - ululyga rekombinasiýa koeffisiýenti diýilýär.



5.2. Surat. Ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynda zonara 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 ($g + g_0$) deň bolsa onda elektronlaryň $n = n_0 + \Delta n$ we deşikleriň $p = p_0 + \Delta p$ konsentrasiýasynyň durnukly ýagdaýy ýüze çykar.

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

Şu deňlige γ -nyň bahasyny goýup alarys

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

Ýarymgeçirijide goşmaça elektronlary we deşikleri oýandyryan, daşky täsiriň uly bolmadyk ýagdaýynda, ýagny $\Delta n, \Delta p \ll (n_0 + p_0)$, hem-de $\Delta n = \Delta p$ we $n_0 p_0 = n_i^2$ bolýandygyny göz önünde tutup alýarys.

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

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

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

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

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

Has ýokary derejede oýandyрма bolan ýagdaýynda ýagny

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

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

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

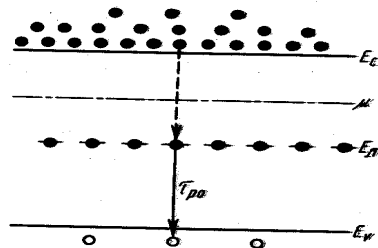
Ýagny, zaryadlaryň rekombinasiýa tizligi artykmaç, deňagramlykda bolmadyk zaryadlaryň konsentrasiýasynyň kwadratyna göni proporsionaldyr.

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

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

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

Şeýle aralyk ΔE_{ge} üsti bilen geçiş köplenç ýagdaýda göni geçiş zonasynan walent zona geçmekden ýokary ähtimallyga eýedir.



5.3. Surat. Ýokary n-geçirijiligi bolan ýarymgeçirijilerde, aýratyn saklap galyjy (lowuşek) derejeleriň üstünden, rekombinasiýanyň 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 effektiv 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 zaryadlar 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.

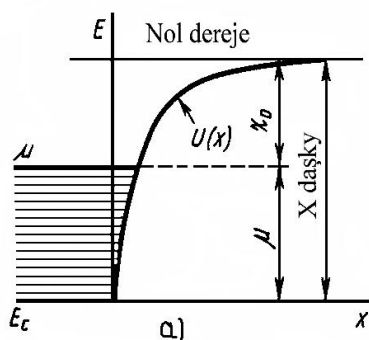
VI BÖLÜM. SEPLEŞME HADYSALARY. (KONTAKTNYÝE ÝAWLENIÝA).

1. Çykyş işi. Sepleşikdäki potentsiallaryň tapawudy.

Gaty jisimler elektronikasynda dürli materiallaryň sepindäki, ýagny metal-metal, metal-ýarymgeçiriji, metal-dielektrik seplerdäki bolup geçýän hadysalar gaty uly orun eýeleýär. Metal-metal sepleri priborlaryň, abzallaryň dürli ülüşleriň arasyny birleşdirmäge ulanylýar. Ýarymgeçiriji-ýarymgeçiriji, ýarymgeçiriji-metal sepleri birtaraplaýyn geçiriji priborlary we beýleki ýarymgeçiriji abzallary taýýarlamakda ulanylýar. Biz şu bölümde we ondan soňky bölümlerde şeýle priborlaryň işleýşine garap geçeris.

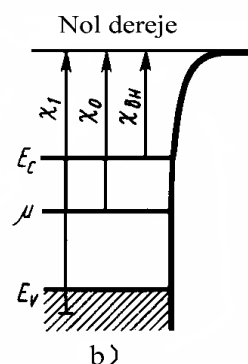
Çykyş işi.

Çykyş işi hakyndaky düşüňjäniň umumy fizika kursundan belli bolmagyna garamazdan, onuň metallar üçin we ýarymgeçirijiler üçin käbir aýratynlygyna seredip geçeliň. Köplenç ýagdaýda amaly meselelere seretmeklik üçin daşky çykyş işini ýa-da elektron srodstwasyny, ýagny geçiş zonanyň düýbünden başlap wakuum derejesine çenli potensial päsgeçiligiň ululygyny bilmeklik ýeterlikdir (χ_{es}). Eger potensial päsgeçiligiň beýikligi Ferminiň derejesinden hasaplanylsa onda oňa termodinamiki çykyş işi diýilýär (χ_0) (6.1 surat).



6.1a.Surat. Elektronyň metaldan çykyşy.

Elektronyň metalyň üstünden uzaklaşmagy bilen onuň potensial energiýasynyň $U(x)$ üýtgeýşi.



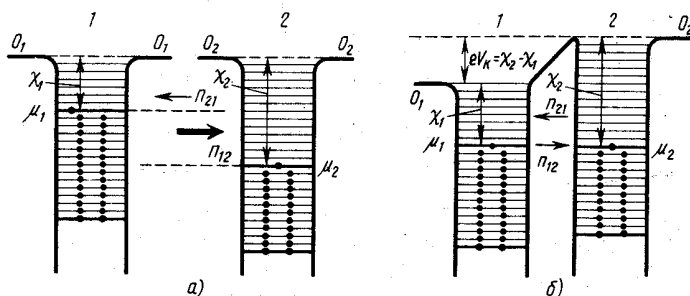
6.1b.Surat. Ýarymgeçirijiden elektronyň

çykyşy: χ_0 – termodinamiki çykyş işi; χ_{es} – daşky çykyş işi; χ_1 – walent zonanyň içinden çykyş işi.

Sepleşikdäki potentsiallaryň tapawudy.

İki sany dürli metalyň bir-birine golaýlaşdyrylandaky we sepleşendäki bolup geçýän hadysalara seredip geçeliň. Bu geçirijileriň sepleşen ýeri ýok wagty elektron himiki potentsiallaryň ululygy μ_1 we μ_2 , hem-de χ_1 we χ_2 çykyş işi bilen häsiýetlendirilýär.

Birinji we ikinji geçirijini aralarynda elektronlaryň effektiw alyş-çalyşy bolar ýaly ýakynlaşdyralyň (6.2b-nji surat)



6.2. surat. Iki sany metalyň arasynda sepleşikde potentsiallaryň tapawudynyň ýüze çykyşy.

İkinji suratdan görnüşi ýaly ikinji geçirijiden birinji geçirijä elektronlar geçip bilmeýär, sebäbi ikinji geçirijiniň geçiş zonasynyň garşysynda gabat duran birinji geçirijidäki derejeleriň hemmesi elektronlar bilen doldyr. Emma birinji geçiriji üçin üýtgeşik ýagdaý ýüze çykýar. Onuň hem geçiş zonasy birinji geçirijiniňki ýaly Ferminiň derejesine çenli elektronlar bilen doludyr. Ýöne birinji geçirijiniň ikinji geçirijä seredende çykyş işiniň kiçiligi sebäpli ($\chi_1 < \chi_2$), birinji geçirijiniň elektronlar bilen doly derejeleriniň garşysynda ikinji geçirijiniň boş derejeleri ýerleşýär. Şol sebäpli hem geçirijiler bir-birine galtaşandan soň birinji geçirijiden ikinji geçirijä geçýän elektronlaryň sany artar. ($n_{12} > n_{21}$)

Haçanda elektronlaryň geçmegi sebäpli, birinji geçirijide Ferminiň derejesi peselip, şol bir wagtyň özünde ikinji geçirijide Ferminiň derejesi ýokary galyp, özara deňleşseler, onda iki geçirijide hem elektronlar bilen birmeňzeş doldurylan derejeler ýerleşerler.

Geçirijileriň arasynda deňagramlyk ýüze çykyp, deňagramlylygy emele getirýän potensiallaryň tapawudy dörär.

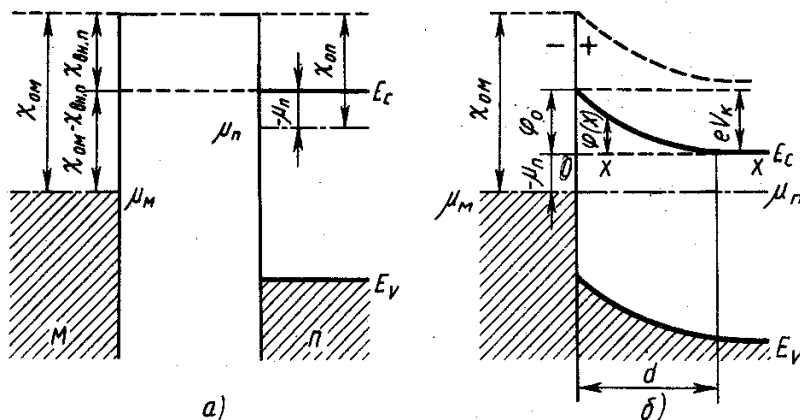
$$U_k = 1/e (\chi_1 - \chi_2) \quad (6.1)$$

Bu ýüze çykan potensiallaryň tapawudyna - seplesik (kontaktnýý) potensiallaryň tapawudy diýilýär.

2. Ýarymgeçiriji bilen metalyň arasyndaky seplesik.

Goý çykyş işi χ_{om} bolan metal, çykyş işi χ_{op} bolan ýarymgeçiriji bilen seplesdirilsin (6.3-nji surat). Eger $\chi_{om} > \chi_{op}$ bolsa onda elektronlar ýarymgeçirijiden metala Ferminiň derejeleriniň, ýagny μ_m we μ_p arasynda deňlik ýüze çykýança geçýär. Elektronlaryň ýarymgeçirijiden metala geçmegi sebäpli olaryň ikisiniň seplesiginde potensiallaryň tapawudy ýüze çykýar (u_k).

Ýarymgeçirijide erkin elektronlaryň konsentrasiýasynyň metallaryňka seredeninde örän kiçidigi sebäpli, ýarymgeçirijiniň serhet gatlagyndan belli bir uzaklykdan (çuňlukdan) elektronlar metalyň diňe üstki gatlagyna geçerler. Şeýlelikde, ýarymgeçirijide seplesikde potensiallaryň tapawudy ýüze çykar. Metal bilen ýarymgeçirijiniň araçägindäki gatlakda ionlaşan atomlar, hereketsiz položitel göwrüm zarýadyny emele getirýär. Bu gatlakda erkin elektronyň ýoklugy sebäpli bu gatlak, göwrüm zarýadynyň gatlagy ýa-da garyplaşdyrylan gatlak diýilip atlandyrylýar. Ýarymgeçirijiniň birleşdirilen gatlagy bilen metalyň seplesigi örän uly garşylyga eýe bolup, geçişde emele gelen päsgelçilik gatlagy diýilýär.



6.3.Surat. Metal-ýarymgeçiriji sepeniň shematiki görnüşi.

Seplesikde metal bilen ýarymgeçirijiniň arasynda ýüze çykýan potensiallaryň tapawudy u_k ýarymgeçirijide elektrona garyplaşan gatlagyň bütün dowamynda emele gelýär. Eger-de gözenegiň hemişeligini ≈ 0.5 nm, elektronyň ýitiren atom gatlagyň sanyny $\approx 10^3$ diýip kabul etsek, onda bu gatlagyň galyňlygy $d = 0,5 \cdot 10^3 \text{ nm} = 5 \cdot 10^2 \text{ nm} = 0.5 \text{ mkm} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

Eger $U_k = 1 \text{ W}$ bolsa, onda göwrüm zarýadynyň elektrik meýdany.

$$E_k \approx U_k/d \approx 2 \cdot 10^6 \text{ W/m}.$$

$$E_k \approx 2 \text{ W/mkm.}$$

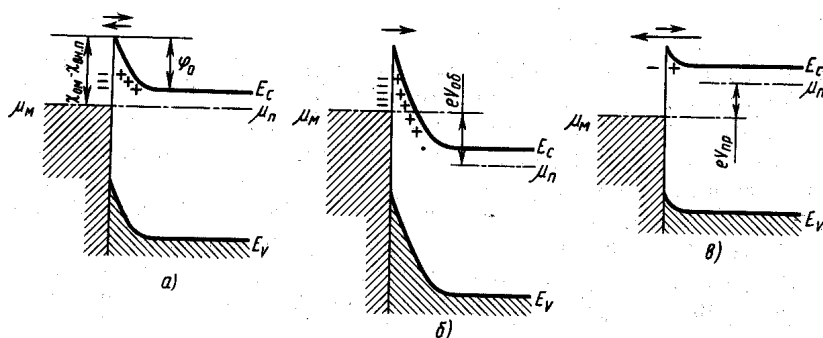
Bu bolsa kristalyň içki meýdanyndan üç dereje töweregi kiçi bolup, ýarymgeçirijiniň energetiki spektrinde özgerişlige getirmeýär.

3. Ýarymgeçiriji bilen metalyň seplesiginde göneldiş.

Metal bilen ýarymgeçirijiniň seplesiginde ýüze çykyan päsgelçiligiň in ajaýyp häsiýeti ol hem, onuň garşylygynyň daşky potensiallaryň tapawudynyň ugruna baglylygydyr.

Bu baglylyk gaty güýçli bolup, metal ýarymgeçiriji geçişde birtaraplaýyn geçirijiligi ýüze çykarýar. Metal ýarymgeçiriji geçişin göneldiji häsiýeti birtaraplaýyn geçirijilik bilen düşündirilýär.

Bu häsiýeti zona gurluşynyň esasynda seredip geçeliň. 6.4a suratda n-görnüşli ýarymgeçiriji bilen metalyň arasyndaky seplesigiň zona gurluşy deňagramlyk ýagdaýynda görkezilen:



6.4. Surat. Metal ýarymgeçiriji göneldiji sepiniň energetiki diagrammasy: deňagramlyk ýagdaýynda (a), daşky elektrik meýdany ters ugra U_t (b) we göni ugra U_g (d) birleşdirilende; elektronlaryň akymy görkezijiler bilen aňladylan.

Metaldan ýarymgeçirijä geçýän elektronlar üçin potensial päsgelçilik $\chi_{om} - \chi_{bn}$ deň ýarymgeçirijiden metala geçýän elektronlar üçin $\phi_0 = eU_k$.

Deňagramlyk ýagdaýynda iki tarapa geçýän elektronlaryň jemi nola deň.

Indi ýarymgeçirijä we metala daşky potensiallaryň tapawudyny (U_k) täsir etdireliň, ýagny ýarymgeçiriji metala görä položitel zaryadlansyn; şeýle ugra ters ugur diýilýär. Ters potensiallaryň tapawudy otrisatel diýilip kabul edilen. Suratdan (6.4b) görnüşi ýaly, daşky potensiallaryň tapawudy ýarymgeçirijiden metala geçýän elektronlar üçin potensial päsgelçiligi ýokarlandyrýar

$$\phi(0) = \phi_0 - eU_d. \quad (v < 0) \quad (6.2)$$

Haçanda ýarymgeçiriji metal seplesige göni ugra daşky meýdan täsir edýän bolsa (6.4c surat) ýarymgeçiriji otrisatel zaryadlansa, onda ýarymgeçirijiniň hemme derejeleri (E_c , E_v), hem-de Fermiň derejesi μ daşky meýdanyň eU ululygyna ýokary galar. Şeýlelikde ýarymgeçirijiden metala geçýän elektron üçin päsgelçilik eU ululyga kiçeler.

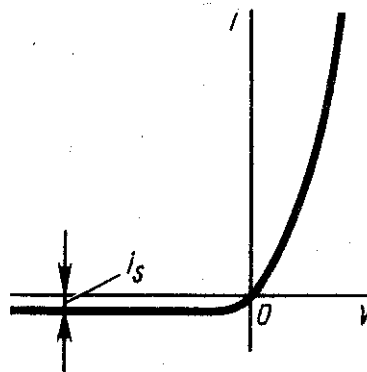
$$\phi(0) = \phi_0 - eU_d. \quad (\text{haçanda } u > 0) \quad (6.3)$$

Metal ýarymgeçiriji geçişden geçýän umumy tok şeýle formula bilen kesgitlenýär.

$$J = J_s (\exp(eU/kT) - 1) \quad (6.4)$$

Bu ýerde haçan-da göni geçiş bolanda ($U > 0$), onuň tersine ters geçişde ($U < 0$).

(6.4) formula ýarymgeçiriji-metal göneldiji seplesigiň wolt-ampere häsiýetnamasynyň umumy gönüşdäki deňlemesidir.



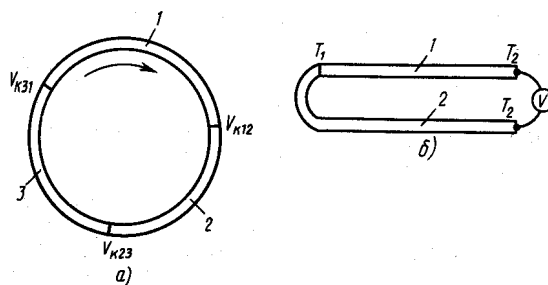
6.5-nji surat. Şottki diýodynyň wolt-amper häsiýetnamasy.

Çyzgydan görnüşi ýaly metal-ýarymgeçiriji seplesik hakykatdan hem göneldiji häsiýete eýedir; Ol göni ugra tok geçirip, ters ugra tok hiç geçirmeýär diýen ýalydyr. Şol bir daşky potensiallaryň tapawudynyň ululygynda diodyň üstünden akýan göni we ters toklaryň gatnaşygyna, göneldiş koýeffisiýenti diýilýär. Gowy göneldiji seplesikler üçin bu ululyk $10^4 - 10^6$ ýetýär. Köplenç halda metal bilen ýarymgeçirijiniň arasynda ýüze çykýan potensial päsgelçilige Şottkiniň barýeri päsgelçiligi diýilip at berilýär, şeýle päsgelçilik esasynda döredilen diodlara Şottkiniň diýody diýilýär.

4. Termo-e.h.g. Zeyebekiň effekti. Peltýeniň effekti.

Ýapyk zynjyryň hemme ülüşleri şol bir temperaturada bolsa, onda seplesikde ýüze çykýan elektrigi hereketlendiriji güýçler bu zynjyrdan elektrik toguny ýüze çykarmaýar.

Mysal üçin üç sany dürli jisimlerden duran ýapyk zynjyry seredeliň (6.6. - surat). Položitel diýip , sagat strelkasynyň ügruna zynjyrdan togy ýüze çykaryň ugra aýdalyň. Seredilýan materiallaryň termodinamiki çykyş işini degişlilikde χ_{01} , χ_{02} we χ_{03} diýip belläliň.



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

Onda
$$eU_{k12} = \chi_{01} - \chi_{02}$$

$$eU_{k23} = \chi_{02} - \chi_{03} \quad (6.5)$$

$$eU_{k31} = \chi_{03} - \chi_{01}$$

Eger (6.5) deňlikleriniň sag we çep taraplaryny jemläp seretseň, onda seplesikde ýüze çykýan e.h.g. jemi nola deň bolar. Indi, mysal üçin 1-2 seplesiğiň temperaturasyny üýtgedeliň. Ferminiň derejesinin hem-de termodinamiki çykyş işiniň temperatura baglylygy sebäpli, U_{k12} hem üýtgeýär. Beýleki ikisi (U_{k23} we U_{k31}) üýtgemän galar. Şeýlelikde U_k potensiallaryň jemi nola deň bolman,

netijileýji potensiallaryň tapawudy $U_{T-e.h.g.}$ ýüze çykýar. Oňa termoelektro hereketlendiriji güýç diýilýär.

Termo-e.h.g. ýüze çykmagynyň esasy sebäbi diňe bir temperaturanyň üýtgemegi bilen seplesikdäki potensiallaryň tapawudynyň ýüze çykmaklygy bolman, geçirijiniň ugruna temperaturanyň üýtgesiniň barlygy sebäpli erkin zarýadlaryň diffuziýasynyň we termodiffuziýasynyň ýüze çykmaklygydyr. Indi iň ýönekeý zynjyryň mysalynda, ýagny bir tarapy birleşdirilen dürli materiallardan taýýarlanylýan iki geçirijä seredeliň. Geçirijileriň seplesmedik uçlaryna woltmetri birleşdireliň (6.6b surat). Bu effektden başga goşmaça ýüze çykýan effektləri hasaba almazdan seredeliň.

Teoretiki analizlerden görünişi ýaly, haçanda bir seplesigiň temperaturasy T_2 beýleki seplesikleriň temperaturalaryndan T_1 tapawutlanýan bolsa, onda termo-e.h.g.

$$U_{T-e.h.g.} = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_2 - T_1) \quad (6.6)$$

Bu ýerde α_1 we α_2 koeffisiýentler 1-nji we 2-nji materiallaryň häsiýetnamalaryna baglydyr. Olar differensial termo-e.h.g. diýilip atlandyrylýar. Wýrožden däl n-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin, ýagny elektronlaryň konsentrasiýasy aşa uly bolmadyk ýarymgeçirijiler üçin:

$$\alpha_n = -k/e \cdot (r + 2 - \mu/kT), \quad (6.7)$$

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

$$\lambda \sim E^r \quad (6.8)$$

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

Wýrožden däl p - tip ýarymgeçiriji üçin

$$\alpha_p = k/e \cdot (r + 2 - \mu^p/kT), \quad (6.9)$$

bu ýerde μ^p - ferminiň derejesinden walent zonanyň depisine çenli aralyk.

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

$$\alpha_{n,p} = (\alpha_n U_n n + \alpha_p U_p p) / (n U_n + p U_p) \quad (6.10)$$

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

$$\alpha_i = (\alpha_n U_n + \alpha_p U_p) / (U_n + U_p). \quad (6.11)$$

Termoelektrik effekti praktikada, ýagny dürli amaly meseleleri çözmekde, 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 elektrik energiýasyna öwürüşiniň 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 ymtylýňar. Şol sebäpli hem pes ýylylyk geçirijilikli ýarymgeçirijini peýdalanmak amatly bolup durýar, emma şeýle ýarymgeçirijileriň udel elektrik geçirijiligi hem 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 agzalan ululyklaryň belli bir amatly bahalary bar.

Termoelektrik effekti termojübütleriň kömegi bilen temperaturany uly diapazonda, ýagny $2 \div 1500\text{K}$ aralykda takyk ölçemeklik üçin hem giňden ulanylýar.

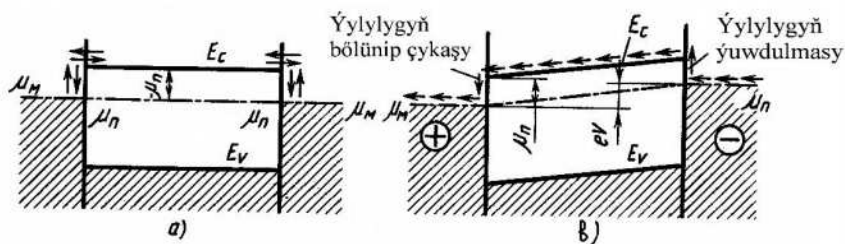
Peltýeniň effekti.

Haçanda iki sany dürli materialyň seplesiğinden elektrik togy geçende joul ýylylygyndan başga-da şepleşikde goşmaça ýylylyk bölünip çykýar, ýa-da ýuwdulýar. Bu effekte - Peltýeniň effekti diýilýär. Bölünip çykýan, ýuwdulýan ýylylygyň mukdary Q_p seplesiğden geçýän zaryadyň ululygyna $I t$ göni proporsionaldyr.

$$Q_p = \pm \Pi \cdot I \cdot t \quad (6.12)$$

Proporsionallyk koeffisiýenti Π - Peltýeniň koeffesiýenti diýilýär.

Bu effektiň tabigatyna metal bilen ýarymgeçirijiniň mysalynda seredip geçeliň (6.7. surat). Ýönekeýlik üçin bu iki materialyň (metalyň we ýarymgeçirijiniň) seplesiğini neýtral diýip alalyň. Şeýle seplesiğde zaryadlara baýlaşdyrylan ýa-da garyplaşdyrylan gatlak bolmaýar hem-de zonalaryň egremi ýok. 6.7. suratda metal bilen n-ýarymgeçirijiniň aralygyndaky neýtral seplesiğiň energetiki diagrammasy görkezilen.



6.7. Surat. Peltýeniň effektiniň düşündirilişi.

- m-ý-m - zynjyryň energetiki diagrammasy.
- Bu zynjyr elektrik togy göýberilen ýagdaýynda.

Deňagramlyk ýagdaýynda metal üçin hem-de ýarymgeçiriji üçin Fermiň derejesi birmenzeş beýiklikde durýar, emma ýarymgeçirijiniň geçiş zonasynyň düýbi metalyň Fermi derejesinden $-\mu_n$ ululyk ýokarda ýerleşendir. Şeýlelikde metaldan ýarymgeçirijä geçýän elektronlar üçin beýikligi $-\mu_n$ bolan potensial päsgelçilik bardyr.

Şeýle seplesiğe daşky potensiallaryň tapawudyny birleşdireliň. Ýarymgeçirijide daşky potensialyň täsiri esasynda (täsir edýän naprýaženiýäniň aglabasy ýarymgeçirijide çökýär) çep seplesiğden saga tarap Fermiň derejesi ýuwaş-ýuwaşdan eU ululyga ýokary galýar. Metal ýarymgeçiriji gurluşda çepden saga urukdyrylan tok ýüze çykýar, elektronlaryň hereketli ters ugra sagdan çepde urukdyrylandyr. Suratdan görünişi ýaly, çep seplesiğde ýarymgeçirijiden metala geçýän elektronlaryň energiýasy, ýarymgeçirijide metaldakydan $-\mu_n + \langle E_n \rangle$ ululyga artykdyr. Bu ýerde $-\mu_n$ - elektronyň ýarymgeçirijiden metala geçendäki, aşak gaçýan potensial päsgelçiliginiň beýikligi; $\langle E_n \rangle$ - ýarymgeçirijide tokuň ýüze çykmagyna gatnaşýan elektronlaryň ortaça energiýasy. Elektronlaryň konsentrassiyasy ýokary bolmadyk n - görnüşli ýarymgeçiriji üçin, hasaplamalar esasynda $\langle E_n \rangle$ tapýarys.

$$\langle E_n \rangle = (r + 2) kT, \quad (6.13)$$

$$\lambda \sim E^r$$

bu ýerde r - zaryadyň erkin ylgawynyň uzynlygynyň λ elektronyň energiýasyna baglanşygyny görkezýän formuladaky dereje görkeziji.

Ýokarda seredilip geçilişi ýaly, çep seplesikde ýarymgeçirijiden metala geçýän her elektron, ΔE artyk energiýny alyp geçýär.

$$\Delta E = -\mu_n + (r + 2) kT, \quad (6.14)$$

ΔE - energiýa bu seplesikde goşmaça ýylylyk görnüşinde bölünip çykýar. Bu bölünip çykýan ýylylyga bolsa - Peltýeniň ýylylygy diýilýär. (6.14) - nji deňligi elektronyň zarýadyna (e) bölüp Peltýeniň koeffisiýentini alarys

$$|\Pi| = k/e (r + 2 + \mu_n/kT) T \quad (6.15).$$

Sag seplesikde elektron, metaldan ýarymgeçirijä geçende, $-\mu_n$ potensial päsgelçiligi ýeňip geçýär. Ondan başgada metaldan geçen elektron ýarymgeçirijidäki elektronlar bilen deňagramlygy saklamak üçin energiýasyny ýene-de $\langle E_n \rangle$ ululyga artdyrýar. Bu energiýalaryn baryny elektron, sag seplesikden kristallik gözenekden alyp gaýdyp ony sowadýar.

Metal-ýarymgeçiriji seplesikden tok geçende onuň sowamak hadysasy gaty wajypdyr, sebäbi bu hadysa termoelektrik holodilniklerini, radioappaturalaryň gyzyp işleýän böleklerini sowadygy holodilnikleri hem-de mikroholodilnikleri taýýarlamaga mümkinçilik berýar.

Şeýle sowadyjy we ýyladyjy abzallaryň artykmaçlygy, olarda toguň ugruny üýtgetmeklik bilen, sowadyjynyň deregine ýyladyjy ýa-da tersine özgertmeklik mümkin.

VII BÖLÜM. ÝARYMGEÇIRIJI DIODLAR.

Elektrik signalyny göni däl öwürme üçin niýetlenen ýarymgeçiriji diodlar gaty jisim elektronikasynyň iň bir giňden peýdalynýan priborydyr. Şeýle diodlara, goneldiji diodlar, ýagtylyk şöhesini duýujy we göýberiji diodlar (fotopriýomnikler we swetodiodlar) girýär. Diodlaryň aglaba köpüsi iki sany dürli görnüşli, ýagny n- we p-görnüşli ýarymgeçirijileriň seplesiginiň ajaýyp häsiýetini ulanylyp işlenip düzülýär we taýýarlanylýar. Şeýle sepeşikde ýüze çykýan geçişe p-n geçiş, ýa-da elektron - deşikli geçiş diýilýär. P-n-diodlaryň alynysyna, gurluşyna we işleýiş prinsipine seredip geçeliň.

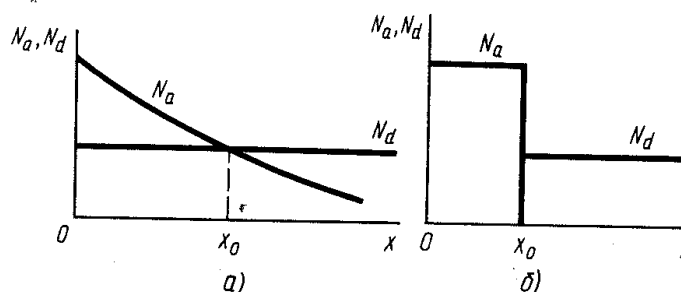
1. P-n-geçişiň alnyşy. Diffuziýa usuly. Epitaksiýa usuly.

P-n-geçişiň deňagramlyk ýagdaýy.

Ýarymgeçiriji diodlaryň tehnologiýasynda, dürli görnüşli geçirijilikli 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 gatlagy bilen örtülendir. Şol sebäpli ýarymgeçirijiniň içinde (üstki gatladan belli bir çuňlukda) p-n-geçiş almaklygyň tehnologiýasy işlenilip düzüldenden soň bu ugurda gaty uly öňegidişlikler gazanyldy.

Diffuziýa usuly.

Elektron-deşikli geçiş p-görnüşli ýarymgeçirijä donor garyndysyny ýa-da n-görnüşli 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. 7.1-nji suratda n-görnüşli ýarymgeçirijä akseptor garyndysy diffuziýa edilenden soňra donor we akseptor garyndylarynyň koordinata boýunça paýlanyşy görkezilen.



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

7.1-nji suratdan görnüşi ýaly ýarymgeçiriji plastinkanyň üstki gatlagynda, geçişin görnüşli akseptor garyndysy bilen kesgitlenilýär, bu ýerde $N_a > N_d$. Ýarymgeçiriji plastinkanyň üstünden uzaklaşdygyňça N_a azalyp, x_0 uzaklykda (çuňňurlykda) $N_a = N_d$ bolýar. Ýarymgeçiriji materialynyň göwrümünde şu tekizlikde hem p-n-geçiş emele gelýär. Bu tekizlikden uzaklaşdygyňça akseptor garyndylaryň konsentrasiýasy N_a kiçelýär we $N_a < N_d$ şert ýerine ýetýär. Şeýle geçişlere ýuwaş-ýuwaşdan «plawnyý» geçirijilikli p-n-geçiş diýilip at berilýär.

Epitaksiýa usuly.

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

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

7.1 - suratda p-görnüşli geçirijilikli ýarymgeçiriji esasyda alnan n - epitaksial gatlakly p-n - geçişde akseptor (N_a) we donor (N_d) garyndylaryň (ýagny elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasynyň) ideal görnüşdäki paýlanyşy birilen.

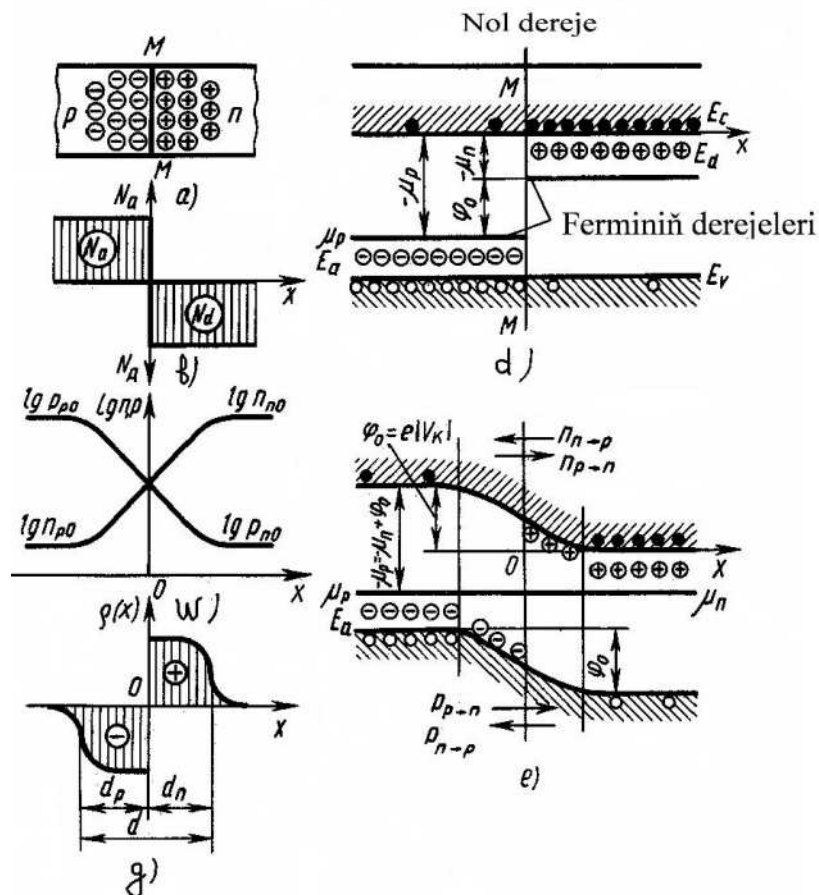
Garyndylaryň epitaksial gatlagyň ösüş ugryna şeýle görnüşde paýlanmasyna, ýagny iki görnüşli geçirijiligi bolan ýarymgeçirijileriň dik «rezkiý» araçäginiň bolmagyna - birbada «rezkiý» p-n- geçiş diýilýär. Hakykatda bolsa bu araçäk garyndylaryň özara diffuziýasy esasynda belli bir derejede ýaýraňnydyr.

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

P-n-geçişiň deňagramlykdaky ýagdaýy.

Goý MM' tekizlik dürli görnüşli geçirijiligi bolan iki sany ýarymgeçirijiniň içki araçägi bolsun (7.2 surat); çep tarapda - akseptorlaryň konsentrassiýasy N_a bolan p-görnüşli ýarymgeçiriji (p-germaniý); sag tarapda - donorlaryň konsentrassiýasy N_d bolan n-görnüşli ýarymgeçiriji (n-germaniý).

Ýönekeýlik üçin $N_a=N_d=10^{16} \text{ sm}^{-3}$. Suratdan görnüşü ýaly (7.2b surat), donorlaryň we akseptorlaryň konsentrasiýasy MM' tekizlikde (iki görnüşli ýarymgeçirijiniň araçäginde), 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.



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

Esasy zaryadlaryň 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 ($n_{n0} \sim N_d$), p-tarapdaky deşiklerin konsentrasiýasyny (p_{p0}) akseptor atomlarynyň konsentrasiýasyna deň diýip bolar ($p_{p0} \sim N_a$).

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

$$n_{n0} \cdot p_{n0} = p_{p0} \cdot n_{p0} = n_i^2, \quad (7.1)$$

bu ýerde n_i - hususy ýarymgeçirijidäki zaryad geçirijileriniň konsentrasiýasy.

Haçan-da $n_{n0} = p_{p0} = 10^{22} \text{ m}^{-3}$ we $n_i = 10^{19} \text{ m}^{-3}$ bolsa onda $p_{n0} = n_{p0} = 10^{16} \text{ m}^{-3}$ bolar.

Görşümüz ýaly, deşiklerin konsentrasiýasy p-bölekde we elektronlaryň konsentrasiýasy n-bölekde, esasy däl zaryadlaryň konsentrasiýasyndan alty dereje uludyr. Şeýle konsentrasiýanyň uly tapawudy elektronlaryň n-oblastdan p-oblasta, deşiklerin 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. Netijede n-oblastda, p-n-geçişiň araçäginin ýakynynda, erkin elektronlar ýok diýen ýalydyr, onda ionlaşan göwrüm zaryadlarynyň (ionlaşan donorlaryň göwrüm položitel zaryady emele gelýär) (7.2a surat).

Sepleşigiň ýakynynda p-oblastda deşik ýok diýen ýaly bolup, ionlaşan akseptorlaryň otrisatel göwrüm zaryady emele gelýär. 7.2d suratda geçişde emele gelen göwrüm zaryadlary görkezilendir. Hereketsiz göwrüm zaryatlary p-n-geçişde potentsiallaryň tapawudy U_k bolan, seplesik elektrik meýdanyny emele getirýar. Şol sebäpli hem seplesigiň meýdanyndan daşarda erkin zaryadlar haotiki hereket edýarler.

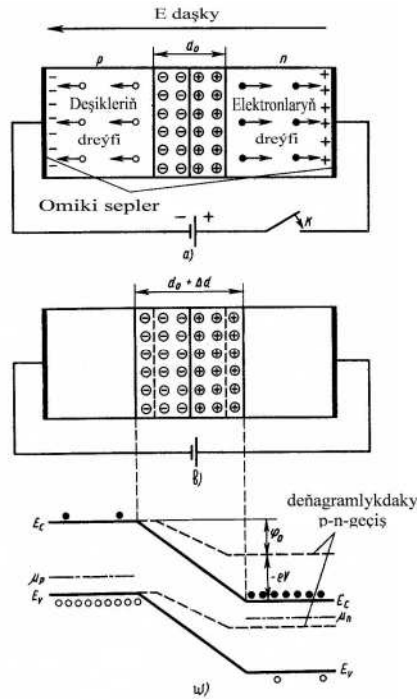
Şeýlelikde termodinamiki deňagramlaşyk ýagdaýynda p-n-geçişden bir-birine ululygy boýunça deň bolan elektronlar we deşikler n-tarapdan p-tarapa we tersine geçip bilerler. Beýle deňligi seplesikdäki potentsiallaryň tapawudy emele getirip, esasy zaryadlaryň akymyny esasy däl zaryadlaryňka çenli azaldýar.

2. Deňagramlykda däl p-n-geçiş. P-n-geçişiň päsgeçilik (barýer) sygymy.

Elektron-deşikli geçiş, dürli görnüşdäki ýarymgeçiriji priborlar üçin esasy bölup durýar. Konstruksiýasy boýunça iň ýönekeý ýarymgeçiriji pribora diod giýilip at berilýar. Diodyň n- we p-taraplaryna metal elektrodalarynyň kömegi bilen omiki sep emele getirilip üstünden tok göýberilýär. Ýarymgeçiriji bilen metalyň seplesiginiň omiki garlyşygy örän kiçi we göniçyzykly bolup, p-n-geçişiň garşylygyndan has azdyr.

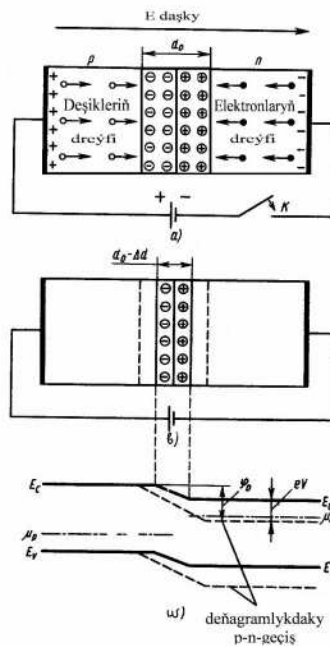
P-n- geçişi daşky meýdanyň täsiri esasynda seredip geçeliň. Haçanda daşky elektrik meýdanyň položitel polýusy (+) p-n-geçişiň n-tarapyna birikdirilse, hem-de minus (-) p-tarapyna birikdirilse şeýle ugra ters ugur giýilýär (7.3. Surat). P-n-geçişli ters ugra daşky elektrik meýdany (E_d) täsir etse, onda bu meýdan esasy zaryad geçirijileriniň strelka bilen görkezilen ugurlara dreýfini ýüze çykýar. Şeýlelikde n-oblastdaky elektronlaryň we p-oblastdaky deşiklerin aglabasy p-n-geçişden (p-n-geçişiň tekizliginden) yza çekilip, ionlaşan akseptorlar we donorlar üçin täze ýer açylýar we p-n-geçişiň göwrüm zaryadynyň giňligi $d_o + \Delta d$ ululyga giňelýär.

Elektronlaryň we deşiklerin omiki kontaktlara tarap akymy daşky goýulan e.h.g. doly kompensirlenýança dowam eder. Soňra umumy goýulan daşky napryaženiýanyň aglabasy p-n-geçişde çöker.



7.3. Surat. P-n-geçişdäki geçiş hadysalary, (a) deňagramlyk ýagdaýynda, (b,w) diod ters elektrik meýdanynda.

Ters ugra berlen daşky elektrik meýdanyna otirisatel ugur diýilip, şeýle meýdanyndaky wolt-ampere häsiýetnama - wolt-ampere häsiýetnamanyň ters şahasy diýilýär. Suratdan görünşi ýaly potensial päsgelçiligiň beýikligi daşky täsir edýän napryaženiýa baglylykda - eU ululyga artýar. Göni ugur boýunça daşky elektrik meýdany täsir edende (plýus - p-tarapa, minus - n-tarapa birleşdirilende) n- we p-oblastlardan elektronlaryň we deşikleriň p-n-geçişiň göwrüm zarýadlaryna tarap hereketi ýüze çykýar (7.4. Surat). Bu proses p-n-geçişdäki potensiallaryň tapawudy $U_k - U$ ululyga kemelýänçä dowam eder. Göwrüm zarýadynyň giňligi $d_0 - \Delta d$ ululyga çenli daralýar. Suratdan görünşi ýaly potensial päsgelçiligiň beýikligi göni ugra meýdanyň täsiri esasynda eU ululyga peselýär.



7.4. Surat. Diodaky geçiş hadysalary (a), deňagramlyk ýagdaýynda (b), göni ugra elektrik meýdany täsir edende.

Şeýlelikde, dioda daşky elektrik meýdany täsir edende, ilki bada iki sany dürli geçirijilikli ýarymgeçirijiniň araçäginde (p-n-geçişde) göwrüm zaryadynyň 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 zaryad) sygymy diýilýär, sebäbi ol p- we n-oblastlaryň aralygyndaky potensial barýeriň üýtgemegi bilen baglydyr. Barýer sygymynyň ululygy C_b :

$$C_b = \frac{dQ}{dU}, \quad (7.2)$$

bu ýerde dQ - p-n-geçişde zaryadyň üýtgemegi; dU - päsgelçilikde potenciallaryň tapawudynyň üýtgemesi. Çyzgydan (7.4. Surat) görünişi ýaly tekiz p-n-geçiş, tekiz kondensatora meňzeşdir. Şol sebäpli hem päsgelçilik sygymynyň bahasyny, tekiz kondensatoryň formulasyny ulanyp kesgitlemek mümkin.

$$C_b = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot s}{d} \quad (7.3)$$

bu ýerde s - p-n-geçişiň meýdany; ε - ýarymgeçirijiniň otnositel dielektrik syzyjylygy; d - p-n-geçişde emele gelyän göwrüm zaryadynyň gatlagynyň giňligi.

P-n-geçişiň päsgelçilik sygymynyň kondensatoryň sygymyndan tapawudy, ol hem göwrüm zaryadynyň giňliginiň (d), daşky elektrik meýdanynyň ululygyna we ugruna baglylygydyr.

$$d \approx \left[\frac{2\varepsilon \cdot \varepsilon_0 (\varphi_0 - eU)}{e^2 N_d} \right]^{1/2} \quad (7.4)$$

haçanda $N_a \gg N_d$ bolanda. Päsgelçilik sygymynyň bahasyny (C_b), (7.4) deňligi (7.3)-ä goýup alarys.

$$C_b = s \left[\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot e^2 N_d}{2(\varphi_0 - eU)} \right]^{1/2} \quad (7.5)$$

Bu formula p-n-geçiş örän dik (birtaba), p-n-geçiş örän ýuka bolan ýagdaýynda dogrudyr. Haçan-da p-n-geçiş ýaýraňňy (diffuziýa esasynda alnan) bolan ýagdaýda sygym şu formula bilen kesgitlenilýär:

$$C_b = s \left[\frac{(\varepsilon \cdot \varepsilon_0)^2 e^2 \cdot a}{12(\varphi_0 - eU)} \right]^{1/3}, \quad (7.6)$$

Bu ýerde a p-n-geçişde $N_a - N_d$ kompensirlenen garyndynyň çyzykly üýtgeýişini görkezýän aňlatmada proporsionallyk koeffisiýenti: $N_a - N_d = a(x_0 - x)$ (7.1a surat).

3. P-n-geçişde göni we ters toklar. P-n-geçişiň impuls we ýyglyk häsiýetleri.

Daşky elektrik meýdanynyň täsiri esasynda päsgelçilik sygymynyň zaryadlanmagynyň tamamlanmagy bilen, p-n-geçişden toguň geçmesi tamamlanmaýar, daşky meýdany täsiri esasynda p-n-geçişiň päsgelçilikinden bir taraplaýyn artykmaç tok geçmegini dowan etdirýär.

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

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (7.7)$$

bu ýerde D - diffyziýa koeffisiýenti, τ - erkin zaryadyň ýaşaýyş wagty

Hakikatda zaryadlar öz ýaşayş wagtynyň dowamynda, diffuziýa uzynlygy bolan L - den gaty köp aralyga ýetip bilýärler.

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

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

$$-I_s = -I_{ns} - I_{ps} = eS \left(\frac{n_{po}}{\tau_n} \cdot L_n + \frac{p_{no}}{\tau_p} L_p \right) = eS \left(\frac{n_{po} \sqrt{D_n}}{\sqrt{\tau_n}} + \frac{p_{no} \sqrt{D_p}}{\sqrt{\tau_p}} \right), \quad (7.8)$$

Bu ýerde S-p-n geçişiň meýdany. Togyň n-tarapdan p-tarapa akýandylygy sebäpli, ters toguň alamaty minusdyr. P-n-geçişiň meýdany tarapyndan ters tarapa geçirilen zaryad, bu tarapda esasy zaryadlara goşulyp, zaryadlaryň daşky elektrik zynjyryna geçmegi sebäpli, gaty çalt ýitýär.

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

Ýarymgeçirijide ýylylyk generasiýasy esasynda döreýän zaryadlaryň sany, haçan-da 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 edende-de üýtgemän galýar. Şol sebäpli hem deňagramlyk ýagdaýynda esasy däl zaryadlaryň togy, garşylyklaýyn esasy zaryadlaryň togy bilen kompensirlinýär we jemliýji tok

$$-I_s + I_s = 0 \quad (7.9)$$

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

Eger potensial päsgelçilige göni ugra U daşky meýdan goýulsa, onda potensial päsgelçiligiň ululygy $\phi_0 - eU$ ululyga çenli kiçelýär we esasy zaryadlaryň akymy $e^{eU / (kT)}$ gezek artýar. Onda esasy zaryadlaryň togy

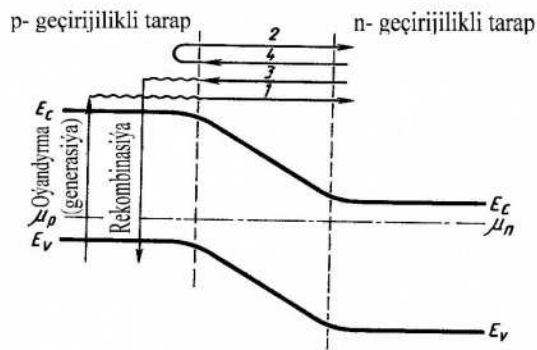
$$I_{esasy} = I_s \cdot e^{eU / (kT)} \quad (7.10)$$

bolýar. Jemleýji tok

$$I = -I_s + I_s \cdot e^{eU / (kT)} = I_s (e^{eU / (kT)} - 1) \quad (7.11)$$

Esasy zaryadlaryň togy, olaryň akymyna garanynda elmydama kiçidir, sebäbi toga goşant diňe päsgelçilikden geçip, garşylykly tarapda rekombinirlenýän zaryadlar berýär.

Esasy zaryadlaryň bir bölegi, öz ýaşayş wagtynyň dowamynda, täzeden p-n-geçişi yzyna kesip geçip ýetişýär (meselem, elektronlar - n - tarapa, deşikler bolsa - p - tarapa yzyna geçýärler). Bu hadysa 7.5 - nji suratda dörkezilendir.



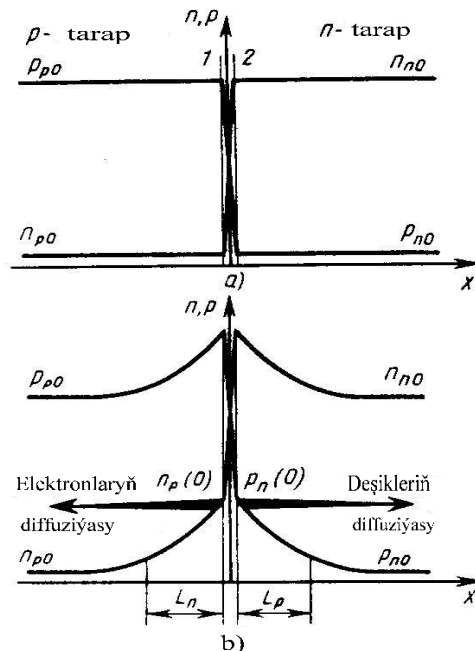
7.5. Surat. Deňagramlykdaky p-n-geçişde elektronlaryň akymy.

7.5 suratda deňagramlykdaky p - n - geçişden geçýän elektronlaryň akymlary görkezilen. p - tarapdan ýylylyk generasiýasy esasynda ýuze çykan elektronlaryň akymy (1) göwrüm zarýady kesip geçýär. Onuň garşysyna n - tarapdan gaýdyp p - tarapda rekombinirlenýän elektronlar gelyarlar (3). Ondan başgada elektronlaryn bir topary (4) n - tarapdan p - tarapa geçip, birnäçe gezek çaknyşma sezewar bolup, yzyna n - tarapa gaýdyp baryar (2).

P- n - diodlaryň wolt-amper häsiýetnamalary, (7.11) deňlikden görünişi ýaly, käbir üýtgeşikliklere (I_s) seretmezden, metal- ýarymgeçiriji ýa-da Şottki päsgelçiligi diodlarynyňka meňzeşdir.

P-n-geçişiň impuls we ýygylýk häsiýetleri.

Elektronikada, radioelektronikada, hasaplaýyş tehnikasynda we awtomatikada impuls zynjyrlarynda ýarymgeçiriji diodlar giňden peýdalanylýar. Diodlaryň bu maksat üçin işe ukyplydygyny kesgitleýän esasy häsiýetiniň biri olaryň çaltlygydyr. Diodlaryň çaltlygy p-n-geçişde göni utgaşma ýagdaýyndan ters ytgaşma ýagdaýyna geçişiň we tersine geçişiň wagtyň dowamlylygy bilen kesgitlenilýär.



7.6. Surat. Göni ugura elektrik meýdany birleşdirilen p-n-geçişde esasy däl zarýadlaryň inžeksiýasy.

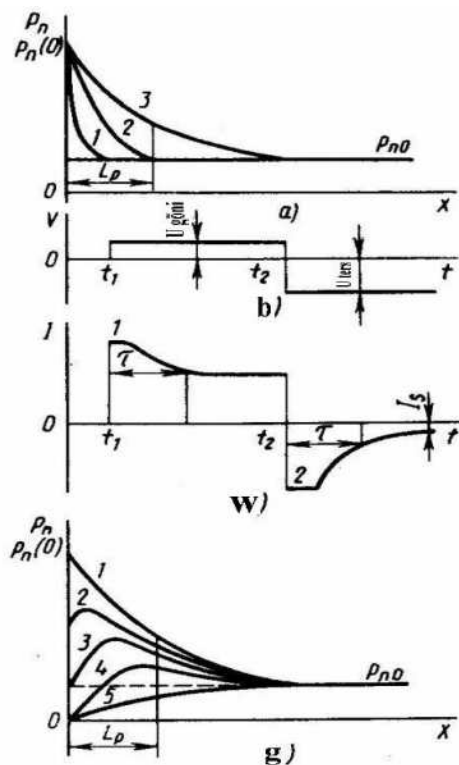
Diodyň işleýiş çaltlygynyň p-n-geçişde bolup geçýän haýsy hadysalara baglydygyna seredip geçeliň. 7.6. suratda p-n-geçişiň deňagramlyk ýagdaýynda, ýarymgeçirijiniň n we p

taraplarynda esasy hem-de esasy däl zarýdlaryň paýlanyşy görkezilen. Dioda göni ugura U meýdan birleşdirilende p-n – geçişin potensial päsgelçiligi eU ululyga kiçelýär we p-n – geçişden esasy zarýadlaryň akymy $\exp[eU/(kT)]$ gezek artýar, netijede geçişin araçäginde n-tarapda (2) deşikleriň konsentrasiýasy we p-tarapda (1) elektronlaryň konsentrasiýasy aşakdaky ululyga çenli artýar:

$$p_n(0) = p_{n0} \exp[eU/(kT)]; \quad n_p(0) = n_p(0) \exp[eU/(kT)]. \quad (7.12)$$

P-n – geçişden n-tarapa geçen deşikler we p-tarapa geçen elektronlar, geçen taraplarynda esasy däl zarýadlara öwrülýärler. Şeýlelikde, göni ugura meýdanyň täsiriniň netijesinde, ýarymgeçirijiniň deňişli tarapyna p-n – geçişin üstünden esasy däl zarýadlaryň “pürkülmesi” bolup geçýär. Bu hadysa esasy däl zarýadlaryň inžeksiýasy diýilýär.

Geçişin n tarapyna inžektirlenen deşikler, n ýarymgeçirijiniň göwrüminden elektronlary özüne çekýär, şol sebäpli hem p-n – geçişin ýakynynda elektronlaryň konsentrasiýasy göwrümüne seredende ýokarlanýar (7.6 b surat). Çekilen elektronlaryň otrisatel zarýady artykmaç deşikleriň položitel zarýadyny ekranlaýar. Geçişin p-tarapynda hem şeýle ýagdaý ýüze çykýar, ýagny çekilen deşikleriň položitel zarýady inžektirlenen elektronlaryň otrisatel zarýadyny ekranlaýar. Şol sebäpli hem deňişlilikde geçişin n we p taraplaryna inžektirlenen elektronlar we deşikler, bu ýerde öz meýdanlary bilen esasy däl zarýadlaryň göwrüme tarap hereketine päsgelçilik berýän, kompensirlenmedik göwrüm zarýadyny döretmeýär. Bu zarýad geçirijileriniň ýarymgeçirijiniň içine tarap hereketi, ýagny hereketiniň tizligi n-tarapda deşikleriň konsentrasiýasynyň gradiýentine proporsional bolan dp_n/dx we p-tarapda elektronlaryň konsentrasiýasynyň gradiýentine proporsional bolan dn_p/dx diffuziýa esasynda amala aşýar.



7.7. Surat. P-n-geçişde impuls häsiýetiniň ýüze çykyşy.

Wagtyň geçmegi bilen n-tarapa inžektirlenen deşikleriň paýlanylyşynyň üýtgeýşi 7.7b suratda görkezilen. Göni ugura daşky meýdanyň birleşmeginiň başlangyç momenti (7.7b surat, t_1 moment), deşikleriň konsentrasiýasynyň gradiýenti örän ýokarydyr (7.7a surat, 1 egr), sebäbi n-tarapa inžektirlenen deşikler araçäkde ýuka gatlakda toplanýar. Sol sebäpli hem diodyň üstünden geçýän göni tok uludyr, ol diňe ýarymgeçirijiniň işjeň däl böleginiň garşylygy r bilen çäklenendir

(7.7b surat, 1- nji ülüş). Deşikleriň diffuziýasynyň n tarapa dowam etmegi we rekombinasiýasy bilen olaryň konsentrasiýasynyň gradiýenti kiçelýär. Artykmaç deşikleriň ýaşayş wagtyna deň wagtda τ_p , olaryň n tarapda paýlanylyşy durnukly ýagdaýa ýetýär, göni tok özünüň adaty ýagdaýyna gelýär.

P-n – geçişiň, elektronlaryň inžektirlenen p tarapynda hem şuna meňzeş hadysa bolup geçýär: geçiş hadysalary we durnukly göni toguň akymynyň emele gelmegi bu ýagdaýda takmyndan τ_n wagtda tamamlanýar.

Diodyň göni ugurdan ters ugra birbada (mgnowen) birleşen ýagdaýynda (7.7b surat, t_2 wagt momenti) ilki başky ters tok örän uludyr, sebäbi araçäkde esasy däl zarýadlaryň konsentrasiýasy ýokarydyr (7.7g surat, 1-nji egri); hakykat ýüzünde bu togyň güýji diňe diodyň işjeň bolmadyk böleginiň garşylygy bilen çäklendirilýär. Wagtyň geçmegi bilen araçäkdäki artykmaç esasy däl zarýadlar ýarymgeçirijiniň degişli taraplaryna geçmekligiň we rekombinasiýanyň esasynda siňişýärler (rassasywaýetsýa). Netijede, esasy däl zarýadlaryň konsentrasiýasynyň gradiýenti we olaryň araçäge tarap diffuziýasy örän peselýär, ters ugura tok azalýar (7.7w surat). Takmyndan deşikler üçin τ_p we elektronlar üçin τ_n wagtyň dowamynda p-n – geçişiň araçäklerinde esasy däl zarýadlaryň durnukly paýlanmasy emele gelýär (7.7g surat, 5-nji egri) hem-de ters tok I_s özünüň adaty ýagdaýyna ýetýär (7.7w surat).

Şeýlelikde, dioda birleşdirilen daşky elektik meýdanyň polýarlygy çalşylanda, onda geçiş hadysasy bolup geçýär (göni ugura birleşdirilende esasy däl zarýad geçirijileriniň toplanmasy we ters ugura birleşdirilende siňişmesi). Bu hadysa hem diodlaryň göni we ters utgaşma ýygylgyny, ýagny utgaşmanyň çaltlygyny çäklendirýär. Bu seredilen geçiş hadysalarynyň esasy däl zarýadlaryň ýaşayş wagtynda tamamlanýandygyny hasaba alsaň, onda bu zarýadlaryň ýaşayş wagty impuls diodlarynyň çaltlygyny kesgitleýär.

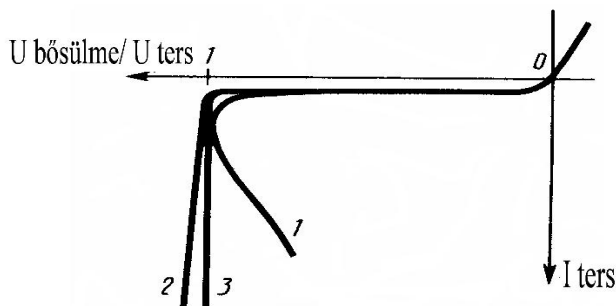
4. P-n-geçişiň böwsülmegi. Ýylylyk böwsülmesi.

Lawina boýunça böwsülme. Tunnel böwsülmesi. Tunnel diodlary.

Daşky elektrik meýdany ters ugur boýunça p-n-strukturalara (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 geçýän 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 häsiýetnama eýedir.

P-n-geçişden akýan ters toguň naprýaženiýa baglylykda üýtgeýşi 7.8 suratda görkezilendir. Ters ugura naprýaženiýanyň billi bir ululygynda, ýagny $U_{ters} = U_{bows}$, ters toguň örän çalt birbada üýtgemesi ýüze çykýar. Bu hadysa p-n-geçişiň böwsülmegi diýen ada eýe bolup, böwsülme bolup geçýän naprýaženiýa, böwsülme naprýaženiýasy diýilip at berilýär.

Böwsülmede bolup geçýän fiziki prosesleriň häsiýetnamalary boýunça, ýagny dürlilik boýunça, böwsülme esasy dört görnüşe bölünýär: tunnel, lawina, ýylylyk we üst boýunça. Böwsülmäniň dürli görnüşlerine seredip geçeliň.



7.8. Surat. p-n-geçişiň böwsülmegi. 1 – ýylylyk, 2 – tunnel, 3 – lawina.

Ýylylyk böwsülmesi.

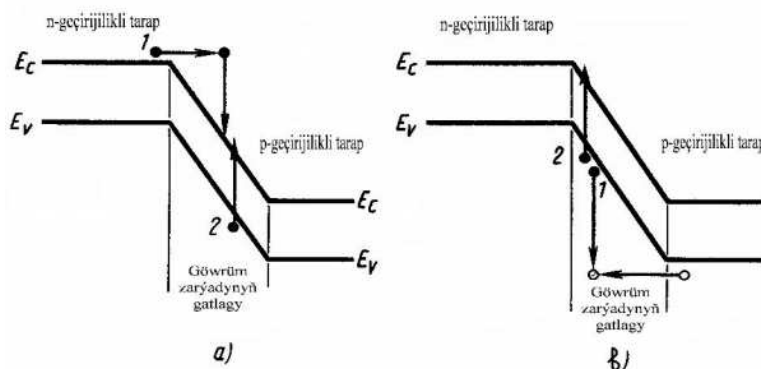
P-n-geçişden ters tok akanda ýylylyk bölünip çykýar we onuň temperaturasy ýokarlanýar. Temperaturanyň artmagy ýylylygy äkitmegiň hiline bagly bolup, ýylylyk garşylygy bilen häsiýetlendirilýär (R_0). Bu garşylyk bölünip çykýan birlik kuwwata (W) baglylykda temperaturanyň artdyrmasy (ΔT) deňdir, ýagny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

Kuwwatyň belli bir ululygynda W , näçe uly bolsa şonça-da diodyň garşylygy kiçi R_0 , tok lawina boýunça birbada örän çalt artyp başlaýar we p-n-geçişiň ýylylyk böwsülmesi ýüze çykýar.

Ýylylyk böwsülmesi bolan ýagdaýynda wolt-ampere häsiýetnamanyň ters şahasynda otrisatel garşylykly bölek (uçastok) ýüze çykýar, ters toguň artmasy naprýaženiýanyň kemelmegine getirýar (7.8-surat, 1-egri).

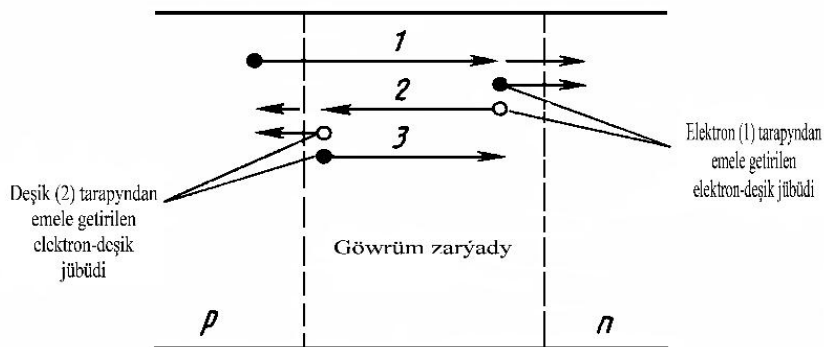
Lawina boýunça böwsülme.

Haçan-da p-n-geçiş giň bolan ýagdaýynda ters naprýaženiýanyň ýokary bahasynda, esasy däl zarýadlar p-n-geçişiň meýdanynda, örän ýokary kinetik energiýa eýe bolup, olar urgy ionlaşdyrmany ýüze çykarmaga ukyply bolýar (7.9. surat). Urgy ionlaşdyrmany elektron bilen bir hatarda deşikler hem ýüze çykaryp bilýärler. Iki ýagdaýda hem elektronlar öňki energetik zonasýnda galyp, energiýasyny ýitirýär (1). Ol öz ýitiren energiýasyny walent zonadaky 2 elektrona bermeklik bilen ony geçiş zonasyna geçirýär, şeýlelikde täze elektron-deşik jübüdi emele gelýär. Bu ýagdaýda ters toguň lawina boýunça artmagy ýüze çykyp, p-n-geçişiň lawina boýunça böwsülmegine getirýär.



7.9. Surat. p-n-geçişde urgy (udarnýý) ionlaşmasy.

Şeýlelikde p-n-geçişiň meýdanyna giren her bir elektrona derek, ondan birnäçe elektron-deşik jübütleri çykyp-ters ugra tok örän çalt ösýär (7.10. surat). Böwsülme ýüze çykýan uçastokda p-n-geçişiň göwrüm zarýadynyň çäginde, ters toguň naprýaženiýanyň artmagy bilen üýtgemesi örän dik, birbada bolýar.



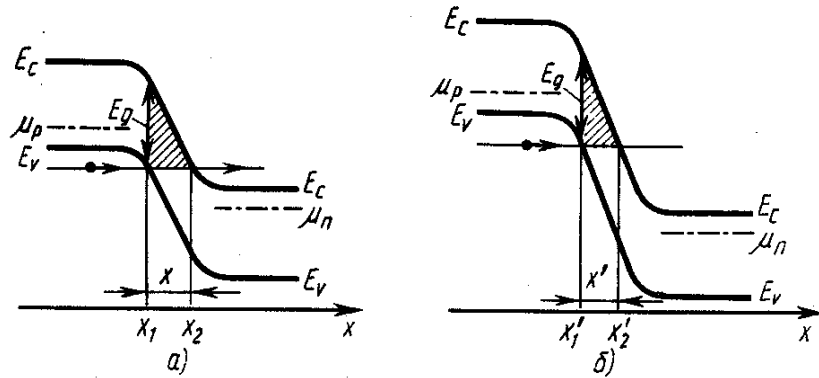
7.10. Surat. Lawina boýunça böwsülmäniň emele gelişi we ösüşi.

Bu effekt goneldijiniň çykyşynda durnukly naprýaženiýany almak üçin ulanylýar. Şeýle režimde işleýän diodlara, ýagny wolt-ampere häsiýetnamasynyň ters şahasy lawina boýunça

böwsülýän diodlara, stabilitronlar diýilip at berilýär. Stabilitronlar köplenç kremniý materialynyň esasynda taýýarlanylýp, olaryň böwsülme naprýaženiýasy diodyň n- we p-taraplarynda garyndylaryň konsentrasiýasy bilen kesgitlenilýär. Garyndylaryň konsentrasiýanyň artmagy bilen p-n-geçişiň böwsülme naprýaženiýasy kiçelýär.

Tunnel böwsülmesi.

P-n-geçişe ters ugra goýulan naprýaženiýanyň belli bir ýokary bahasynda, p-tarapyň walent zonasy, n-tarapyň doly bolmadyk geçiş zonasynyň garşysynda ýerleşýär (7.11 surat). Bu ýagdaýda p-tarapyň walent elektronlarynyň n-tarapyň geçiş zonasyna galyňlygy x bolan potensial päsgelçilikden syzyp geçmegi mümkin. Ters ugura 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 önündäki päsgelçiligiň giňligi kiçelýär. Haçan-da p-n-geçişiň göwrüm zarýadynyň örän ýuka bolan ýagdaýynda, U_{ters} naprýaženiýanyň gaty uly bolmadyk bahasynda hem, elektrik meýdany E , p-n-geçişden effektiv tunnelirlenme başlanýan bahasyna ýetip bilýär we böwsülme başlanýar. Meselem, germaniý ýarymgeçirijisinden taýýarlanylýan diodlar üçin tunnel böwsülmesi $E_{\text{böws}} = 3 \cdot 10^7 \text{ V/m} = 30 \text{ V/mkm}$ başlasa, kremniý ýarymgeçirijisinden taýýarlanylýan diodlar üçin $E_{\text{böws}} = 10^8 \text{ V/m} = 10^2 \text{ V/mkm}$ başlaýar. Şeýle böwsülmä tunnel böwsülmesi diýilip at berilýär. Tunnel böwsülmesi bolýan p-n-diodyň wolt-ampere häsiýetnamasynyň ters şahasý 7.11-nji suratda görkezilen.



7.11. Surat. Tunnel geçişi diodlar ters elektrik meýdanynda.

P-n-geçişiň böwsülme naprýaženiýasynyň nämä baglydygyna seredip geçeliň. P-n-geçiş birbada bolan ýagdaýynda elektrik meýdanynyň güýjenmsini şeýle kesgitläp bolýar.

$$E = -\frac{dU}{dx} = \frac{1}{e} \cdot \frac{d\phi}{dx} \quad (7.12)$$

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

$$E_{\text{max}} = -\frac{eN_d \cdot d_n}{\epsilon \cdot \epsilon_0} = -\frac{eN_a \cdot d_p}{\epsilon \cdot \epsilon_0} \quad (7.13)$$

Haçan-da p-n-geçiş asimmetrik diýlip hasap edilende, ýagny az garyndyly tarap n-görnüşli bolsa, onda $d_n = d$ diýip, alýarys.

$$E_{\text{max}}^2 = \frac{2(\phi_0 + eU_{\text{ters}})}{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot N_d} \quad (7.14)$$

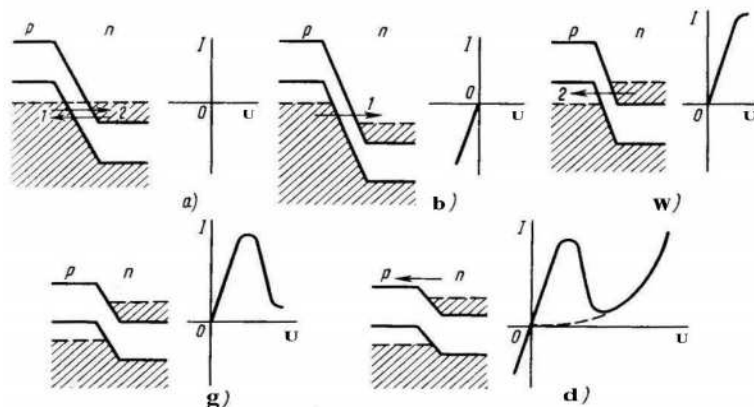
Haçan-da E_{max} böwsülme meýdanyna $E_{\text{böws}}$ deň diýilip kabul edilse onda böwsülme naprýaženiýasy:

$$U_{\text{bows}} = \frac{\frac{1}{2} \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_d \cdot E_{\text{bows}}^2 - \varphi_0}{e} \quad (7.15)$$

(7.15) deňlikden görünişi ýaly tunnel böwsülmaniň naprýaženiýasynyň ululygy az garyndyly tarapyň garyndysynyň konsentrasiýasynyň artmagy bilen çyzykly kemelýär. Diodyň n we p taraplarynda elektronlaryň we deşikleriň konsentrsiýasynyň belli bir uly bahalarynda tunnelirleme ters ugura berlen meýdanyň nola ýakyn bahasynda hem ýüze çykyp bilýär. Şeýle diodlara öwrülen (obraşennyý) diodlar diýilýär.

Tunnel diodlary.

Tunnel diodlary örän ýokary konsentrasiýa çenli garyndyly ýarymgeçirijileriň esasynda 1958-nji ýylda taýýarlanylýar. Şeýle ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesi gadagan zonanyň içinde ýerleşmän, n -tarapda geçiş zonanyň içinde, p -tarapda bolsa walent zonanyň içinde ýerleşýär (7.12 surat). 7.12 suratda tunnel geçişiniň deňagramlyk ýagdaýynyň energetiki shemasy görkezilen. Çyzgydan görünişi ýaly, p -görnüşli ýarymgeçirijiniň walent zonasy, n -görnüşli ýarymgeçirijiniň geçiş zonasy bilen bir-birine tarap bölekleyin geçýärler (örtýärler). P - n -geçişde ýarymgeçirijileriň geçiş we walent zonalarynyň şeýle ýerleşmagi p tarapdan n tarapa (1-nji geçiş) we n tarapdan p tarapa (2-nji geçiş) elektronlaryň tunnelirleme syzmasyna mümkinçilik berýär. Elektronlaryň 1-nji geçiş boýunça akymy ters tunnel toguny, 2-nji geçiş boýunça akymy göni tunnel toguny döredýär. Daşky meýdan täsir etmedik ýagdaýynda, ýagny daşky elektrik meýdanynyň täsiri nola deň bolan ýagdaýynda toklar özara deňdirler we p - n -geçişden geçýän jemleýji tok nola deňdir.



7.12. surat. Tunnel diodynyň wolt-amper häsiýetnamasynyň düşündirilişi.

Haçan-da ters ugura elektrik meýdany täsir eden ýagdaýynda zonalaryň bir-birini örtmesi artyp, çepden saga geçýän elektronlaryň sany artýar (7.12 b surat). 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 (7.12 w surat). Haçan-da p - n -geçişiň n -tarapynyň geçiş zonasynyň düýbi p -tarap üçin 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 garşynda duran n -tarapyň derejelerinde elektronlaryň sany azalýar. Haçan-da n -tarapyň geçiş zonasynyň düýbi, p -tarapyň walent zonasynyň depesi bilen bir derejede bolan ýagdaýynda göni tok özüniň minimal bahasyna ýetýär (7.12 g surat).

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

Suratdan görünişi ýaly tunnel diodlaryň wolt-amper häsiýetnamasynyň esasy aýratynlygy, onuň göni şahasynda naprýaženiýanyň artmagy bilen toguň kemelýän böleginiň

ýüze çykmagydyr, ýagny diod otirisatel differensial garşylyga eýedir. Tunnel diodlarynyň bu häsiýetini elektromagnit tolkunlaryny generirleme üçin, elektrik toguny aýyryp çatma, ýagny utgaşdyrma üçin peýdalanmak mümkin.

Tunnel diodlarynda, tunnel togunyň ýüze çykyanlygy sebäpli, p-n-geçişde zarýadlaryň toplanma we ýaýrama prosesi ýok diýen ýaly, şol sebäpli hem bu diodlaryň ýygylýk häsiýetnamalary örän kämil bolup, olaryň çaltlygy beýleki diodlaryňkydan ýokarydyr.

5. Ýarymgeçiriji geterogeçişler barada düşüňje. Geterogeçişin energetiki diagrammasy. Esasy häsiýetnamalary boýunça ýakyn geterojübütler.

Geterogeçiş diýlip, dürli elektrik we optiki häsiýetlere eýe bolan iki sany dürli ýarymgeçiriji materialynyň şepine aýdylýar. Bu bölümde iki sany dürli ýarymgeçirijiniň arasyndaky geterogeçişe, mysal üçin arsenid-galliý we germaniý ýarymgeçirijileriniň arasyndaky geterogeçişe seredip geçeliň.

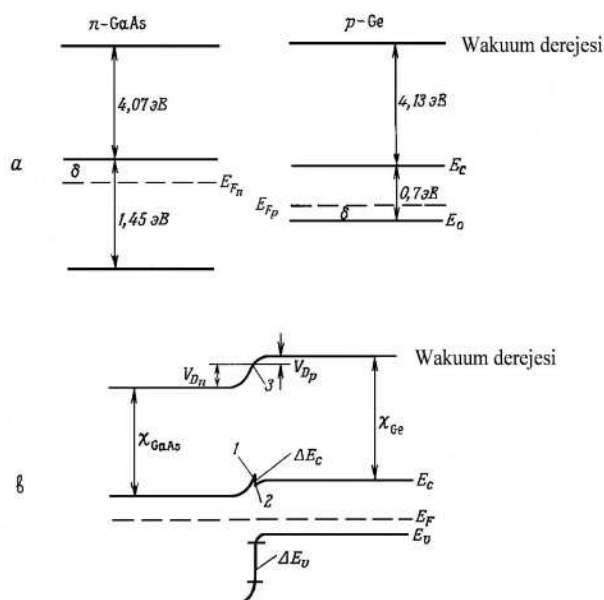
Seredilýän geterojübüdiň energetiki zonalarynyň gabat gelmezligi sebäpli (ΔE_c we ΔE_v), geterogeçişin energetik zonalarynyň diagrammasy ýönekeý gomozonaly geçişe (germaniý-germaniý) seredende çylşyrymly bolýar. Bu gabat gelmezlik, ýagny sepleşýän ýarymgeçirijileriň gadagan zonalarynyň giňliginiň birmeňzeş bolmazlygy, gözenegiň hemişeligiň, çykyş işleriniň we käbir fiziki häsiýetnamalarynyň gabat gelmeýänligi geterogeçişde energetiki zonanyň üzügine we birnäçe näsazlyklaryň ýüze çykmagyna getirýär.

Haçan-da GaAs we Ge ýarymgeçirijileriň göwrümünde geterogeçişin ýakynyna çenli esasy häsiýetnamalar üýtgemeyän ýagdaýynda,, geterogeçişin energetik diagrammalaryna seredip geçeliň. GaAs we Ge ýarymgeçirijileriň gadagan zonalarynyň giňligini deňşililikde 1.45 eV we 0.7 eV diýip kabul edeliň. Öňden belli boluşy ýaly, çykyş işi elektrony Fermiň derejesinden wakuum derejesine çykarmak üçin gerek bolan energiýa deň bolup, Fermiň derejesiniň ýerleşişiniň üýtgemegi bilen üýtgäp durýar. Çykyş işiniň Fermiň derejesine baglylygy sebäpli, ol garyndynyň konsentrasiýasynyň üýtgemegi bilen üýtgeýär. Şol sebäpli hem geterogeçişlerde araçäkde bolup geçýän hadysalar seredilende elektron srodstwowy (daşky çykyş işi) diýen ululykdan peýdalanylýar. Sebäbi elektron srodstwowy diýen ululyk, elektrony geçiş zonanyň düýbünden wakuum derejesine geçirmek üçin gerek bolan energiýa deň bolup, garyndynyň hiliniň we konsentrasiýasynyň üýtgemegi bilen üýtgemeyär.

Köp sanly almaz gurluşyna eýe bolan ýarymgeçirijiler we ýarymgeçiriji birleşmeleri özleriniň esasy fiziki häsiýetnamalarynyň ýakynlygy sebäpli geterostrukturalary almaklyk üçin örän amatlydyrlar. Bu ýarymgeçiriji strukturalaryň gurluşy kubiki elementar gözenegiň (ýaçaýkanyň) hemişeligi (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 bolup (takmyndan 0,08% töweregi tapawutlanýar); bu ýarymgeçirijileriň ýylylyk boýunça giňelmek koeffisientleri hem örän ýakyn, şol sebäpli bu materiallar örän kämil gurluşly geterojübüti emele getirip bilýär.

Arsenid galliý we germaniý ýarymgeçirijileriniň arasyndaky geterogeçişin energetiki zona diagrammasyny gurmak üçin, n-GaAs donorlar bilen $n = 3 \times 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ çenli garyndyly diýeliň (n-görnüşli geçirijilikli), p-Ge akseptor garyndylary bilen $3 \times 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ çeni garyndyly bolsun (p-görnüşli geçirijilikli). 1-nji tablisada bu ýarymgeçirijiler üçin geterogeçişin zona diagrammasyny gurmaklyga zerur gerek bolan häsiýetnamalar berlen.

Geterogeçişin energetiki diagrammasyny gurmaklyk üçin ilki bilen, wakuum derejeleri gabat gelýän ýagdaýda bu iki ýarymgeçiriji materialynyň energetik diagrammasyny aýratynlykda çyzalyň (7.13. surat). 7.13a suratdan görnüşi ýaly elektronyň energiýasy E_{fp} derejede E_{fn} derejä seredeninde kiçidir. Şol sebäpli hem, ýarymgeçirijiler sepleşenden soň, Fermiň derejesiniň deňleşmegi üçin, ýagny termodinamiki deňagramlylygyň emele gelmegi üçin n-GaAs-den p-Ge elektronlaryň belli bir mukdary geçýär. Elektronlaryň şeýle geçişi ýarymgeçirijileriň araçäginde energetiki zonalaryň egreýmesine getirýär. Arsenid galliýniň geçiş zonasy E_c ýokary gyşarýar.



7.13. Surat. n-GaAs-p-Ge geteroqeçişiň energetiki derejeleriniň diagrammasynyň gurluşy (massştab saklanmaýar).

7.1-nji tablisa.

GaAs-Ge ýarymgeçirijileriň arasyndaky p-n-geteroqeçişiň energetiki diagrammasyny gurmak üçin gerek bolan häsiýetnamalaryň bahalary

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

Zonalaryň gyşarmagynyň ululygyny U_{Dn} we U_{Dp} diýip belläliň. Ferminiň derejesiniň süýşmesiniň ululygy, şeýle deňligiň üsti bilen tapylýar.

$$E_{fp} - E_{fn} = (\chi_{\text{Ge}} + E_{g\text{Ge}} - \delta_{\text{Ge}}) - (\chi_{\text{GaAs}} + \delta_{\text{GaAs}}) = U_{Dn} + U_{Dp} \quad (7.16)$$

Bu tapawut n-GaAs- p-Ge geteroqeçişi üçin 0,52 eW deň bolup zonalaryň egreýmesiniň jemine deňdir $U_{Dn} + U_{Dp}$. Edil gomogeçişdäki ýaly, geteroqeçiş dürli ýarymgeçirijileriň özara

serhedinde giňligi χ_n we χ_p bolan göwrüm zarýadyny emele getirýär. Zarýadyň saklanmak kanuny esasynda χ_n we χ_p kompensirlenmedik donorlaryň (N_D) we akseptorlaryň (N_A) konsentrasiýalary bilen şeýle gatnaşykdyr:

$$\frac{\chi_n}{\chi_p} = \frac{N_A}{N_D} \quad (7.17)$$

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

$$\frac{U_{Dn}}{U_{Dp}} = \frac{N_A \varepsilon_{Ge}}{N_D \varepsilon_{GaAs}} \quad (7.18)$$

Biziň mysalymyzda U_{Dn}/U_{Dp} takmyndan 4:1 deňdir, şeýlelikde, $U_{Dn}=0,42$ eW we $U_{Dp}=0,1$ eW. Energetiki diagrammany gurnaggy dowam etdirip, 7.13b suratdaky çyzgyny alarys.

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

$$\Delta E_c = \delta_{GaAs} + U_{Dn} - (E_{gGe} - \delta_{Ge}) + U_{Dp}, \quad (7.19)$$

Bu ýerde $\delta_{GaAs} = E_c - E_f = 0.1$ eW; $\delta_{Ge} = E_f - E_v = 0.14$ eW.

(7.19) deňlige (7.18) deňikden bahalary goýup, amatly görnüşde ýazýarys:

$$\Delta E_c = \chi_{Ge} - \chi_{GaAs} \quad (7.20)$$

7.20 deňligiň dogrudygyny 7.13b suratdan hem görmek mümkin, sebäbi 3-1 aralyk χ_{GaAs} deňdir we 3-2 aralyk χ_{Ge} deň. Şol sebäpli hem n-GaAs- p-Ge geterogeçişi üçin $\Delta E_c = 4,13 - 4,07 = 0,06$ eW.

Geterogeçişde dürli ýarymgeçirijileriň araçäginde, walent zonasyndaky emele gelýän energetik üzülmäni ΔE_v şu aşakdaky deňlikden tapmak mümkin.

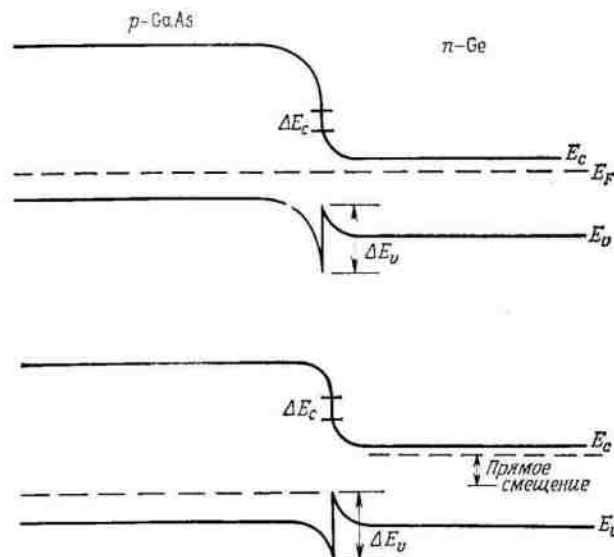
$$\Delta E_v = (E_{gGaAs} - E_{gGe}) - (\chi_{Ge} - \chi_{GaAs}) \quad (7.21)$$

(7.20) we (7.21) geňlikleriň esasynda alarys.

$$\Delta E_c + \Delta E_v = E_{gGaAs} - E_{gGe} \quad (7.22)$$

Ähli geterogeçişlere seredilende alnan deňlikleriň ΔE_c we ΔE_v we olaryň jeminiň ähmiýeti uludyr; bu deňlikler ýarymgeçirijileriň işlendik garyndyly ýagdaýy üçin dogrudyr. N-GaAs-p-Ge geterogeçiş üçin energetik zonalaryň üzülməsi degişlilikde $\Delta E_c = 0,06$ eW we $\Delta E_v = 0,69$ eW deňdir.

Bu gatnaşyklar p-GaAs-n-Ge geterogeçiş üçin hem dogry bolup, onuň energetiki diagrammasy 7.14. suratda görkezilen. Bu ýagdaýda geçişde walent zonasyndaky energiýanyň üzülməsi ΔE_v uly bolup, “çykyntgy” emele getirýär. Eger şeýle “çykyntgy” uly bolsa, onda olaryň deşikleriň inžeksiýasyny çäklendirmegi mümkin, netijede tok esasan araçäkdäki rekombinasiýa bilen kesgitlenilýär. 7.13. suratda görkezilen energetiki diagramma, iki ýarymgeçirijiniň araçäginde zarýadyň üýşmesi ýok ýagdaýy üçin gurulandyr. Şeýle zarýad, haçan-da araçäkte ýarymgeçirijileriň birinde ýa-da ikisinde hem degişlilikde elektronlar we deşikler toplanar ýaly energetiki derejeler bolan ýagdaýynda emele gelýär.

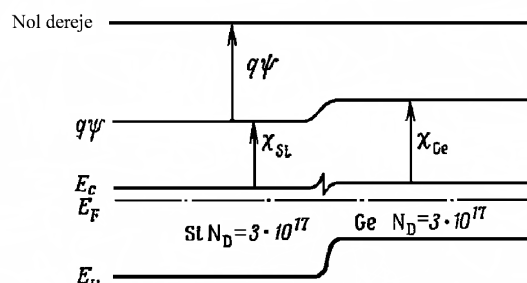


7.14. Surat. p- GaAs- n- Ge goterogeçişiň energetiki zonalarynyň diagrammasy.
a – daşky naprýaženiýe ýok ýagdaýynda; b – göni ugura meýdan berlende.

Izogörnüşli, ýagny birgörnüşli (n-n we p-p) geterogeçişler.

Izogörnüşli 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 başga-da energetik päsgelçiligiň ululygyna ýarymgeçirijileriň dürli taraplaryndaky garyndylaryň konsentrasiýasynyň täsiri bardyr. 7.15. suratda iki sany n-görnüşli ýarymgeçirijiniň arasyndaky geterogeçişiň energetik diagrammasy getirilen. Suratdan görnüşli ýaly n-n-geterogeçişde geçiş zonasynnda elektronlaryň geterostrukturanyň birinji düzüjisinden ikinji düzüjisi tarapyna geçýän araçäginde, elektronlaryň oňunde potensial päsgelçilik emele gelýär. Edil şonuň ýaly p-p-geterogeçişde hem 2-nji bölekden 1-nji bölege geçýän deşikleriň önünde potensial päsgelçilik emele gelýär. Şeýlelikde, bu iki geterostruktura hem (n-n we p-p) bir taraplaýyn geçirijilik häsiýetine eýe bolup bilýär.

Izogörnüşli geterogeçişde esasy däl zarýadlaryň toplanma effekti ýüze çykmaýar, şol sebäpli hem şeýle strukturalardan taýýarlanylýan diodlar gaty kiçi utgaşma (birleşme we tersine birleşme) wagtyna eýedir. Umuman aýdanda izogörnüşli geterostrukturalar esasynda taýýarlanylýan diodlar has ýokary ýygylýkda işläp bilýär. Emma, üst-päsgelçilikli metal-ýarymgeçiriji Şottki diodlarynda hem geçişde esasy däl zarýadlaryň toplanma effekti ýüze çykmaýar we şeýle diodlary taýýarlamagyň tehnologiýasy n-n-geterogeçişli diodlary taýýarlamakdan ýöneleý. Şol sebäpli hem köplenç metal-ýarymgeçiriji Şottki diodlary peýdalanylýar.



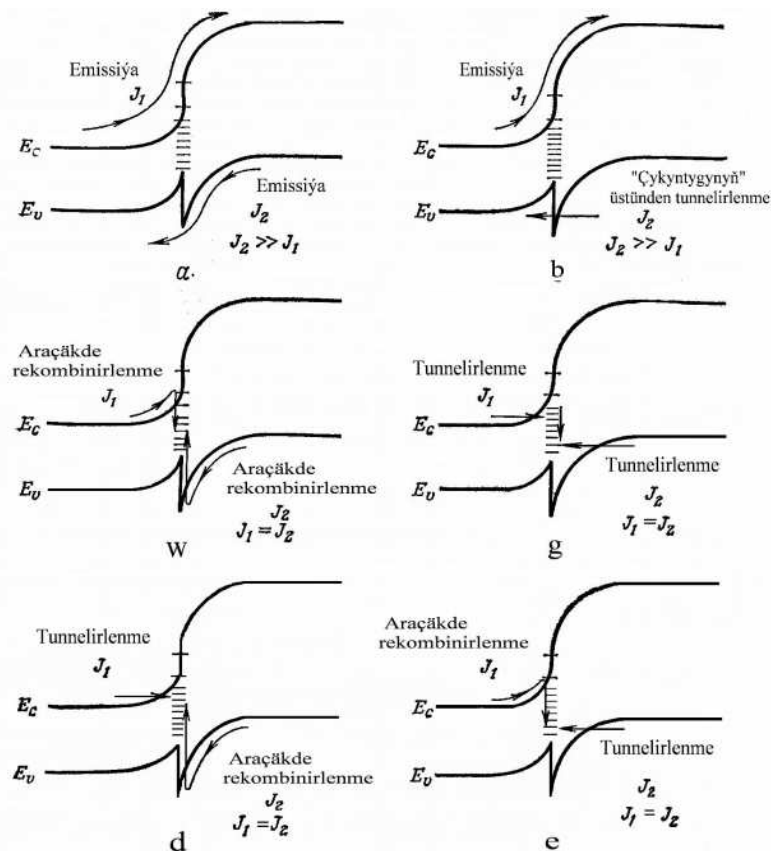
7.15. Surat. Birgörnüşli (izogörnüşli) n-Ge-n-Si geterogeçişiň deňagramlyk ýagdaýyndaky we araçäkdäki derejeler hasaba alynmadyk ýagdaýyndaky energetiki diagrammasy.

Ge we Si ýarymgeçirijileriň elektron srodstwasynyň ululyklaryna laýyklykda n-Ge-n-Si geterogeçişde energetiki üzülmäniň ululygy $\Delta E_c = 0,12 \text{ eV}$ ($4,13 \text{ eV} - 4,01 \text{ eV}$). Bu n-Ge-n-Si

geterogeçişi ony düzyän n-Ge we n-Si yarymgeçirijileriň birmeňzeş garyndyly ýagdaýynda, ýagny garyndynyň konsentrasiýasy $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ bolan ýagdaýynda seredeliň (7.15. surat). Zona diagrammasynyň görnüşi zarýadlaryň jeminiň nola deň bolmalydygyndan gelip çykýar. Geterogeçişiň araçäginde zarýadyň ýok ýagdaýynda, Şottkiniň adaty çäklendirme şertiniň esasynda, elektrostatiki potensialyň ψ üznüksizligi üçin geçiş zonasynnda iki ýarymgeçirijiniň (germaniý - kremniý) elektron srodstwalarynyň tapawydyna deň bolan üzük emele gelýär. Kremniniň garyplaşan gatlagynyň položitel zarýady diňe germaniniň baýlaşan gatlagynyň otrisatel zarýadyny kompensirleýär. Eger-de araçäkke derejeler bar bolsa, onda araçäkke enegetiki zonalar zarýadyň ululygyna we araçäkdäki derejelerde elektronlaryň bardygyna (ýa-da ýokdugyna) baglylykda ýokary ýa-da aşak süýşüp bilýärler. Geçiş zonasynyň üzügi öňküsi ýaly, elektron srodstwasynyň energiýasynyň tapawudyna deňdir, emma araçäkke geçiş zonasynyň gyrasynyň Ferminiň derejesinden beýikligi geterogeçişdärki derejeler bilen kesgitlenilýär.

Dürli görnüşli p-n-geterogeçişlerde pekombinasiýanyň we tunnelirlmäniň aýratynlyklary.

Geterogeçişlerden toguň geçişinde dürli modelleriniň we şol bir sanda tunnel modeliniň ornuna seredip geçeliň. 7.16 suratda n-p-geterogeçişden toguň geçişiniň altý sany modeli görkezilen. Kesgitlilik üçin dar gadagan zonaly n-görnüşli ýarymgeçiriji we giň gadagan zonaly p-görnüşli ýarymgeçiriji saýlanyp alnan. Geterogeçiş, dar gadagan zonaly p-görnüşli ýarymgeçişi we giň gadagan zonaly n-görnüşli ýarymgeçişi esasynda bolan ýagdaýynda hem şol birmeňzeş häsiýete eýe bolýar. Hakykat-da p-n-geçişden geçýän toguň, 7.16 suratda görkezilen birnäçe düzüjileriň toplumyndan durýandygyna seretmezden, adaty ýagdaýda olaryň diňe biri esasy bolýar. 7.16, a suratda görkezilen ýagdaýda geçişden, göwrüm zaýadynyň içinde rekombinirlenýän emissiýa we diffuziýa toklary geçýär. Andersonyň we Perlmanyň modelinde toguň geçişiniň şu görnüşi



7.16. Surat. n-p-geterogeçişlerde toguň geçişiniň altý sany mümkin bolan görnüşleri (mehanizmleri): a – Andersonyň modeli; b – Redikeriň modeli; w – Dolegiň modeli; g – n-Ge-pGaAs geçişde peýdalanylýan model; d – n-Ge-p-Si we p-Ge-n-Si geterogeçişlerde peýdalanylýan model; e – d-modeli çalyşýan model.

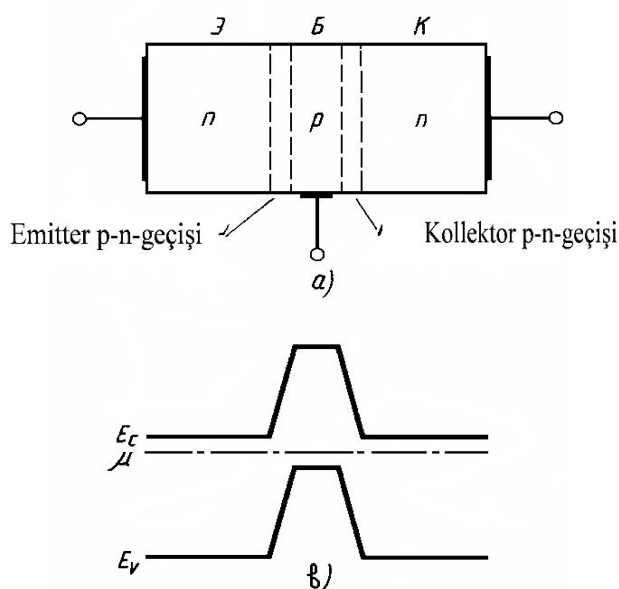
(mekhanizmi) peýdalanylýar. 7.16, b suratda Redikeriň modeli görkezilip, bu ýagdaýda geçişden geçýän tunnel togy esasy bolup durýar. Dolega geteogeçişden toguň geçişini düşündirmek üçin rekombinasiýa modelini peýdalanýar, ýagny p-n-geçişiň araçäginde zaryadlaryň ýaşaýyş wagty nola ymtylýar (7.16, w surat). Ol öz modelinde wolt-amper häsiýetnamanyň göni şahasynda toguň $\exp(qU/\eta kT)$ proporsionaldygyny anyklaýar. Bu ýerde η garyndylaryň konsentrasiýasyna baglylykda 1-den 2-ä çenli üýtgeýär. Toguň geçişiniň 7.16,g görnüşinde tunnel togy esasy orun eýeleýär. Raýben tarapyndan öňe sürülen bu model adaty uly päsgelçilik ýüze çykýan n-Ge-p-GaAs geteroeçişlerde amala aşýar. Toguň geçişiniň 7.16,g suratda görkezilen modelinde, giň zonaly ýarymgeçirijiden geçişde rekombinirlenýän zaýad geçirijileriň termoemissiýa we diffuziýa togy geçýär, oňa seretmezden dar gadagan zonaly ýarygeçirijiniň potensial päsgelçiliginden tunnel togy geçýär. Bu toguň iki görnüşi yzygiderli akýar we araçäge degişli häsiýetnamalar bilen baglanyşýarlar. Geçişden geçýän umumy tok onuň düzüjileriniň islendigi bilen çäklendirilip, toguň geçişi ýylylyk ýa-da tunnel häsiýete eýe bolup biler. Rekombinasiýa togunyň naprýaženiýa baglylykda çalt artýandygy sebäpli, göni ugura naprýaženiýanyň artmagy bilen toguň rekombinasiýa görnüşli häsiýetiniň, tunnel görnüşli häsiýete geçmegi mümkin.

VIII BÖLÜM. TRANZISTORLAR.

1. Bipolýar tranzistorlaryň işleýşi. Umumy baza boýunça birleşdirilişi.

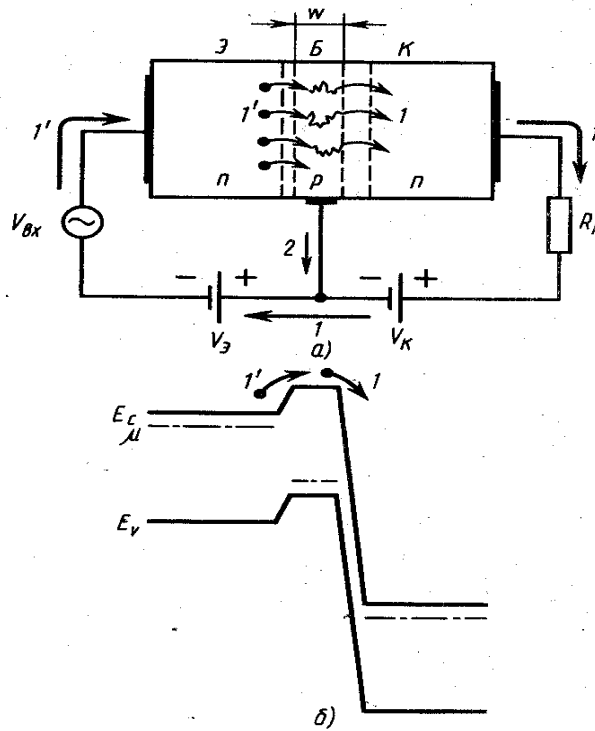
Gaty jisimler elektronikasynyň esasy we has wajyp üleşleriniň biri tranzistor bolup, bu dürli görnüşli geçirijilikli ýarymgeçiriji strukturalaryň esasyndaky abzaldyr. Ol elektrik yrgyldysyny (signalyny) güýçlendirmäge, elektrik çeşmesiniň energiýasyny elektromagnit yrgyldysyna öwürmeklige (elektrik yrgyldysyny generirlemeklige) niýetlenendir. Häzirki wagtda tranzistorlar ähli elektron zynjrlarynyň, elektron abzallarynyň üleşleriniň, elektron hasaplaýyş maşynlarynyň, aragatnaşyk abzallarynyň hem-de hojalyk elektron apparatlarynyň gaýra goýulmasyz bölegidir. Bipolýar tranzistorlar, iki sany p-n geçişli ýarymgeçiriji abzallar 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 doladyryjyly meýdan tranzistory hödürlenildi, sönra izolirlenen zatworly meýdan tranzistory işlenip düzüldi.

Bipolýar tranzistor iki sany bir-birine ýakyn ýerleşer (sepleşýän) p-n-geçişden durýar. öz gurluşy boýunça şeýle tranzistor p-n-p we n-p-n-görnüşde bolup bilýär. Mysal üçin, n-p-n-görnüşli tranzistora seredeliň (8.1a,b surat). Onuň energetiki diagrammasy deňagramlyk ýagdaýynda, ýagny daşky meýdanyň täsiri ýok wagtynda getirilen. Tranzistoryň orta bölegine baza diýlip (B), oňa emitter (E) we kollektor (K) bölekleri sepleşýär.



8.1. Surat. N-p-n – bipolýar tranzistoryň gurluşy (a) we energetiki diagrammasy (b).

Umumy baza zynjyry boýunça birleşdirilen tranzistoryň iş režimine seredeliň (8.2. surat). N-p-n-tranzistoryň adaty iş režiminde emitter-baza geçişe göni ugra, baza-kollektor geçişe ters ugra elektrik meýdany berilýär. Elektrik meýdanynyň täsiri esasynda tranzistoryň emitter böleginden elektronlar, emitter-baza geçişiniň peselen päsgelçiliginden geçip, baza tarap inžektirlenýär (8.2. surat, 1 çyzyk). Adaty diodlara meňzeş, daşky elektrik meýdanynyň naprýaženiýasy (U_{eb}) emitter-baza geçişiniň göwrüm zarýadynda çökýär; U_{bk} - öz gezeginde kollektor geçişiniň göwrüm zarýadynda we daşky garşylykda çökýär. Şeýlelikde, bazada elektrik meýdany ýok diýen ýaly bolup, emitterden inžektirlenen elektronlar, bazadan kollektora tarap diffuziýa boýunça hereket edýärler.



8.2. Surat. Tranzistoryň umumy baza boýunça zynjyra birleşdirilişi (a) we onuň iş režimindäki energetiki diagrammasy (b).

Elektronlaryň konsentrasiýasy emitter geçişde, deňagramlyk ýagdaýdaka göwrümdäki seredende $\exp [eU_e / (kT)]$ gezek uludyr, emma ters meýdan berlen kollektor p-n-geçişde örän kiçidir. Haçan-da, tranzistoryň bazasynyň galyňlygy ω , elektronlaryň bazadaky diffuziýa hereketiniň uzynlygyndan örän keçi bolsa, onda elektronlar hiç ýitgisiz diýen ýaly emitterden, emitter-baza geçişden we bazadan geçip, baza-kollektor geçişe barýarlar.

Eger elektronlar ýylylyk haotiki hereketi esasynda kollektor geçişiniň göwrüm zarýadynyň meýdanyna girse, onda olar geçişniň aşa uly meýdany tarapyndan tranzistorlaryň kollektoryna zyňylýar (8.2-surat, 1-nji görkeziji). 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. Tranzistoryň gurluş konstruksiýasy, emitter geçişden geçýän elektronlaryň diňe bir azyrak bölegi baza zynjyryna bölünär ýaly edilip ýörite düzülýär (8.2-surat, 2-nji görkeziji).

Tranzistorlary umumy baza zynjiry boýunça birleşdermek, giriş naprýaženiýa seredeninde çykyş zynjirda (R_n garşylykda) naprýaženiýanyň güýçlenmesine getirýär. Hakykatdan-da giriş zynjirda naprýaženiýanyň (U_{gr}) gaty kiçi üýtgemesi, haçan-da emitter geçişine göni ugra daşky elektrik meýdany berilende, emitter togynyň uly üýtgemesine getirýär. Eger-de emitter-baza geçişde naprýaženiýa $kT/e \approx 25$ mW ululyga üýtgesse, onda emitter togy e gezek üýtgeýär.

2. 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 (8.2a-surat; $R_n=0$).

$$\alpha = \left(\frac{\partial I_k}{\partial I_e} \right)_{U_k} \quad (8.1)$$

α - koeffisiýente tranzistoryň daşky häsiýetnamasy diýilýär. Ol üç sany içki häsiýetnamalar bilen kesgitlenilýär: emitteriň effektiwligi γ , bazadan geçiş koeffisiýenti β we kollektoryň effektiwligi α^* .

Emitteriň togy elektron (I_{ne}) we deşik (I_{pe}) toklarynyň düzumlerinden durýar. N-p-n-tranzistorlarda güýçlendirme effekti, emitter togunyň elektron düzüjisiniň I_{ne} esasynda ýerine ýetýär. Emitteriň effektiwligi γ bolan emitteriň umumy togunyň I_e üýtgemesiniň onuň elektron düzüjisiniň (I_{ne}) üýtgemisine gatnaşygyna deňdir:

$$\gamma = \left(\frac{\partial I_{ne}}{\partial I_e} \right)_{U_k} \quad (8.2)$$

P-n-geçişden geçýän esasy we esasy däl zaryadlaryň akymyny göz önünde tutanda, umumy tok (önki temalarda getirilen):

$$I = -I_s + I_s e^{\frac{eU}{kT}} = I_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (8.3)$$

P-n-geçişden geçýän umumy toguň formulasyny (8.3) we onuň elektron we deşik düzüjilerini göz önünde tutup ýazýarys:

$$I_{pe} = S_e e \frac{p_{n0}}{\tau_p} L_p \left\{ \exp \left[\frac{eU_e}{kT} \right] - 1 \right\} \approx S_e e \frac{p_{n0}}{\tau_p} L_p \exp \left(\frac{eU_e}{kT} \right) \quad (8.4)$$

bu ýerde S_e - emitter geçişiň meýdany.

Zaryadyň diffuziýa aralygynyň $L = \sqrt{D\tau}$ - dygyndan peýdalanylýp (8.4) deňligi şu göznüşde ýazyp bolýar.

$$I_{pe} \approx S_e e D_p \frac{p_{n0}}{L_p} \exp \left(\frac{eU_e}{kT} \right) \quad (8.5)$$

Emitter togunyň elektron düzüjisiniň tapylyşy (8.4) formuladan tapawutlanýar. Sebäbi bazadan 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 hereketiniň diffuziýa häsiýetine eýedigini sebäpli, togyň elektron düzüjisiniň ululygy elektronlaryň konsentrasiýasynyň gradiýenti bilen kesgitlenilýär.

$$I_{ne} = S_e e D_n \left| \frac{dn}{dx} \right| \quad (8.6)$$

bu ýerde x oky emitterden kollektora tarap urukdyrylandyr.

Bazadaky elektronlaryň konsentrasiýasynyň gradiýentini kesgitläliň. Emitter geçişde elektronlaryň konsentrasiýasy

$$n(0) = n_{p0} \exp \frac{eU_e}{kT} \quad (8.7)$$

Kollektor geçişde $n(\omega)=0$ diýeliň.

Onda

$$\left| \frac{dn}{dx} \right| \approx \frac{n(0)-n(\omega)}{\omega} = \frac{n_{p0}}{\omega} \exp \frac{eU_e}{kT} \quad (8.8)$$

$\frac{dn}{dx}$ - ýň bahasyny (8.8) deňlikden (8.6) deňlige goýup alýarys.

$$I_{ne} = S_e e D_n \frac{n_{p0}}{\omega} \exp \frac{eU_e}{kT} \quad (8.9)$$

Emitter togynyň $I_e = I_{ne} + I_{pe}$ bolýandygyny göz önünde tutup, hem-de (8.2), (8.5) we (8.9) deňlikleri kombinirlemek esasynda emitterin effektiwligi üçin deňligi alýarys:

$$\gamma = \left(1 + \frac{p_{n0}}{n_{p0}} \cdot \frac{D_p}{D_n} \cdot \frac{\omega}{L_p} \right)^{-1} \quad (8.10)$$

Diffuziýa koeffisiýentini Eýnşteýniň deňligine esaslanip zarýadyň hereket edililigi bilen çalyşsaň, massanyň saklanmak kanunyna esaslanyp, esasy däl zarýadlaryň konsentrasiýasyny esasy zarýadlaryň konsentrasiýasynyň üsti bilen aňladyp, (8.10) deňligi amatly görnüşde ýazyp bolýar.

$$\gamma = \left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \cdot \frac{\omega}{L_p} \right)^{-1} \approx 1 - \frac{\sigma_p \omega}{\sigma_n L_p} \quad (8.11)$$

Tranzistoryň emitteriniň effektiwligini bire golaýlatmak üçin, (8.11) deňlikden görünişi ýaly, emitter baza seredende has ýokary derejede garyndyly bolmaly ($\sigma_n \gg \sigma_p$) we bazanyň galyňlygy örän ýuka bolmaly ($\omega \ll L_p$).

Bazanyň ýuka bolmagy bazanyň geçirijilik koeffisiýentini, ýagny emitterden inžektirlenen elektronlaryň kollektor geçişe ýetýäniň sanyny artdyrmak üçin hem wajypdyr:

$$\beta = \left(\frac{\partial I_{nk}}{\partial I_{ne}} \right)_{U_k} \quad (8.12)$$

Bu koeffisiýent birden kiçi, sebäbi elektronlaryň bir bölegi kollektor geçişe ýetmän rekombinirlenýärler. Baza bölegi näçe ýuka boldugyça bire golaýlaýar. Haçan-da ($\omega \ll L_n$) bolan ýagdaýynda, hasaplamalara esaslanyp alýarys:

$$\beta \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{L_n} \right)^2 \quad (8.13)$$

Kollektoryň effektiwligi şeýle hasaplanýar:

$$\alpha^* = \left(\frac{\partial I_k}{\partial I_{nk}} \right)_{U_k} \quad (8.14)$$

eger-de kollektor p-n-geçisde urgy ionlaşmasy (udarnaýa ionizasiýa) ýüze çykýan bolsa, α^* birden uly bolup biler.

Tranzistoryň adaty iş režiminde, haçan-da $U_k \ll U_{bowS}$ bolanda, α^* ululygy bire ýakyndyr.

Şeýlelikde (8.1), (8.2), (8.12) we (8.13) denlemelerden tranzistoryň güýçlendirme koeffisiýenti α -ny tapýarys:

$$\alpha = \gamma \beta \alpha^* \quad (8.15)$$

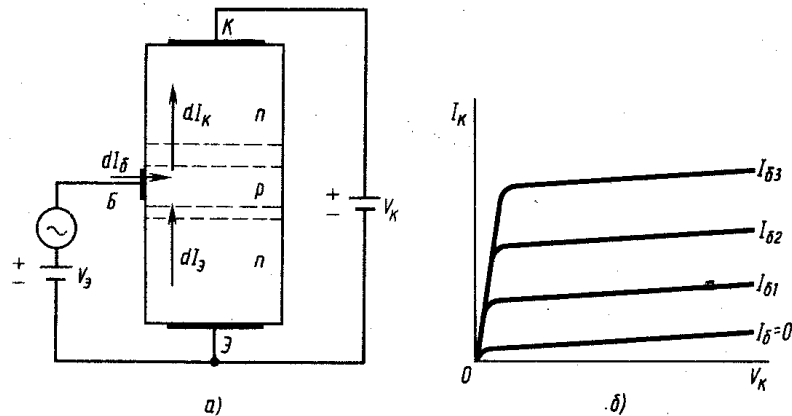
Bu deňlige γ we β -nyň bahalaryny (8.11) we (8.13) deňlikden alyp goýup, $\alpha^* = 1$ diýip hasap edip, hem-de ikinji derejeli kiçi goşulyjilary hasaba alman, alýarys:

$$\alpha = 1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \cdot \frac{\omega}{L_p} - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{L_n} \right)^2 \quad (8.16)$$

(8.16) deňlikden görünişi ýaly tranzistor umumy baza boýunça zynjyryra birleşdirilende togyň güýçlendirilmesi ýüze çykmaýar ($\alpha < 1$).

3. Tranzistorlaryň umumy emitter boýunça elektron zynjyryna birleşdirilişi.

Köplenç tranzistor zynjyra umumy emitter shemasy boýunça birleşdirilýär (8.3. surat). Şeýle zynjyryda tranzistor toguň güýçlendirijisi hökmünde işleýär. Bu ýerde giriş togy emitterden geçýän tok bolman, baza togudyr I_b . Baza, emitter we kollektor toklarynyň üýtgemeleri öz aralarynda aşakdaky gatnaşyk bilen baglanşýarlar.



8.3. Surat. Umumy emitter boýunça tranzistorlaryň elektron zynjyryna birleşdirilişi (a) we çykyş häsiýetnamalary (b).

$$dI_k = dI_e - dI_b \quad (8.17)$$

Başgaça seredeniňde,

$$dI_k = \alpha \cdot dI_e \quad (8.18)$$

(8.17) we (8.18) denlikleri bilelikde çözüp alýarys:

$$dI_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot dI_b = B_0 dI_b \quad (8.19)$$

bu ýerde:

$$dI_k = \alpha \cdot dI_e = \alpha (dI_k + dI_b)$$

$$dI_k = \alpha \cdot dI_k + \alpha \cdot dI_b$$

$$dI_k - \alpha \cdot dI_k = \alpha \cdot dI_b$$

$$dI_k (1 - \alpha) = \alpha \cdot dI_b$$

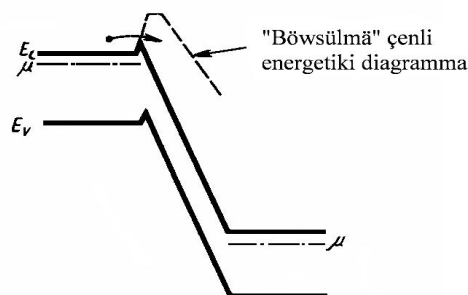
$$dI_k = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot dI_b = B_0 \cdot dI_b.$$

Bu ýerde B_0 - tranzistor umumy emitter boýunça birleşdirilende toguň güýçlendirilme koeffisiýenti. Adaty ulanylýan tranzistorlar üçin $\alpha \approx 1$, onda $B_0 \gg 1$. Meselim, ýokary hilli tranzistorlar üçin $\alpha = 0,995$ diýseň, onda (8.19) deňlige laýyklykda $B_0 = 200$.

Umumy emitter zynjyry boýunça birleşdirilen tranzistorda toguň güýçlendirilmesiniň fiziki tebigatyna seredeliň. Goý omiki seplesikden 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 baryär we kollektor geçişiň meýdany tarapyndan dartylyp alynýär. Emitterden giden elektrona derek täze elektron gelyär. Şeýlelikde, bu hadysa yzygiderli dowam etýär. Haçan-da baza geçen deşikler ýuwaş-ýuwaşdan emitterden baza geçýän elektronlar bilen rekombinirlenen ýagdaýynda bu proses togtaýar. Şeýlelikde, baza sepinden geçen her bir deşik, gaty köp elektrony emitter we kollektor geçişinden geçmeklige mejbur edýär. Umuman aýdanda, her baza sepinden geçen deşik, emitter we kollektor geçişlerinden birnäçe esse köp elektronlary geçmäge mejbur edýär.

Umumy emitter zynjyry boýunça birleşdirilen tranzistoryň çykyş häsiýetnamalary 8.3b-suratda görkezilýär. Çyzgydan görnüşi ýaly umumy emitter zynjyry boýunça birleşdirilen tranzistoryň çykyş häsiýetnamalary umumy baza zynjyry boýunça birleşdirilen tranzistoryň çykyş häsiýetnamalaryndan örän uly gyşarandyr, sebäbi (8.19) laýyklykda U_k – nyň artmagy bilen baglanyşkly bazanyň ýukalmagy α -nyň örän kiçi ululyga artmagyna we netijede B_0 -yň has köp artmagyna 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 gatnaklary bir-birine birleşen ýagdaýynda ýüze çykyp bilýär. Bu ýagdaýda kollektor geçişinde ters ugura naprýaženiýenyň artmagynyň dowam etdirilmegi, emitter geçişinde potensial päsgelçiligiň peselmegine getirýär, şeýlelikde, emitterden kollektora tarap geçýän tok artýar (8.4 surat).

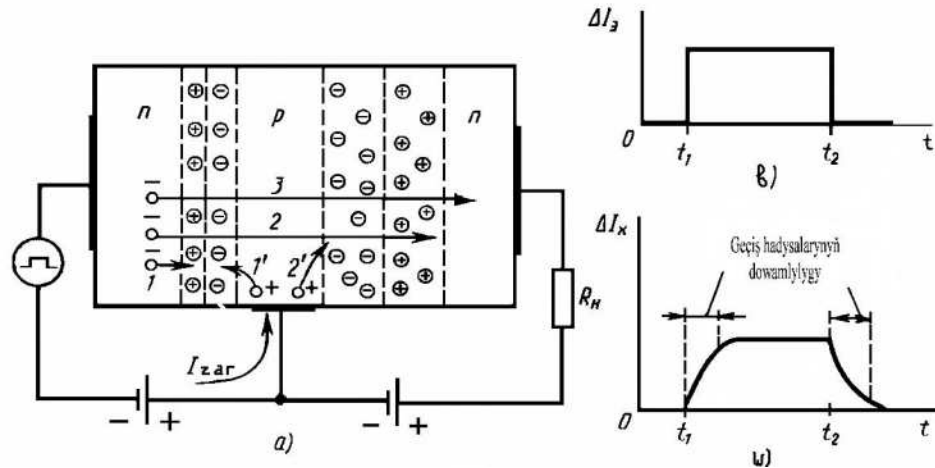


8.4. Surat. N-p-n – tranzistoryň baza "deşilen" (böwsülen) ýagdaýyndaky energetiki diagrammasy.

4. Tranzistorlarda geçiş hadysalary. Dreyf tranzistorlary.

Umumy baza zynjyry boýunça birleşdirilen n-p-n-tranzistordaky geçiş hadysalaryna seredeliň (8.5a-surat). Emitter geçişden toguň göniburçly impulsy göýbereliň (8.5b-surat). Kollektor togunyň impulsy özüniň durnukly ýagdaýyna (bahasyna), bada-bat ýetmän, belli bir wagtdan soň ýetýär. Edil şoňa meňzeş, emitter togunyň impulsy gutarandan soň, kollektor togy birbada peselmän, ýuwaş-ýuwaşdan peselýär. Geçiş hadysalarynyň dowamlylygy, emitter we kollektor p-n-geçişleriň päsgelçilik sygymlarynyň zarýatlanma we zarýatsyzlanma wagty bilen hem-

de emitterden inžektirlenen elektronlaryň diffuziýa esasynda bazadan geçiş wagty bilen kesgitlenýär.



8.5. Surat. Tranzistorlarda geçiş hadysalarynyň çyzgyda görkezilişi (a); emitter togunyň impulsy ΔI_e (b); kollektor togunyň impulsy ΔI_k (w).

Emitter togunyň artmagy, emitter-baza p-n-geçişde göni ugura daşky elektrik meýdanynyň artmagy bilen ýüze çykyp, göwrüm zaryadynyň daralmagyna getirýär. Önden belli boluşy ýaly p-n-geçişiň göwrüm zaryadynyň galyňlygynyň ýukalmagy, p-n-geçişe tarap n-tarapdan elektronlaryň, p-tarapdan bolsa deşikleriň süýşmegi esasynda bolup geýýär (8.5 surat, 1, 1' çyzyklar). Şeýlelikde, impulsyň başynda emitter togy, elektronlary p-n-geçişden inžektirlemäge harç bolmanda, p-n-geçişiň araçäginde göwrüm zaryadyny kompensirlemäge, başgaça aýdanynde, emitter p-n-geçişiň päsgelçilik sygymyny zaryatlandyrmaga harç bolýar. Bu sygymyň zaryad wagty $R_{yzyg} C_{be}$ deňdir, bu ýerde C_{be} - emitter p-n-geçişiň sygymy, R_{yzyg} - tranzistoryň emitter we baza bölekleriniň yzygider garşylygy we olara omiki seplesmeleriň, emitteriň daşky zynjyrynyň garşylygy.

Tranzistoryň hususy yzygider garşylygy köplenç bazanyň garşylygyna deň diýlip alynýar, sebäbi päsgelçilik sygymyny zaryadlandyrmak üçin, zaryad baza seplesiginden baza böleginiň üsti bilen, emitter p-n-geçişe barýar (8.5a-surat).

Emitter p-n-geçişiň potensial päsgelçiliginiň beýikliginiň peselmegi bilen, tranzistoryň emitterinden, baza köp elektron geçip, kollektora tarap diffundirlenýär. Žaryadlaryň diffuziýasy olaryň haotik hereketi bilen kesgitlenilip, olaryň kábiri kollektor p-n-geçişe örän çalt barsa, başga birnäçesi has haýal barýar. Şol sebapli hem, emitter togunyň inžeksiýasynyň gaty çalt ýüze çykmagyna (bada-batlygyna) seretmezden, kollektor togy ýuwaş-ýuwaşdan üýtgeýär we zaryadlaryň bazadan diffuziýasynyň ortaça wagty bilen kesgitlenilýär. Esasy däl zaryadlaryň τ ýaşayş wagtynda ortaça diffuziýa aralygyny L diýip hasap edip zaryad geçirijileriniň bazadan diffuziýa wagtyny hasaplalyň:

$$L = \sqrt{D\tau}$$

Bu ýerden, ω aralyga elektronyň diffuziýa wagty,

$$t_{diff} = \frac{\omega^2}{D_n}, \quad (8.20.)$$

Haçan-da $\omega \ll L_n$, bolan ýagdaýynda $t_{diff} \ll \tau$.

Haçan-da elektron kollektor p-n-geçişiň göwrüm zaryadynyň meýdanyna ýetende, ol kollektor p-n-geçişiň meýdany 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. Kollektor p-n-geçişde daşky elektrik meýdany kiçelýär we göwrüm zaryadynyň giňligi daralýar. Kollektor p-n-geçişden aşyrylan elektronlar daşky zynjyra geçmän, p-n-geçişiň göwrüm zaryadynda galýar, şeýlelikde, kollektor

tarapyndan (n- tarapdan) göwrüm zarýadyny peseldýär. Baza tarapyndan göwrüm zarýady, baza sepinden gelýän deşikleriň hasabyna peselýär. Umuman kollektor geçişde zarýadyň üýtgemesi ΔQ -ny şeýle tapmak bolar:

$$\Delta Q = C_{bk} \cdot \Delta U_d = C_{bk} \cdot R_d \cdot \Delta I_k, \quad (8.21.)$$

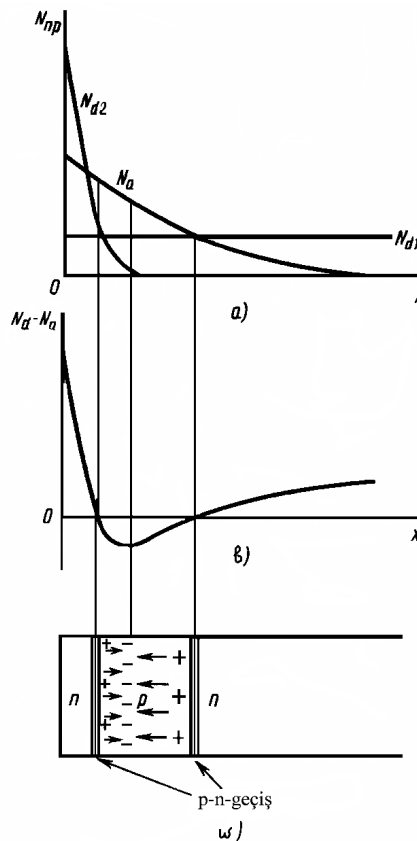
Bu ýerde, C_{bk} - kollektor p-n-geçişiň päsgelçilik sygygymy, U_d – daşky ýükde naprýaženiýanyň çökmesi, R_d – daşky ýükiň garşylygy, ΔI_k - kollektor togynyň artmasy.

Zarýadyň üýtgemesi toguň ΔI_k üýtgemesi esasynda bolýanlygy sebäpli, belli bir wagtdan soň bolup geçer.

$$t_{zar} = \Delta Q / \Delta I_k = C_{bk} \cdot R_d \quad (8.22.)$$

Kollektor zynjyryndaky tok, emitter togunyň impulsy tamamlanandan soňra, emitter we kollektor p-n-geçişleriň päsgelçilik sygymlarynyň zarýatsyzlanma togunyň hem-de impulsyň dowam etýän wagtynda inžektirlenen zarýadlaryň kollektora toplanmaklarynyň hasabyna dowam edýär.

Geçiş hadysalarynyň dowamlylygy seredilen hadysalaryň iň köp wagtda dowam etýäni bilen kesgitlenilýär. Köplenç bu hadysalaryň wagtda boýunça iň dowamlysy zarýadlaryň bazadan diffuziýa wagty bolýar (8.22). Bu wagty azaltmak üçin mümkin boldugyndan bazanyň galyňlygyny kiçeltmeli. Bazanyň galyňlygyndan başgada esasy däl zarýadlaryň diffuziýa koeffisiýenti geçiş hadysalarynyň dowamlylygyny kesgitleýär (n-p-n-tranzistorda elektronlar, p-n-p- tranzistorda deşikler). Elektronlaryň deşiklere seredeniňde diffuziýa koeffisiýentiniň hiç bolmanda iki esse, käbir ýagdaý-da bolsa 10÷20 esse uludygyny göz önünde tutsaň, onda deň şertlerde n-p-n-tranzistorlarda p-n-p- tranzistorlara seredeniňde utgaşma wagty kiçidir, çaltlygy, ýagny iş ýygyllygy ýokarydyr.



8.6. Surat. Dreýf tranzistorynyň gurluşy.

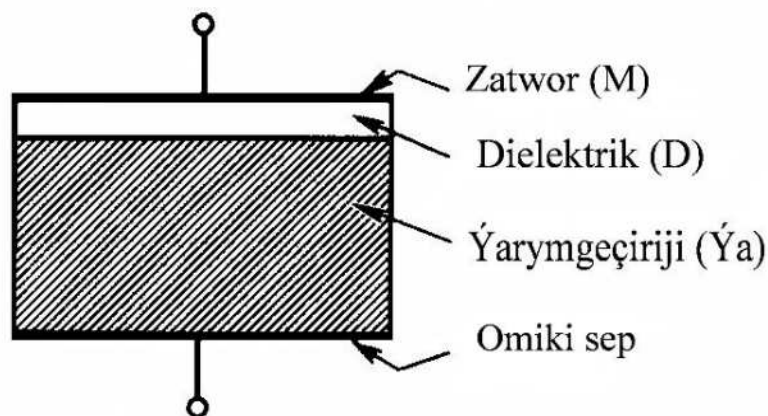
a – garyndylaryň koordinata boýunça paýlanyşy (x – üste görä aralyk; N_{d1} – donorlaryň ilki başky konsentrassiýasy; N_{d2} , N_a – üstde diffuziýa arkaly girizilen donorlaryň we akseptorlaryň konsentrassiýasy); b – kompensirlenmedik garyndylaryň konsentrassiýasy; w – zarýadyň paýlanyşy we garşylykly meýdan.

Tranzistorlarda, haçan-da bazada «urukdyryjy» meýdan döredilinde utgaşma wagty has hem kiçelýär. Bu içki urukdyryjy meýdan emitterden kollektora hereket edýan zarýadlaryň tizligini artdyrýar. Şeýle meýdan köplenç tranzistorlaryň bazasynda garyndynyň konsentrasiýasyny koordinata boýunça üýtgedip alynýar. Dreýf tranzistorynyň n-p-n görnüşi, emitter we baza bölegi n-görnüşli ýarymgeçiriji plastinasyna akseptor we donor garyndylarynyň diffuziýasy esasynda döredilýär (8.6.surat). 8.6b suratda dreýf tranzistorynda, kompensirlenmedik zarýadlaryň paýlanylyşy görkezilendir. Tranzistoryň bazasynda zarýadlaryň şeýle paýlanylyşy, emitterden baza inžektirlenen zarýadlar üçin içki, bir ugura urukdyrylan täsiri bolan, meýdan döredip, zarýadlaryň geçiş tizligini artdyrýar.

Tranzistorlar häzirki zaman elektronikasynnda, radioelektronikada, mikroelektronikada, hasaplaýyş-maglumat, aragatnaşyk tehnikadasynyň ählisinde giňden peýdalanylýar. Häzirki zaman tehnikasyny we tehnologiýany enjamlaryny tranzistorsyz, düzüminde tranzistor bar bolan zynjyrsyz göz önüne getirmek mümkin däl.

6. Meýdan tranzistorlary. Meýdan tranzistorlarynyň gurluşy we işleýiş prinsipi.

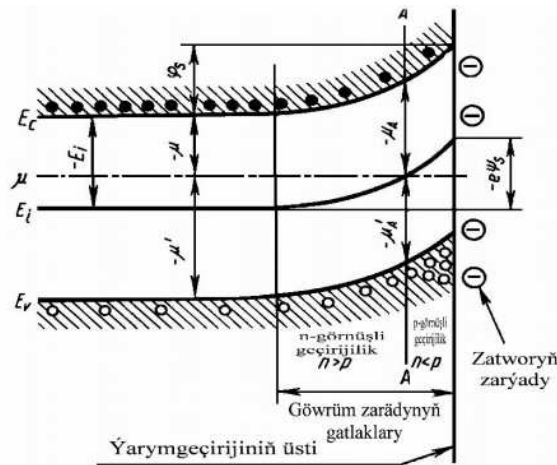
Soňky ýyllarda elektronikada, ýarymgeçirijiniň üstki gatlagyndaky ýüze çykyan hadysalar ulanylýan abzallaryň (pribor) peýdalanylyşy gün-günden artýar. Şeýle priborlaryň esasy düzüji bölegi metal-dielektrik-ýarymgeçiriji (MDÝ) strukturalar bolup durýar (8.7 surat). Köplenç metal bilen ýarymgeçirijiniň aralygyndaky dielektrik gatlagy hökmünde okisiň gatlagy, meselem SiO_2 ulanylýar. Şeýle ýarymgeçiriji gurluşlara köplenç metal-okisel-ýarymgeçiriji strukturalar diýilýär. Bu strukturalardaky ýuka metal gatlagy köplenç wakuum bugartmasy (tozanlatmasy) esasynda dielektrigiň üstüne çökdürilýär. Bu gatлага, elektroda zatwor diýlip at berilýär.



8.7. Surat. MDÝ-strukturanyň çyzgydaky görnüşi.

Eger-de zatwora ýarymgeçiriji plastinkasyna görä naprýaženiýe berilse, onda ýarymgeçirijiniň üstünde göwrüm zarýadynyň gatlagy ýüze çykyp, onuň alamaty zatwora berlen naprýazeniýanyň alamatyna tersdir. Zatworyň ýakynyndaky, ýagny ýarymgeçirijiniň zatwora galtaşýan gatlagynda, zarýatlaryň konsetrasiýasy ýarymgeçirijiniň göwrümindäkiden has tapawutlanýar.

Ýarymgeçirijide zarýatlanan üstki gatlag bilen göwrümiň arasynda potentsiallaryň tapawudy ýüze çykyp, energetiki zonanyň gysarmasyna getirýär. Haçan-da zatwor otrisatel zarýatlansa zona ýokary gysarýar, sebäbi elektronlar göwrümden üste tarap süýşende olaryň potensial energiýasy artýar (8.8. surat).



8.8. Surat. Zatwor otrisatel zarýatlanan ýagdaýynda n-görnüşli ýarymgeçirijiniň üstki gatlagynda energetiki zonanyň egreýmesi (gyşarmasy).

Eger-de zatwor položitel zarýatlanan bolsa onda, zona aşak gyşarýar. 8.8. suratda n-görnüşli ýarymgeçiriji haçan-da zatwora otrisatel zarýad berlen ýagdaýynda görkezilen. Bu ýerde U_s - ýarymgeçirijiniň göwrümi bilen üstki gatlagynyň arasyndaky potentsiallaryň tapawudy; $\phi_s = -eU_s$ - zonanyň üstdäki egriligi; E_i - gadagan zonanyň ortasy. 8.8. suratdan görnüşi ýaly ýarymgeçirijiniň göwrümünde Fermiň derejesiniň geçiş zonanyň düýbinden uzaklygy, Fermiň derejesiniň walent zonanyň depesinden uzaklygyndan kiçi. Şol sebäpli hem, n-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin garaşylyşy ýaly, elektronlaryň konsentrasiýasy n_0 deşikleriň konsentrasiýasyndan p_0 -dan uludyr $n_0 > p_0$. Emma ýarymgeçirijiniň üstki gatlagynda onuň tersine, zonanyň egreýmesi sebäpli Fermiň derejesiniň geçiş zonanyň düýbinden uzaklygy üznüksiz artýar, onuň tersine Fermiň derejesiniň walent zonanyň depesi bilen aralygy üznüksiz azalýar. Suratdan görnüşi ýaly AA kesikde bu aralyklar deňleşýär ($-\mu_a = -\mu_A^1$) we ýarymgeçiriji hususy ýarymgeçirijä öwrülýär: $n = p = n_i$. AA kesikden sagda $p > n$ bolýar, ýagny ýarymgeçiriji p-görnüşli ýarymgeçirijä öwrülýär. Bu ýagdaýda üstki gatlakda üst p-n-geçişi emele gelýär. Köplenç zonanyň üstki egreýmesi kT ululygynyň üsti bilen aňladylýar we Y_s bilen belenenilýär.

$$Y_s = \frac{eU_s}{kT} = -\frac{\phi_s}{kT} \quad (8.23)$$

Bu ýerde $\phi_s = -eU_s$.

1.Ýarymgeçirijilerde üstki gatlagyň emele gelmegi bilen baglanyşykly üç sany wajyp hadysanyň ýüze çykmagy mümkin: zarýad garyplaşmasy, alamatyny çalyşmak we zarýad bilen baýlaşmak. Bu üç ýagdaý hem metal-dielektrik-ýarymgeçiriji strukturalarda zatwor bilen ýarymgeçirijiniň arasyndaky meýdana baglylykda ýüze çykyp bilýär. Haçan-da zatworyň zarýadynyň alamaty ýarymgeçirijiniň esasy zarýtlarynyň alamaty bilen birmeňzeş bolan ýagdaýynda, zarýada garylaşan gatlak emele gelýär. Şeýle zarýadyň emele getiren zonanyň egreýmesi n-görnüşli ýarymgeçirijilerde geçiş zonanyň düýbinden Fermiň derejesine çenli aralygyň we p-görnüşli ýarymgeçirijilerde walent zonanyň depesine çenli aralygyň uzaklaşmagyna getirýär. Bu aralygyň ulalmagy üstki gatlagyň esasy zarýd geçirijileriň konsentrasiýasynyň azalmagyna, garyplaşmagyna getirýär. N-görnüşli ýarymgeçirijilerde, esasy zarýdlaryň alamaty bilen gabat gelýän zatworyň zarýadynyň ýokary dykzlygynda, üstki gatlagda ýakynlaşmagy bilen Fermiň derejesinden walent zonasynyň depesine çenli aralyk geçiş zonasynyň düýbüne çenli aralykdan kiçidir. Şol sebäpli hem ýarymgeçirijiniň üstki gatlagynda, elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasynyň örän az bolmagyna garamazdan, esasy däl zarýadlaryň (deşikleriň) konsentrasiýasy esasy zarýadlaryň konsentrasiýasyndan ýokary bolýar. Ýarymgeçirijiniň edel üstünde, esasy däl zarýadlaryň konsentrasiýasy ýarymgeçirijiniň göwrümündäki esasy zarýadlaryň konsentrasiýasyna deň, hatda ondanam kop bolmagy mümkin. Şeýle, ýarymgeçirijiniň göwrümüne

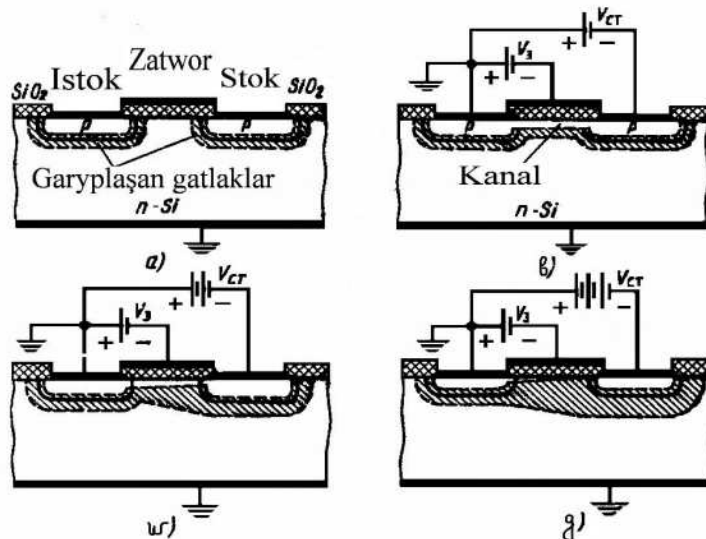
seredeniňde ters geçigijilikli, ýokary geçirijilige eýe bolan gatlag, alamatyny çalşan (inversion) gatlak diýilýär. Inversion gatlakdan ýarymgeçirijiniň içine, göwrümüne çuňlaşsaň zaryad boýunça garyplaşan gatlak başlanýar.

Eger-de zatworyň zaryadynyň alamaty ýarymgeçirijiniň asasy zaryad geçirijileriniň alamatyna garşylykly bolsa, onda zatworyň zaryadynyň täsiriniň netijesinde esasy zaryadlar ýarymgeçirijiniň üstki gatlagyna çekilýär we üstki gatlagy aşa zaryadlanýar (obogaşeniýe). Şeýle gatlag aşa zaryadlanan diýilýär.

Ýarymgeçirijiniň üstki gatlagynyň örän pes zaryadlanan ýa-da zarydsyzlanan ýagdaýynda, onuň ölçegi (giňligi) ekranlaşmanyň deňäý uzynlygy bilen kesgitlenilýär:

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 kT}{e^2 n_0}}, \quad (8.24)$$

Bu ýerde ε - ýarymgeçirijiniň dielektrik syzyjylygy, n_0 - ýarymgeçirijide esasy zaryadlaryň konsentrasiýasy. Gatlagyň L_D aralygynda ýarymgeçirijiniň göwrümüne seredeniňde, elektrik meýdanynyň güýjenmesi, potensial we esasy zaryadlaryň konsentrasiýasy üstki gatlag a seredeniňde e gezek kiçelýär.



8.9. Surat. MDÝ-tranzistoryň işleýşine düşündiriş: a – MDÝ-tranzistoryň gurluşy; b – istok bilen stokyň arasynda kanalyň emele gelişi; w – istok bilen stokyň arasynda naprýaženiýanyň artmagy bilen kanalyň kiçelmegi; g – kanalyň ýapylmagy.

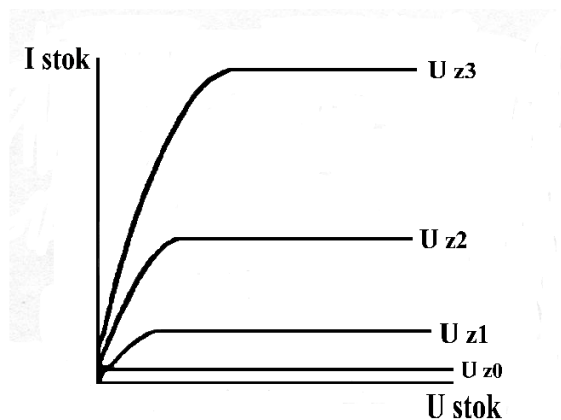
Integral elektronikasýnda MDÝ-strukturalar tranzistorlary, dürli integral mikroshemalary taýýarlamakda giňden peýdalanylýar. 8.9a-suratda izolirlenen zatwory MDÝ-tranzistoryň gurluş görnüşi görkezilen. Tranzistoryň esasy bölegi n-Si ýarymgeçirijisi bolup, ýokarky gatlagynda diffuziýa usuly bilen p-görnüşli gatlar döredilen. P-görnüşli gatlagyň birine istok beýlekisene stok diýlip at berilýär. Bu iki bölegiň aralygy, ýagny istok bilen stokyň aralygy, metal gatlak bilen örtülen we metal okis gatlagy bilen izolirlenen. Meýdan tranzistorynyň bu metal elektrodyna zatwor diýlip at berilýär. Tranzistoryň n- we p-bölekleriniň arasynda istok we stok p-n-geçişi ýüze çykýar. 8.9b suratda meýdan tranzistorynyň zynjyra birikdirlişi görkezilen: stok naprýaženiýasynyň U_{st} , istoka položitel polýusy we stoka - otrisatel polýusy birleşdirilýär. Zatwora U_{zat} tok çeşmesiniň minus polýarly tarapy birleşdirilýär. Ýönekeýlik üçin okis gatlagynda potensiallaryň tapawudy, zaryd we üst derejeleri ýok diýip kabul edeliň.

Haçan-da zatwora naprýaženiýa berilmedik ýagdaýynda, üstki gatlagyň häsiýeti ýarymgeçirijiniň göwrümünden hiç hili tapawutlanmaýar. Sebäbi stok p-n-geçişine ters ugura elektrik meýdany berlip, istok bilen stokyň arasynda örän uly garşylyk ýüze çykýar. Zatwora

otrisatel elektrik meýdanynyň berilmegi ilki bilen zatworyň aşak tarapynda (ýarymgeçirijiniň üstki gatlagynda) garyplaşan zaryadly gatlagy, uçastogy emele getirýär, käbir U_{porog} naprýaženiýadaň soňra inwersni p-zolak (kanal) emele gelyär, şeýlelikde, istok we stok emele gelen p-görnüşli geçiriji kanal bilen birleşýär. Eger-de zatworda naprýaženiýa $U_{z,\text{por}}$ -dan uly bolsa onda kanal giňelýär, stok bilen istokyň aralygyndaky garşylyk kiçelýär. Şeýlelikde, seredilýän struktura, daşdan dolandyrylýan rezistora meňzeş bolýar.

Emma diňe stok naprýaženiýasynyň kiçi bahalarynda kanalyň garşylygy zatwordaky naprýaženiýe bilen kesgitlenilýär. Stok naprýaženiýasynyň artmagy bilen zaryad geçirijileri kanal boýunça stoka tarap süýşýärler, stok p-n-geçişinde göwrüm zaryady giňelýär we kanal daralýar. Stok togunyň stok naprýaženiýasyna baglylygy egriçyzykly bolýar. Zatworyň aşagynda kanalyň daralmagy bilen, stoga golaýladyça erkin zaryadlaryň sany azalýar. Kanal boýunça istokdan stoga çenli aralykda togyň birmeňzeş bolmagy üçin, kanal boýunça elektrik meýdany birmeňzeş bolmaly däldir, ýagny onuň güýjenmesi stoga golaýladygyça artmalydyr.

Ondan başga-da, kanal boýunça erkin zarydlaryň gradiýentiniň emele gelmegi togyň dyklyzlygynyň dreýf düzüjisiniň ýüze çykmagyna getirýär. Stok naprýaženiýasynyň belli bir bahasynda $U_{st,\text{porog}}$ stogyň ýakynynda kanal ýapylýar we meýdanyň ýene-de artmagy bilen kanal gysgalýar (8.9, g surat). Emma kanalyň ýapylmagy stok dogunyň bes edilmegine getirmeýär, sebäbi kanaly ýapan göwrüm zaryadynyň gatlagynda elektrik meýdany deşikleri üst boýunça dartýar. Haçan-da zaryad geçirijileri kanaldan diffuziýa esasynda bu ýere düşende, olar meýdanyň täsirine düşýär we stoga zyňylýar. Şeýlelikde, stok naprýaženiýasynyň artmagy bilen zaryad geçirijileriniň stoga tarap hereketi arassa dreýf häsiýetli bolman, dreýf-diffuziýa häsiýetine (mahanizmine) eýe bolýar. MDP-tranzistorlarda kanalyň ýapyk ýagdaýundaky toguň akýş mehanizmi, umumy ýagdaýda p-n-geçişe ters ugura elektrik meýdany berlende toguň akýş mehanizimi bilen meňzeşdir. P-n-geçişde diffuziýa esasynda esasy däl zaryadlar göwrüm zaryadynyň gatlagyna girýärler we onuň meýdanynyň täsirine düşýärler.



8.10. Surat. MDÝ-tranzistoryň wolt-amper häsiýetnamasy.

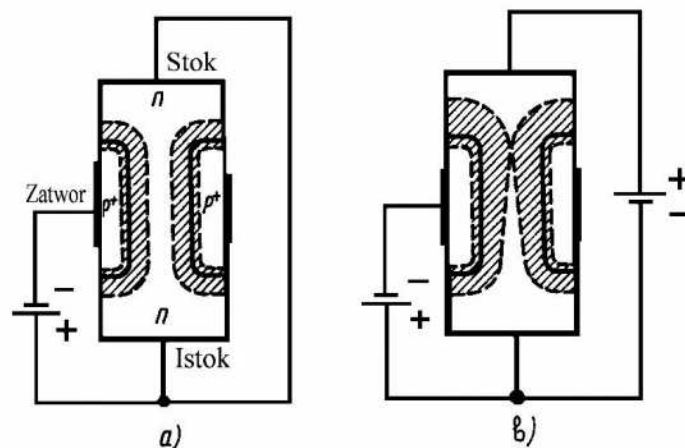
Teoriýanyň we tejribäniň görkezişi ýaly, kanal ýapylandan soň stok togy I_{stok} özüniň doýgun bahasyna eýe bolýär (8.10 surat). Stogyň doýgün togunyň bahasy zatwordaky naprýaženiýa U_{zat} baglydyr: U_{zat} näçe uly bolsa şonça-da kanal giň bolup, ondan geçýän doýgun tok uludyr. Bu adaty tranzistor effekti bolup, zatwordaky naprýaženiýe bilen (giriş zynjyrynda) stok togy dolandyrylýar (zynjyryň çykyşyndaky tok). MDÝ-tranzistorlaryň esasy aýratynlygy onuň girişiniň örän uly garşylygynyň bolmagydyr, ýagny olaryň girişi bloup kondensator – ýagny ýarymgeçiriji bilen arasy izolirlenen metal zatwory hyzmat edýär. MDÝ-tranzistorlaryň zatworyndan syzýan toguň ululygy örän kiçi bolup 10^{-15} A töweregidir we ony 10^{-17} A çenli azaltmak mümkin.

MDÝ-tranzistorlarda meýdan effekti ulanylýar, şol sebäpli hem şeýle tranzistorlara *meýdan* tranzistorlary diýlip at berilýär. Baza bölegine esasy däl zaryadlaryň inžeksiýasy bolup geçýän *bipolýar* n-p-n we p-n-p tranzistorlardan tapawutlylykda, meýdan tranzistorlarynda tok diňe esasy

zarýad geçirijileri tarapyndan geçirilýär. Şol sebäpli hem, şeýle tranzistorlara *unipolýar* tranzistorlar diýilýär.

Ýarymgeçiriji-dielektrik araçäginde ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynda üst derejeleri diýlip atlandyrylýan energetiki derejeler (powerhnostnyýe sostoyaniýa) ýüze çykýar, has takygy araçägiň bölünüş derejesi ýüze çykýar. MDÝ-tranzistorlarda ýarymgeçiriji bilen dielektrigiň araçäginde üst derejeleriniň bolmagy, olaryň häsiýetnamalaryna otrisatel täsirini ýetirýär, sebäbi zatworyň aşagynda ýerleşen ýarymgeçirijiniň üst gatlagyna eltilen zarýadlaryň bir bölegi üst derejeleri tarapyndan tutulýar. Meýdan tranzistorlarynyň MDÝ-görnüşini döretmekde üstünlik, kremniniň üstünde Si-SiO₂ araçäkde üst derejeleriniň dikyzlygy kiçi bolan, SiO₂ okis gatlagyny almagyň ygtybarly tehnologiýasy özleşdirilenden soň mümkin boldy.

Kremniniň oksidinde elmydama emele gelşiniň tebigaty doly bolmadyk položitel zarýad döreýär. Kremniniň oksidinde döreýän pložitel zarýadyň ululygy oksidiň alnyş tehnologiýasyna bagly bolup, koplenç ol örän uludyr. Haçan-da p-görnüşli geçirijilikli kremniý plastinasy esas nusga (podložka) görnüşinde peýdalanylssa, zatworda meýdan nola deň bolanda onuň üst gatlagynda inwersiýa gatlagy ýüze çykýar. Şeýle tranzistorlar, özünde kanaly bar bolan meýdan tranzistorlary diýlip atlandyrylýar. Ýokarda seredilen ýagdaýdan tapawutlylykda, n-görnüşli ýa-da ýokary derejede garyndyly p-görnüşli kremniý plastinasynyň esasynda taýýarlanylýan tranzistorlarda, inwersiýa gatlagyny emele getirmek üçin örän uly zarýd gerek, şol sebäpli hem zatwora berilýän naprýaženiýanyň U_{zat} , porog naprýaženiýadan $U_{z.por}$ uly bahasynda kanal emely gelýär. Öz alamaty boýunça bu meýdan n-görnüşli kremnide taýýarlanylýan tranzistorlar üçin otrisatel we p-görnüşli kremnide taýýarlanylýan tranzistorlar üçin položitel bolmalydyr.



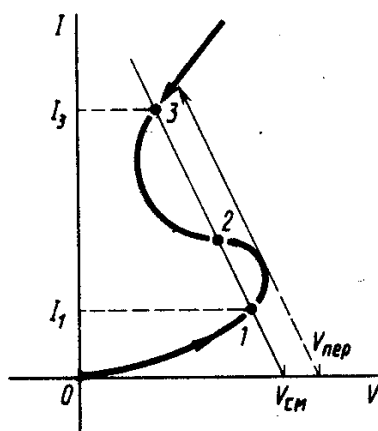
8.11. Surat. Dolandyryjy p-n-geçişli meýdan tranzistorlarynyň işleýşine düşündiriş.
a – stokdaky meýdan nol bolan ýagdaýynda; b – stokdaky meýdanyň artmagy bilen kanal ýapylan ýagdaýynda.

Unipolýar tranzistorlaryň ýene bir görnüşü dolandyryjy p-n-geçişli meýdan tranzistordyr (8.11 surat). Bu unipolýar tranzistorlarda geçiş kanaly esas ýarymgeçirijide p-n-geçişleriň göwrüm zarýadynyň garyplaşan zarýatly bölekleriniň arasynda emele gelýär. Bu aralykda emele gelen kanalyň giňligini p-n-geçişe ters ugra naprýaženiýa berip üýtgetmek mümkin. Berlen daşky naprýaženiýa baglylykda stok-istok aralykdaky garşylyk üýtgeýär. Eger-de p-n-geçişiň hemişelik naprýaženiýasynda istok-stok naprýaženiýa artdyrylsa, onda stoka ýakynlaşdygyňça kanal daralyp, naprýaženiýanyň artmagyna baglylykda, kiçi meýdana seredeniňde tok haýal üýtgeýär. Haçan-da kanal ýapylsa tok doýgyn ýagdaýyna ýetýär. Şeýle tranzistoryň kanalyndan togyň akýş mehanizimi we çykyş häsiýetnamalary MDÝ-tranzistoryňka örän meňzeşdir.

IX BÖLÜM. DENISTORLAR WE TIRISTORLAR.

1. S-görnüşli wolt-amper häsiýetnamaly abzallar. Uzyn bazaly diodlar.

Awtomatikanyň käbir gurluşlarynda we hasaplaýyş tehnikasynyň zynjyrlarynda s-görnüşli wolt-amper häsiýetnamaly ýarymgeçiriji abzallara (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 surat. Çyzgyda 1 we 3 nokat durnukly ýagdaý, emma 2-durnuksyz ýagdaý). Wolt-amper häsiýetnamanyň 1-nji nokadynda daşky naprýaženiýanyň esasy bölegi diodda 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.

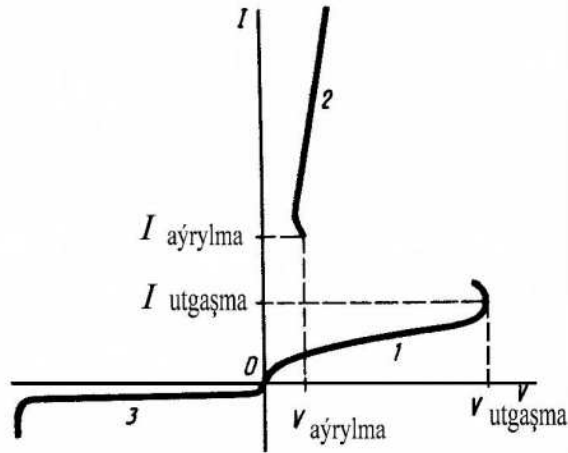
Şeýle S-görnüşli wolt-amper häsiýetnamaly (WAH) diodlaryň iň ýönekeý görnüşi, uzun bazaly diodlardyr (uzun bazaly diodlarda ýokary garşylykly gatlagyň galyňlygy esasy däl zarýadlaryň diffuziýa aralygyndan uludyr). Haçan-da göni ugura elektrik meýdany täsir edende, p-n-geçişden inžektirlenen esasy däl zarýadlar, diodyň p we n-bölekleriniň garşylygyny peseldýär, 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 ýene-de garşylygy kiçelýär. Emma geçirilen derňewlerden görnüşi ýaly, WAH-da otirisatel differensial garşylykly bölegiň ýüze çykmagy üçin, diodyň baza gatlagynyň geçirijiligi inžeksiýa toguna proporsional artman, has çalt artmalydyr. Şeýle geçirijiligiň örän çalt artmagynyň birnäçe mehanizmi bar. Birinjiden, inžeksiýanyň artmagy bilen zarýadlaryň ýaşayyş wagtynyň artmagy mümkin. Ikinjiden, zonara geçişde ýüze çykyan şöhläniň (rekombinasion şöhlelenmäniň) bazada ýuwdulyp artykmaç zarýady ýüze çykarýan bolmagy mümkin.

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

2. Dinistorlaryň we tiristorlaryň gurluşy we işleýşi.

Daşdan berilýän elektrik meýdanyň täsiri bilen dolandyrylmaýan tiristora dinistor diýilip at berilýär. Dinistoryň wolt-amper häsiýetnamasy 9.2 suratda, dinistoryň gurluşy we işleýş prinsipi 9.3. suratda görkezilen. Iki gyraky p-n-geçişlere emitter geçişleri diýilýär, ortaky p-n-geçişe kollektor geçişi diýilýär (9.3. surat). Dinistorlaryň üç sany p-n-geçişi bolup, onuň içki bölekleri az garyndylydyr. Onuň tersine iki daşky emitter bölekleri baza seredeniňde ýokary derejede

garyndylydyr. Haçan-da göni ugura naprýaženiýe berlende, plus daşky p_1 – gatлага we minus daşky n_2 – gatлага berilýar. Bu ýagdaý-da iki daşky geçiş p_1-n_1 we p_2-n_2 – göni ugura utgaşyp, içki p_2-n_1 – geçiş ters ugura daşky meýdanyň täsirinde bolýar (9.1. surat). Göni ugura meýdan berlen daşky geçişlerde garşylygyň kiçi bolmagy sebäpli, naprýaženiýanyň aglaba bölegi içki $p-n$ -geçişe goýlandyr. Şeýlelikde, umumy toguň ululygy, içki $n_1 - p_2$ geçiş tarapyndan kesgitlenilýär. Onda umumy togy tapmaklyk üçin $n_1 - p_2$ geçişden geçýän I_k togy tapmaklyk amatly bolýar.



9.2. Surat. Dinistoryň wolt-ampere häsiýetnamasy.

Bu $p-n$ -geçişiň ters ugura berlen meýdanyň täsirindeligini sebäpli, esasy zaryadlar geçişiň örän beýik potensial päsgelçiliginden aşyp bilmeýärler we geçişden akýan tok esasy däl zaryadlaryň hasabyna ýüze çykýar. Esasy däl zaryadlar ýylylyk oýandyrmasynyň (generasiýasynyň) hem-de n_1 we p_2 taraplara p_1-n_1 we p_2-n_2 – geçişlerden inžeksiýasynyň hasabyna ýüze çykýarlar (bu geçişler meýdanyň göni ugura täsirinde). Inžektirlenen zaryad geçirijileriniň aglabasy kollektor geçişine baryp ýetýärler, sebäbi strukturanyň n_1 we p_2 gatlaklarynyň galyňlygy degişlilikde esasy däl zaryadlaryň diffuziýa uzynlygyndan L_n we L_p ýuka edilip taýýarlanylýar.

Şeýlelikde, kollektor geçişinden geçýän tok, birnäçe düzüjiden, ýylylyk generasiýasy tarapyndan emele gelyän I_{ks} tokdan we emitter geçişlerinden generirlenip kollektor geçişine ýetýän elektronlaryň I_{kn} hem-de deşikleriň I_{kp} togundan durýar. Kollektor togunyň soňky iki düzüjisini şeýle düşünjäniň esasynda kesgitlemek mümkin. p_1-n_1 – geçişden inžektirlenýän deşikleriň togy bu geçişden akýan doly toguň I_1 bir bölegidir. Ol $\gamma_1 I_1$ deňdir, bu ýerde γ_1 - emitter geçişiniň inžeksiýa koeffisiýenti. p_2-n_2 geçişden geçýän elektronlaryň togunyň ululygy $\gamma_2 I_2$ deňdir, bu ýerde I_2 – geçişden geçýän doly tok, γ_1 - bu geçişiň inžeksiýa koeffisiýenti. Rekombinirlenip ýetişmedik, ýagny kollektora baryp ýeten, p_1-n_1 - geçişden inžektirlenýän deşikleriň togy I_{kp} , $\beta_1 \gamma_1 I_1$ deňdir. Şuňa meňzeş, p_2 gatlakdan geçip kollektor geçişine baryp ýeten elektronlaryň togy I_{kn} , $\beta_2 \gamma_2 I_2$ deňdir. Şeýlelikde,

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

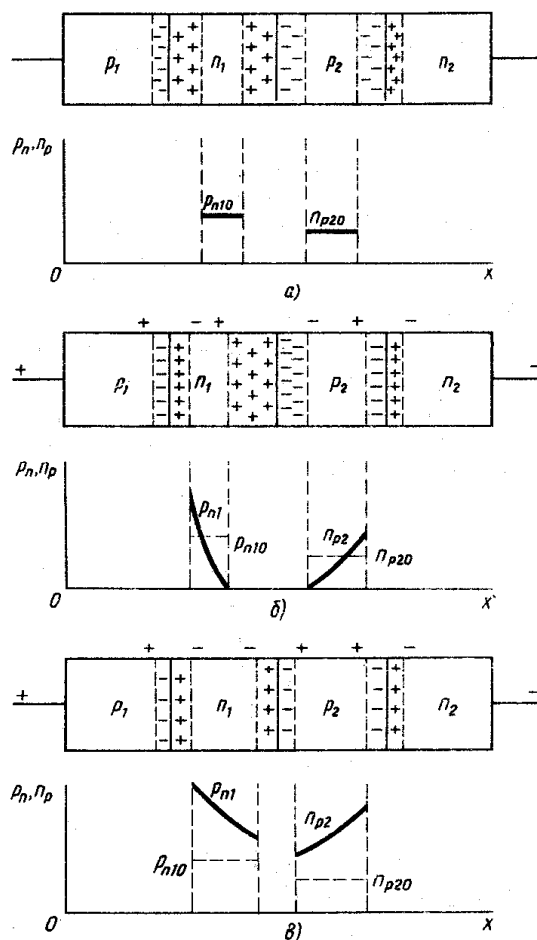
$$I_{kn} = \beta_2 \gamma_2 I_2 \quad (9.2)$$

Bu ýerde γ_1 we γ_2 – emitter geçişleriň inžeksiýa koeffisiýenti, β_1 – deşikleriň n_1 gatlakdan geçijilik koeffisiýenti we β_2 – elektronlaryň şu gatlakdan geçijilik (perenos) koeffisiýenti. I_1 we I_2 degişlilikde p_1-n_1 we p_2-n_2 – geçişden geçýän umumy tok.

Kollektor geçişinden geçýän umumy toguň ululygy:

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

Haçan-da dinistoryň üç $p-n$ -geçişinden geçýän toklar deň bolanda dinistor durnukly iş ýagdaýynda bolýar.



9.3. Surat. Tiristoryň bazalarynda göwrüm zarýadlarynyň we esasy däl zarýadlaryň konsentrasiýasynyň paýlanyşy: denagramlyk ýagdaýynda (a); daşky meýdana birleşdirilmedik (b) we birleşdirilen ýagdaýynda (b).

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

Onda

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

Bu deňligi I göre çözüp alarys

$$I = \frac{I_{ks}}{1 - (\beta_1 \gamma_1 + \beta_2 \gamma_2)} \quad (9.6).$$

Dinistor taýýarlanylanda onyň ýapyk ýagdaýynda ($\beta_1 \gamma_1 + \beta_2 \gamma_2$) ululyk birden kiçi bolar ýaly edilip işlenilip düzülýär. Emma dinistorda naprýaženiýanyň artmagy bilen deňişlilikde, kollektor geçişinde zarýadlaryň geçijilik koeffisiýenti β_1 we β_2 artýar, sebäbi bu p-n-geçişiň göwrüm zarýadynyň ini giňelýär, netijede emitter geçişinden inžektirlenen esasy däl zarýadlaryň geçmeli aralygy gysgalýar. (9.6) deňlige laýyklykda, β_1 we β_2 -niň artmagy dinisterden geçýän toguň artmagyna getirýär. Ondan başga-da, dinistordan geçýän tok, kollektor geçişine ters ugura goýulan uly naprýaženiýanyň hasabyna ýuze çykýan urgy ionizasiýanyň netijesinde hem artyp bilýär. (Bu effekt (9.3) formulada hasaba alynmadyk).

Dinistordan akýan I toguň ululygynyň artmagy bilen inžeksiýa koeffisiýentleri γ_1 we γ_2 ulalýar. Şeýlelikde dinistora goýulan 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 ymtylýar.

Emma tok şeýle ýagdaýa ýetmänkä dinistoriň iş režimi durnuksyz ýagdaýa geçýar we onuň utgaşma hadysasy başlanýar. Hakykatdan-da, $(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2) \rightarrow 1$ bolanda, kollektor geçişine ýygnanýan elektronlaryň we deşikleriň toklarynyň jemi, emitter geçişlerinden geçýän tokdan I_e köp bolup başlaýar.

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

Başga söz bilen aýdanda, kollektor p-n-geçişinden p_2 gatлага tarap zyňylýan deşikleriň sany bu gatлага inžektirlenýän elektronlary rekombinirlemek üçin gerek bolandan agdykdyr, emma n_1 gatлага elektronlaryň artykmaç mukdary zyňylýar. Şeýlelikde, n_1 - p_2 geçişiň ýakynynda ters alamatly zarýadlar bilen kompensirlenmedik elektronlar we deşikler toplanyp başlaýar. $n_1 - p_2$ - geçişiň göwrüm zarýadynyň inini, p_2 -gatлага we kollektor geçişiniň göwrüm zarýadyna ýygnanýan deşikler we beýleki tarapa ýygnanýan elektronlar, gysyp ýukaldýar. Şeýlelikde, kollektor geçişiniň potensial päsgelçiliginiň beýikligi zygiderli peselýar we bu geçişde ters ugura naprýaženiýanyň çökmesi azalýar, tersine emitter geçişlerinde göni ugura meýdan artýar. Eger $n_1 - p_2$ -geçişde naprýaženiýanyň peselmegi bilen baglansykly β -nyň kiçelmegi, emitter geçişinde göni ugura meýdanyň artmagy bilen baglansykly γ artmagy bilen kompensirlenmese, onda $(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2)$ häsiýetnama kiçelýar we dinistor ýene özüniň durnukly ýagdaýyna gelýar. Emma, bu ýagdaý, kollektor geçişinde ters ugura meýdanyň azalmagynyň netijesinde, azalýan struktura berlen naprýaženiýanyň peselmegine degişli uly toka degişlidir. (Emitter geçişlerindäki göni ugura meýdanyň uly bolmadyk artmasynyň orny örän kiçi bolýar).

Dinistoryň baza böleginde toguň mundan beýläk artmagy bilen esasy däl zarýadlar bilen kompensirlenmedik esasy zarýad geçirijileriniň artykmaç toplanmasy ýüze çykýar we netijede, kollektor geçişinde ters ugura meýdan ýenede azalýar. Şeýlelikde, dinistoryň wolt-amper häsiýetnamasynda otrisatel garşylykly uçastok ýüze çykýar. Käbir ýagdaý-da (köplenç dinistoryň WAH-sy otrisatel garşylykly uçastoga çykmaryk ýagdaýynda-da) dinistoryň bazalarynda esasy zarýadlaryň toplanmak hadysasy dolandyryşa baglansyksyz bolup geçýar we $(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2)$ häsiýetnama hemişe bire golaý ýa-da ondan uly bolýar. Geçiş hadysasy kollektor geçişiniň potensial päsgelçiliginiň beýikligi deňagramlykdaky ýagdaýyna deň we soňra ondan hem kiçi bolýança dowam edýar. (Başga söz bilen aýdanda, bu geçiş göni ugura meýdanyň täsirinde bolýar). Şeýlelikde, kollektor geçişi p_2 tarapda deşikleri we n_1 tarapda elektronlary saklap bilmeýar we olar degişlilikde n_1 we p_2 taraplary dolduryp başlaýar.

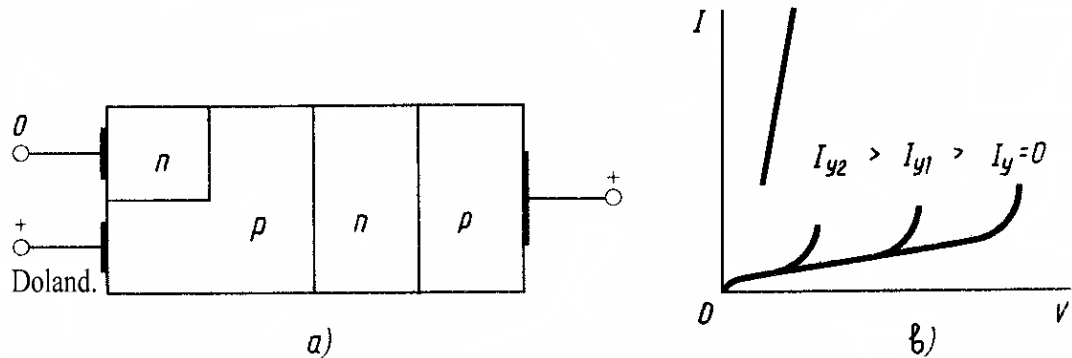
Netijede, dinistoryň bu üleşlerinde utgaşmadyk ýagdaýa degişli esasy däl zarýadlaryň paýlanyşyna derek, utgaşan ýagdaýy häsiýetlendirýän esasy däl zarýadlaryň paýlanyşy emele gelýar (9.3 b,w surat). Bu ýagdaýda dinistoryň üç p-n- geçisi hem göni ugura meýdanyň täsirinde bolýar. Onuň n_1 we p_2 gatlaklary esasy däl zarýadlar bilen doldurylan bolup, netijede emitter geçişleriniň inžeksiýa koeffisiýenti γ kiçelýar. Bu ýagdaý-da n_1 we p_2 gatlaklardan tok diňe bir esasy däl zarýadlaaryň diffuziýasy esasynda geçmän, eýsem bu gatlaklarda konsentrasiýasy uly tapawutlanmaýan esasy we esasy däl zarýadlaryň dreýfi esasynda hem geçirilýar.

Dinistoryň utgaşan ýagdaýy ýene-de durnukly ýagdaýdyr, sebäbi bu ýagdaýda $(\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2)$ ululyklaryň jemi birden kiçidir: emitter geçişleriniň inžeksiýa koeffisiýenti γ kiçelýar, kollektor geçişiniň bölüjilik täsiri erbetleşýar. Utgaşan ýagdaýynda, ýagny iş ýagdaýynda dinistoryň umumy garşylygy kiçi bolýar, şol sebäpli hem dinistorlara zygider çäklendiriji garşylyk birleşdirilýar. Utgaşan ýagdaýynda dinistoryň togy 9.2 suratda görkezilişi ýaly daşky meýdanyň naprýaženiýasynyň ululygy we çäklendiriji garşylyk bilen kesgitlenilýar. Eger dinistoriň utgaşan ýagdaýynda onuň üstünden geçýän tok azalsa, onda emitter geçişlerinden inžektirlenýän esasy däl zarýadlaryň mukdary hem azalýar. Haçan-da toguň käbir $I_{\text{ýapyk}}$ ululygynda, toguň ululygy kollektor geçişine göni ugura goýulan meýdany saklamaga ýeterlik bolmaýar, bu geçişiň garşylygy artýar we kollektor geçişi ýene-de ters ugura meýdanyň täsirinde bolýar. Bu ýagdaýda dinistora goýulan

meýdan täzeden paýlanýar, emitter geçişlerinde naprýaženiýanyň örän kiçi bölegi çökyär we netijede dinistor ýapyk ýagdaýyna geçýär.

Dinistoryň utgaşma we ýapylma prosesleri durnukly däldir. Bu prosesler lawina (oprulma) görnüşli bolup, dolandyryşa boýun egmeýär. Şol sebäpli hem dinistoryň wolt amper häsiýetnamasy, onuň durnukly stasionar ýagdaýyna degişli iki sany aýratyn uçastokdan durýar (9.2. suratda 1 we 2). Utgaşma wagtynda dinistordaky tok we naprýaženiýa zynjyryň garşylygyna, çeşmäniň naprýaženiýasyna, sygymyna we induktiwligine baglydyr. Ters ugura meýdan berlende (minus alamaty dinistoryň p_1 böleginde), dinistoryň togy emitter geçişleriniň garşylygy bilen kesgitlenilýär. Emitter geçişleriniň böwsülme naprýaženiýasyna çenli ters ugura tok örän kiçidir.

Dinistorlar özboluşly elektron relesi bolup, haçan-da daşky goýlan naprýaženiýa belli bir ululyga ýetende ol utgaşýar. Dinistorlar utgaşdyryjylar hökmünde radioteknikada, awtomatikada we dürli dolandyryş zynjyrlarynda 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). Dolandyryjy elektroda elektrik meýdany şeýle polýarlykda berilýär, ýagny bu ýagdaýda kollektor geçişniň ýakynyndaky emitter p-n-geçişden inžektirlenýän togyň ululygy we tiristordan geçýän umumy tok artýar. 9.4 suratda urukdyryjy togyň dürli bahasynda, tiristoryň WAH-nyň toplumu görkezilen. Urukdyryjy elektrotan geçýän toguň artmagy bilen, tiristoryň utgaşma naprýaženiýasy kiçelýär.

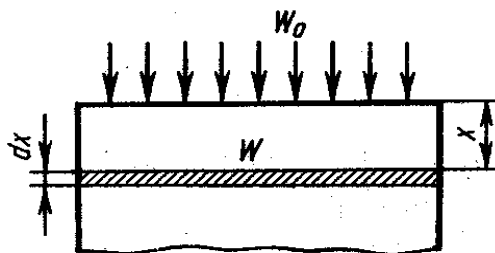
Tiristorlaryň iş režimini diňe bir daşdan berilýän goşmaça elektrik meýdanynyň üsti bilen dolandyрман, tiristoryň baza bölegini ýagtylyk şöhlesi bilen şöhlelendirip, özgertmeklik mümkin. Şeýle tiristora fototiristor diýlip at berilýär.

X BÖLÜM. ÝARYMGEÇİRİJILERDE OPTIKI HADYSALAR.

1. Gaty jisimlerde (ýarymgeçirijilerde) ýagtylyk şöhlesiniň ýuwdulmagy we geçmesi. Hususy ýuwdulma.

Ýarymgeçirijilerde optiki efektler dürli fotokabuledijilerde, ýagtylyk energiýasyny elektrik energiýasyna öwürijilerde hen-de ýagtylyk şöhlesini goýberiji abzallarda-swetodiodlarda ulanylýar. Bu bölümde ýarymgeçirijide bolup geçýän esasy optiki hadysalara, yagny ýagtylygyň ýuwdulma we jisimiň içinden geçiş hadysalaryna hem-de ýagtylygyň şöhlelenme hadysasyna seredip geçilýär.

Birhilli ýarymgeçiriji nusgasynyň üstüne kuwwaty W_0 bolan ýagtylyk şöhlesi gelip düşsün (10.1. surat). Ýagtylyk şöhlesi ýarymgeçirijiniň içine aralaşdygyça önüň kuwwaty azalýar.



10.1. Surat. Gaty jisimde ýagtylygyň ýuwdulma kanunyna düşündiriş.

Ýarymgeçirijiniň göwrümünde, onuň üstünden x aralykda, dx gatlagy bölüp alalyň. Bu dx gatlagda ýuwdulýan dW ýagtylyk energiýasynyň mukdary üste gelip düşýän ýagtylygyň kuwwatyna we gatlagyň galyňlygyna göni proporsionaldyr:

$$dW = -\alpha \cdot W \cdot dx \quad (10.1)$$

Deňlikdäki minus alamat ýagtylygyň ýaýraýan uguryna, onuň kuwwatynyň kemelýändigini aňladýar. Bu ýerde α koeffisiýente, ýuwdulma koeffisiýenti diýilip at berilýar. Haçan-da $dx=1$ bolan ýagdaýynda $\alpha = -dW/W$. Şeýlelikde, ýuwdulma koeffisiýenti ýagtylygyň kuwwatynyň sredanyň birlik gatlagyndan geçendäki üýtgemesine san taýdan deňdir. Ýuwdulma koeffisiýentiniň birligi uzaklyk birligine ters ululykdyr (m^{-1} , sm^{-1}).

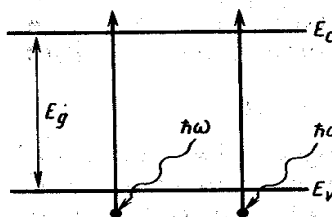
Jisimiň üstünden ýagtylygyň serpilmesini hasaba alyp, (10.1) deňligi integrirläp alýarys.

$$W = W_0(1-r)e^{-\alpha x}, \quad (10.2)$$

bu ýerde r - ýagtylygyň serpilme koeffisiýenti. Köplenç ýagtylyk sredadan geçende diňe bir ýuwdulma hadysasy bolup geçmän, ýagtylygyň ýaýrama hadysasy hem bolup geçýär. Emma biz ýönekeýlik üçin ýagtylygyň geçýän sredasynda ýaýrama ýok diýip hasap edip, diňe ýuwdulma hadysasyna seredeliň.

Hususy ýuwdulma.

Hususy ýuwdulmada, ýarymgeçirijilere gelip düşýän ýagtylyk energiýasy, elektronlary walent zonasından geçiş zonasyna geçirmeklige harç bolýar (10.2 surat).



10.2. Surat. Ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň hususy ýuwdulmasynyň çyzgyda görkezilişi.

Energiýanyň saklanmak kanunyna laýyklyda, walent zonadan elektronlary geçiş zona geçirmeklik (oýandyrmaklyk), haçan-da ýagtylyk kwantynyň energiýasy $h\nu$ ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň giňliginden E_g uly ýa-da deň ýagdaýynda mümkindir:

$$h\nu \geq E_g$$

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

$$\lambda_{\max} = 2\pi \cdot \frac{c}{\nu} = 2\pi c \cdot \frac{\hbar}{E_g} \quad (10.3)$$

bu ýerde c - ýagtylygyň tizligi.

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

$$\lambda_{\max} = \frac{124}{h\nu} \quad (10.4)$$

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

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_p + \mathbf{p}_{\text{fot}} \quad (10.5)$$

Bu ýerde $\mathbf{p}_n = \hbar \mathbf{k}_n$ - elektronyň impusy; \mathbf{p}_p - walent zonadaky emele gelen deşiň impulsy; \mathbf{p}_{fot} - elektrony oýandyran fotonyň impulsy. Eger-de fotonyň impulsynyň elektronyň impulsyndan 10^3 esse kiçiligini göz önünde tutsaň onda elektronyň geçiş zona geçmegi bilen onuň impulsy deşiňkä seredende üýtgemän galýar:

$$\hbar \mathbf{k}_n \approx \hbar \mathbf{k}_p \quad (10.6)$$

Ýarymgeçirijiniň energetiki diagrammasynda şeýle geçiş göni geçiş diýlip atlandyrylyp, wertikal görkeziji bilen görkezilýär (10.3a surat).

Haçan-da ýarymgeçirijide geçiş zonanyň minimumy we walent zonanyň maksimumy k tolkun wektorynyň birmeňzeş bahasynda ýerleşen bolsa, onda hususy ýuwdulma koeffisiýenti teoretiki hasaplamalar esasynda şu aşakdaky aňlatmadan tapylýar

$$\alpha_s = \frac{e^2 \left[2m_n m_p / (m_n + m_p) \right]^{\frac{3}{2}}}{4\pi \cdot \bar{n} \cdot c \cdot \hbar^2 \cdot \epsilon_0 \cdot m_e} \cdot (\hbar\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (10.7)$$

bu ýerde, \bar{n} - ýarymgeçirijide ýagtylygyň döwürleme koeffisiýenti. Haçan-da $\bar{n} = 4$ diýip, m_n we m_p - elektronyň we deşiň effektiv massalaryny, erkin elektronyň massasyna deň diýip alsaň onda hususy ýuwdulma koeffisiýentiniň α_s -hususy ýuwdulma koeffisiýenti, onuň bahasyny ýönekeý deňlikden tapmak bolýar:

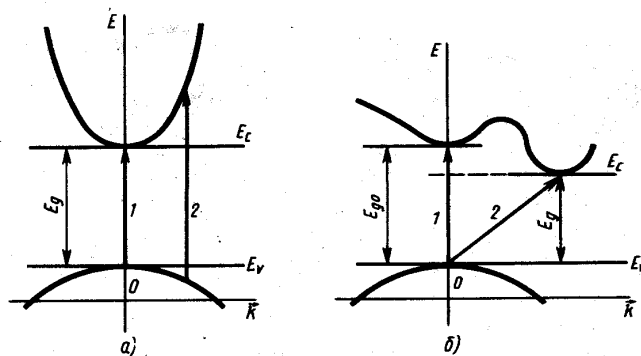
$$\alpha_s \approx 2.7 \cdot 10^5 (\hbar\nu - E_g)^{1/2}.$$

Ýarymgeçirijilerde hususy ýuwdulmada, $\alpha_s \approx 10^4 \div 10^5 \text{ sm}^{-1}$ baha ýetip bilýär. Ýagtylyk kwanty ýarymgeçirijide ýagtylygyň düşýän üstünden $\sim 1.0 \div 0.1$ mkm aralykda, ýagny çuňlukda ýuwdulýar.

Haçan-da ýarymgeçirijide geçiş zonanyň düýbi E_c walent zonanyň depesi E_w bilen, k wektoryň dürli bahalarynda ýerleşen bolsa (10.3b surat), onda wertikal boýunça E_{g0} aralyk, ýagny optiki göni geçiş gadagan zonanyň giňliginden uludyr $E_g = E_c - E_w$. Bu ýagdaýda optiki göni geçiş boýunça elektronlaryň oýandyrylmagy üçin, ýagtylyk kwantynyň energiýasy E_{g0} -dan artyk ýa-da deň bolmalydyr:

$$\hbar\nu \geq E_{g0} \quad (10.8)$$

E_{g0} ululyga optiki gadagan zonanyň ginligi diýlip at berilýär. Şeýle ýarymgeçirijilerde göni geçişden başga-da göni däl geçiş ýüze çykyý bilýär, 10.3b suratda gytak görkeziji bilen görkezilen.



10.3. Surat. Göni (a) we göni däl (b) zonaara geçişli ýarymgeçirijileriň zona diagrammasy. Görkeziji çyzyjaklar bilen zona-zona geçişiniň ugury görkezilen.

Bu geçiş, üçünji kwazibölejigiň - fononyň gatnaşmagy bilen amala aşýar. Göni däl geçişde energiýanyň saklanmak kanuny hem-de impulsyň saklanmak kanuny şeýle görnüşe eýe bolýar.

$$E_n = E_p + \hbar\nu \pm E_{\text{fon}} ; \quad (10.9)$$

$$P_n = P_p + P_{\text{fot}} \pm P_{\text{fon}} ; \quad (10.10)$$

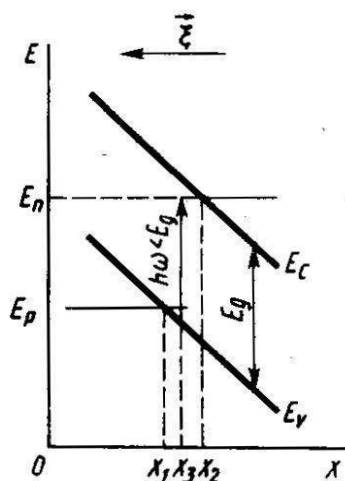
Deňlikde plýus alamat, haçan-da hadysa fononyň ýuwdulmagy bilen bolup geçen ýagdaýyna, minus haçan-da hadysa fononyň göýberilmegi bilen bolup geçen ýagdaýyna degişlidir. Ýarymgeçirijilerde fotonyň energiýasy $\hbar\nu \approx 1$ eW töweregi bolanda, fononyň energiýasynyň 0.01 eW-dan geçmeýänligini göz önünde tutsan, onda fononyň energiýasyny fotonyň energiýasy bilen deňeşdirende hasaba almasaň hem bolýar. Fononyň impulsy $\hbar\nu_{\text{fon}}$ elektronyň impulsy ýaly Brillýueniň birinji zonasynda ýerleşýär. Şol sebäpli hem fononyň gatnaşmagy bilen bolýan geçişlerde elektronyň impulsy giň aralykda üýtgeý bilýär we grafik görnüşinde şeýle geçişler gytak görkezijiler bilen aňladylýar (10.3,b surat).

Şeýlelikde, üç sany mikrobölejigiň gatnaşmagynda bolup geçýän hadysanyň ähtimallygy, iki sany mikrobölejigiň gatnaşmagynda bolup geçýän hadysadan köp kiçi bolup, göni däl geçiş bolýan ýerde ýuwdulma koeffisiýenti göni geçişli ýere seredeninde örän kiçidir. Temperaturanyň peselmegi bilen fononyň ýuwdulmagy bilen bolýan hadysalar seýrekleýär we göni däl geçiş üçin ýuwdulma koeffisiýenti kiçelýär.

Ýarymgeçirijileriň hususy ýuwdulma spektriniň gyrasy, gözenegiň hemişeliginiň üýtgemegine we onuň bilen baglanyşkly energetiki gurluşynyň üýtgemegine getirýän basyşyň täsiri bilen, biraz süýşýär. Ýarymgeçiriji ählitaraplaýyn gysylanda, E_g -niň üýtgemegi položitel ýa-da otrisatel bolup bilýär. Şol sebäpli hem ýarymgeçirijiniň hususy ýuwdulma spektriniň gyrasy, hiç hili täsiriň ýok ýagdaýyna seredeninde, spektriň uzynlyk tolkun uzynlykly we gysga tolkun uzynlykly taraplaryna-da süýşüp bilýär. Şu effekt, temperaturanyň üýtgemegi bilen ýarymgeçirijiniň hususy ýuwdulma gyrasynyň üýtgemegine getirýän, zona gurluşynyň üýtgemegini hem ýüze çykarýar.

Ýarymgeçirijiniň hususy ýuwdulma spektriniň gyrasynyň ýakynynda ýuwdulma, daşky elektrik meýdanynyň täsiri bilen hem üýtgeýär. Fransyň-Keldýsyň effekti adyny alan bu hadysa, daşky elektrik meýdanynda energetik zonalaryň gysarmasy bilen düşündirilýär (10.4 surat). Daşky

elektrik meýdanynda energetik zonalaryň gysarmagynyň netijesinde, saga X_1 nokatdan X_3 - X_1 aralyga we çepe X_2 nokatdan X_2 - X_3 elektronlaryň tunnel syzmasynyň esasynda düşündirilýär. 10.4 suratdan görnüşi ýaly, elektron X_3 nokatda E_p derejeden E_n derejä ýagtylyk kwantyny $\hbar\nu = E_n - E_p < E_g$ ýuwdup geçip bilýär. Ýarymgeçirijä garyndy goşulmagynyň hususy ýuwdulma täsirine seredeliň. Garyndynyň örän uly bolmadyk ýagdaýynda, ýarymgeçirijiniň hususy ýuwdulma spektrine täsir etmeýär. Bu ýagdaý ýarymgeçirijiniň geçiş zonasyndaky derejeleriň elektronlar bilen doldurylyşynyň örän pes derejedeligi bilen we olaryň walent derejeden elektronlaryň geçmegine zyýan bermeyändigini bilen düşündirilýär. Beýleki bir tarapdan, aşa uly garyndy goşulmadyk p-görnüşli ýarymgeçirijilerde hem walent zonanyň doldurylyşy bire ýakyn we bu derejelerden optiki geçişniň ähtimallygy garyndynyň derejesine bagly däl.



10.4. Surat. Fransýň-Keldyşyň effekti.

Haçan-da ýarymgeçiriji aşa garyndyly bolanda ýagdaý başgaça bolýar. Garyndynyň derejesi örän ýokary bolmasa, hususy ýuwdulma spektriniň gyrasyna ýakyn ýygylýan ýuwdulma koeffisiýentiniň kiçelmegi ýüze çykýar. Ýarymgeçiriji aşa garyndyly bolan ýagdaýynda ýuwdulma spektriniň gyrasy gysga tolkun uzynlykly tarapa süýşýär. Bu effekte Burnşteýniň effekti diýlip at berilýär. Bu effekt geçiş zonasynyň düýbünde (walent zonasynyň depesinde) derejeleriniň dykzykgy uly bolmadyk ýarymgeçirijilerde aýdyň ýüze çykýar.

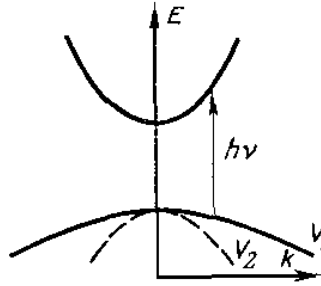
2. Ýarymgeçirijilerde lýuminessensiýa hadysasy. Ýarymgeçiriji strukturalarda rekombinasiýa şöhlelenmesi.

Oýandyrylan ýagdaýyndaky ýarymgeçirijilerde, elektromagnit tolkunlarynyň şöhlelenmesi (göýberilmesi) ýüze çykýar. Bu hadysa lýuminessensiýa diýlip at berlip, ol ýuwdulma hadysasyna ters hadysadyr. Ýarymgeçirijiniň şeýle oýandyrylan ýagdaýyny birnäçe usul bilen almak mümkin. Haçan-da lýuminessensiýa ýarymgeçirijä gelip düşýän ýagtylyk fotonynyň energiýasynyň hasabyna ýüze çykýan bolsa, onda oňa fotolýuminessensiýa diýlip at berilýär.

Eger-de lýuminessensiýa ýarymgeçiriji kristalyny ýakary tizlikli elektronlar bilen urmaklygyň hasabyna ýüze çykýan bolsa, onda oňa katodolýuminessensiýa diýlip at beilýär. Bulardan başgada lýuminessensiýa rentgen şöhlesi tarapyndan oýandyrylyp bilýär. Şeýle lýuminessensiýa rentgenolýuminessensiýa diýilýär. Ýokarda aýdylanlary göz önünde tutup lýuminessensiýa şeýle kesgitleme berilýär. Lýuminessensiýa bu jisimiň ýylylyk şöhlelenmesinden artykmaç energiýanyň hasabuna ýüze çykýan şöhlelenme bolup, adaty elektromagnit şöhlesi ýaly häsiýetlendirilýär. Kesgitlemä laýyklykda, jisimiň deňagramlykdaky ýylylyk şöhlelenmesinden tapawutlylykda, lýuminessensiýa deňagramlykda däl şöhlelenmedir. Islendik elektromagnit şöhlelenmesi ýaly, lýuminessensiýa özüniň şöhlesiniň ýitiligi, kogerentligi we oýandyrmadan soňky şöhlelenmäniň dowamlylygy bilen häsiýetlendirilýär. Lýuminessensiýada ýagtylygynyň ýuwdulmasy we şöhlelenmesi aralyk hadysalar bilen bir-birinden bölünendir, şol sebepli hem daşky oýandyрма bes edilenden soň hem lýuminessent şöhlelime belli bir wagt dowan edýär.

Geçiş zony bilen walent zonyň arsyndaky göni geçiş.

Goni geçişli gadagan zonaly ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň ýuwdulmagy erkin elektronyň we erkin deşiň emele gelmegini ýüze çykaryp, olaryň tolkun wektorlary birmeňzeşdir ($k=k$). Ýagtylyk energiýasy ýuwdulandan soň, belli bir wagtdan erkin elektron geçiş zonyň düýbýne gelýär, erkin deşik walent zonyň depesine barýar we şeýle hadysa relaksasiýa diýülýär. Gaty jisimlerde şeýle ýagdaý köplenç 10^{-10} - 10^{-12} c töweregi wagtda amala aşýar. Haçan-da relaksasiýadan soň erkin elektronyň we deşiň birmeňzeş tolkun wektorlary bar bolan ýagdaýynda, rekombinasiýa hadysasynyň ähtimallygy ýokarydyr (10.5. surat).



10.5. Surat. Şöhlenenmeli göni zonaara geçişler.

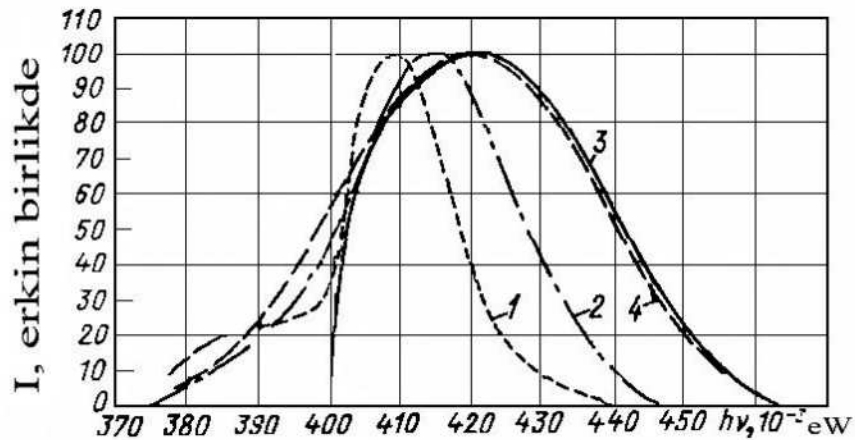
Şöhlenenmeli göni zonaara geçişde, ýagtylygyň ýuwdulma hadysasyna meňzeşlikde, göýberilýän şöhläniň spektri aňlatma bilen ýazylýar:

$$I(h\nu) = B(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (10.11)$$

bu ýerde B - hemişelik san.

Bu aňlatmadan görnüşi ýaly, erkin zaryadlaryň rekombinasiýasy esasynda ýüze çykýan şöhlenenme-lýuminessensiýa, spektriň kiçi energiýasy tarapyndan, ýagny $h\nu = E_g$, çäklidir.

Gelip düşýän ýagtylygyň energiýasynyň $h\nu \geq E_g$ bolmagy we onuň energiýasynyň artmagy, geçiş zonadan ýokardaky derejeleriň oýandyrylan elektronlar bilen doldurylmagyna getirýär. Bu bolsa energiýasy gadagan zonanyň giňliginden (E_g) uly bolan ýagtylyk fotonlarynyň şöhlenenmegine we lýuminessensiýanyň spektrinde gysga tolkun uzynlykly şöhlenenmäniň (ýokary energiýaly şöhlenenmäniň) «ýokary energiýaly guýrugyň» emele gelmegine getirýär. 10.6. suratda n-görnüşli InAs ýarymgeçiriji kristalynyň fotolýuminessensiýa şöhlenenmesiniň spektri görkezilen.



10.6. Surat. n-görnüşli antimonid indiýniň (InSb) şöhlenenmesi, 77 K.

Suratdan görnüşi ýaly indiy arsenid ýarymgeçiriji birleşmesiniň düzüminde garyndylaryň konsentrasiýanyň artmagy bilen fotolýuminessensiýa spektrinde şöhlenenmäniň gyrasynyň we spektriň maksimumynyň ýokary energiýa tarap süýşmegi, Ferminiň derejesiniň geçiş zonanyň düýbüne tarap süýşmegi bilen düşündirilýär.

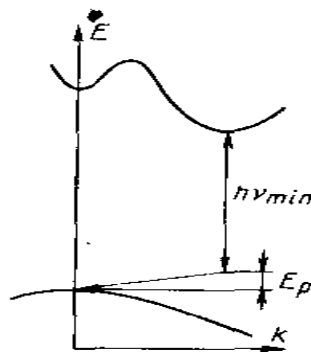
Geçiş we walent zonalaryň aralygyndaky göni däl geçiş.

Geçen paragrafdan belli boluşy ýaly, göni bolmadyk geçişli gadagan zonalý ýarymgeçirijide, ýagtylygyň ýuwdulmasy, ýagny fononyň ýuwdulmagy we göýberilmegi bilen bolup geçýär. Onda şeýle ýarymgeçirijilerde elektronyň rekombinasiýasy hem fononyň ýuwdulmagy ýa-da göýberilmegi bilen bolup geçýär. Bu geçişde, ýagny elektronyň rekombinasiýasynda fononyň göýberilmegi ýokary ähtimallyga eýedir. Onda göni däl geçişli ýarymgeçirijilerde fotolýuminessensiýa şöhlenenmesiniň spektrini şeýle ýazyp bolýar.

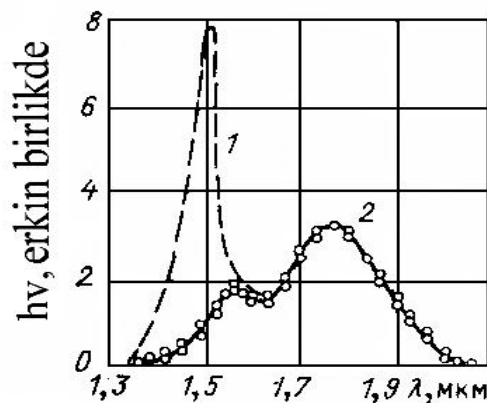
$$I(\hbar\nu) = B(\hbar\nu - E_g + E_{\text{fon}})^2 \quad (10.12.)$$

bu ýerde E_{fon} - fononyň energiýasy.

Eger-de ýarymgeçirijide göni we göni däl geçişin ikisiniň hem bolmagynyň mümkinçiligi bar bolsa, onda lýuminessensiýa spektri iki sany aýratyn bölekden durýar. Lýuminessensiýa spektriniň uzyn tolkun uzynlyklysy bölegi göni däl geçişe degişli we gysga tolkun uzynlykly bölegi bolsa göni geçişe degişlidir. 10.7. suratda göni däl geçiş we 10.8. suratda germaniý kristalynyň lýuminessensiýa şöhlenenmesiniň spektri görkezilen.



10.7. Surat. Şöhlenenmeli göni däl geçişler.



10.8. Surat. Germaniý ýarymgeçiriji kristalynyň şöhlenenme spektri: tejribe 2-nji egri, öz-özünden ýuwdulma hasaba alnanda 1-nji egri.

Ýarymgeçirijilerde lýuminessensiýa şöhlenmesiniň relaksasiýasy.

Ýarymgeçiriji kristallarynda oýandyrmaklyk bes edilmegi bilen lýuminessensiýa şöhlenmesi birbada gutarmaýar. Sebäbi lýuminessensiýa şöhlenmesiniň ýitiligi (intensiwligi) bir sekuntda bolup geçýän rekombinasiýanyň sanyna göni proporsionaldyr.

$$I_1 \approx \left(\frac{dn}{dt} \right) \quad (10.13.)$$

Haçan-da şöhlenme monomolekulýar bolsa, ýagny fotonyň ýuwdulmasy we şöhlenmsi bir merkezde bolup geçýän bolsa, onda oýandyrylan elektronlaryň konsentrasiýasynyň wagtyň geçmegi bilen kemelmegi şeýle tapylýar.

$$n = n_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (10.14.)$$

bu ýerde n_0 - başlangyç wagtdaky, ýagny $t=0$ ýagdaýdaky oýandyrylan elektronlaryň sany; τ - elektronyň oýandyrylan ýagdaýyndaky ýaşayyş wagty.

Şeýlelikde, lýuminessensiýa şöhlenmäniň ýitiligi, oýandyrma bes edilenden soň, ýaşayyş wagtynyň ululygyna (τ) baglylykda eksponenta boýunça kiçelýar.

$$I_1 \sim e^{-t/\tau} \quad (10.15.)$$

bu gatnaşykdan:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (10.16.)$$

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

XI BÖLÜM. INTEGRAL MIKROHEMALARY.

1. Integral mikroshemalaryň toparlary.

Integral mikroshemalary (mikroelektron shemalary) mikroelektron abzallarynyň içinde iň köp ýaýranydyr. Häzirki zaman mikroelektronikasynyň ösüş derejesini integral mikroshemalarynyň kämilligi kesgitleýär. Integral mikroshemalaryny taýýarlamagyň tehnologiýasy öňden ýarymgeçiriji abzallaryny öndürmekde giňden peýdalanylýan epitaksial gatlaklary almagyň, ýokar derejeli wakuum tehnologiýalaryna hem-de täze tehnologiýa usullara we hadysalara esaslanandyr. Bu bolsa integral mikroshemalaryny işläp düzmegiň we döretmegiň baş ugurlaryny kesgitledi: ýarymgeçiriji kristalyndan taýýarlanylýan plastinkalarynyň esasynda we epitaksial gatlaklaryň esasynda. Epitaksial gatlaklar boýunça integral mikroshemalarynyň dürli görnüşlerini taýýarlamagyň mümkinçiligi we bu usulyň örän köp kombinasiýalarynyň mümkinligi, integral mikroshemalaryny taýýarlamagyň birnäçe ugrunyň ýüze çykmagyna we ösmegine getirdi.

Integral mikroshemalaryny klassifikasiýalaşdyrmak (toparlara bölmeklik) üçin birnäçe häsiýetnamalar peýdalanylýar: integrerlenmäniň derejesi, işjeň üleşleriniň işleýiş aýratynlyklary, ýerine ýetirýän funksiýasy, işleýiş çaltlygy, harç edýän energiýasy, dürli abzallarda peýdalanylyşy. Integral mikroshemalaryny gurluş-tehnologiýa aýratynlyklary boýunça toparlamak has ýaýran bolup, bu aýratynlyklar baradaky maglumatlar olaryň adynda (markasynda) getirilýär.

Integral mikroshemalary häsiýetlendirýän we onyň hilini häsiýetlendirýän häsiýetnamalaryň biri onuň integrerlenme derejesidir.

Integral mikroshemalaryny (IMS) häsiýetlendirýän düzüjileriň biri hem onuň esasydyr-düýpbiniýadydyr (podložkadyr), ýagny esas bolup hyzmat edýän ýarymgeçiriji plastinalardyr. Bu häsiýetnama boýunça IM iki topara bölünýär: 1) İşjeň esasly IMS; 2) İşjeň däl esasly IMS.

Birinji topara, mikroshemanyň işjeň üleşleriniň esasy bölegi ýa-da barysy podložkanyň içinde ýerine ýetirilen ýagdaýy; ikinji topara bolsa, mikroshemanyň işjeň üleşleri podložkanyň üstünde gatlak görnüşinde, dielektrik we ýarymgeçiriji materiallardan taýýarlanylýan ýagdaýy girýär. Uly IMS taýýarlamak üçin garyşyk tehnologiýa, podložkanyň işjeň we işjeň däl ýagdaýlary bilelikde peýdalanylýar. 11.1. suratda konstruktiv-tehnologiýa we fiziki häsiýetnamalaryna baglylykda integral mikroshemalaryň toparlara bölünişi getirilen.

Integral mikroshemalaryň islendik görnüşü üçin hem iň çylşyrymly üleşleriň, ýagny düzümleriň biri tranzistorlar bolup durýar. Belli boluşy ýaly integral shemalarda tranzistorlaryň bipolar we unipolar – metal dielektrik ýarymgeçiriji (MDÝ) görnüşleri giňden peýdalanylýar.

Integral mikroshemalarynyň ählesi hem, olary daşky täsirden goramaklyk üçin germetiki görnüşde ýapylýar. Adaty ulanylýan mikroshemalar iki görnüşe, ýagny korpusly we korpusyz görnüşlere bölünýär. Birinji görnüşde, mikroshemalar wakuumda ýörite korpusda ýerleşdirilip taýýarlanylýar. Ikinji görnüşde, mikroshemalar epoksid smolasy ýa-da başga bir lak bilen örtülýär.

Funksional ýöriteleşmesi boýunça IMS-lar sanly, analog (çyzykly) we analog-sanly görnüşlere bölünýär. IMS islendik görnüşdäkileri çylşyrymly elektron gurluşlary, abzallary, apparatlary döretmek üçin bilelikde peýdalanylýar. Şol sebäpli mikroelektron gurallarynyň düzümleri esasy bolup, dürli görnüşli mikroshemalar, mikroshemalaryň toplumy giňden peýdalanylýar.

Kabul edilen atlandyrmalaryň ulgamy boýunça IMS dört düzüjiden durýar.

Birinji düzüji - konstruktiv-tehnologiýa toparyny görkezýän san. Ikinji düzüji – iki-üç sany san, şu görnüşli IMS işläp düzmäge degişli sanlar. Üçünji düzüji – iki harp, IMS-nyň kiçi toparlaryna we görnüşlere degişlidigini görkezýär. Dördünji düzüji – şu topara degişli mikroshemalaryň tertip belgisi. Her bir mikroshema üçin onuň häsiýetnamalarynyň anyk ululyklary, olaryň tehniki resminamalarynda getirilýär (meselem 133 JIA1A integral mikroshemasy oňa meňzeş 133 JIA1B mikroshemadan tapawutlanýar).

IMS-da II harpy korpusyň plastmassadygyny, M – keramikadygyny görkezýär. Köplenç, adaty peýdalanylýan mikroshemalarda ilki başda K harpy goýulýar, meselem, K 140 YD11. Eger-de bu IMS keramiki korpusda bolsa ondo ol (KM155 B1-2) ýaly görnüşde bellenilýär.

2. Litografiya usulynyň görnüşleri.

Litografiya – köplenç planar (tekiz) tehnologiya usullarynda peýdalanylyp IMS taýýarlanylanda, onuň ülüşlerini we olaryň arabaglanşyklaryny döretmek üçin zerur bolan işleri geçirmeklikde mümkinçilik berýän ýörite gorag gatlagyň dörediliş usulygyr, has takygy usullaryň yzygiderli toplumydyr..

Litografiya usuly dürli himiki täsirlere, ýagny kislotalarayň, aşgarlaryň we ş.m. täsirine çydamly, rezist materialynyň häsiýetlerine esaslandyr. Rezist gatlagy, belli bir tolkun uzynlykly ýagtylyk şöhlesiniň täsiriniň netijesinde öz häsiýetlerini düýpli özgerdýär. Rezistiň şeýle aýratyn ajaýyp häsiýeti göz önünde tutulyp, ol ýarymgeçiriji plastinasynyň üstüne tutuş çäýlýär, guradylýar, ondan soňra ýörite taýarlanylýan şablonyň (maskanyň) üstünden şöhlelendirilýär. Haçanda fotorezist çäýýän nusga ýagtylyk täsir edenden soň himiki usul bilen ýörite işlenilende, rezistiň häsiýetine baglylykda onuň ýagtylandyrylan ýeriniň himiki täsire durnuklylygy üýtgeýär. Şeýlelikde, ulanylan fotoşablona-maskala laýyklykda ýarymgeçiriji plastinasynyň käbir ýeri açylýar, emma käbir ýerinde bolsa rezist aýrylman galýar.

Ulanylýan şöhläniň tolkun uzynlygyna baglylykda litografiya usuly optiki ($\lambda = 300\div 400$ nm), elektron ($\lambda = 0,1$ nm), rentgen ($\lambda = 0,1 - 1$ nm) we ion-şöhle ($\lambda = 0,05 - 0,1$ nm) litografiya usullara bölünýär.

Ýokarda sanalýan görnüşlere esaslanyp litografiýanyň dürli usullary işlenilip düzüldir.

Fotolitografiya – optiki şöhleleriň täsirine esaslanan litografiya usuly bolup, üstüne rezist çäýýän ýarymgeçiriji plastinkasy gysga tolkun uzynlykly ýagtylyk şöhlesi bilen şöhlelendirilýär.

Elektronolitografiya – rezist çäýýän üst elektron şöhlesi bilen, birbada ýa-da rezistli üst topologiya boýunça yzygiderli şöhlelendirilýär.

Rentgenolitografiya – rezist çäýýän üst tutuşlygyna, şablonyň üstünden rentgen şöhlesi bilen şöhlelendirilýär.

Ion-şöhlelenme litografiyada, rezist çäýýän üst ion şöhlesi bilen şöhlelendirilýär.

Ýene-de bir bellemeli zat, ol hem ýarymgeçiriji plastinkanyň üstki gatlagynda we içinde dürli örän çylşyrymly elektron zynjyrlaryny döretmeklik üçin litografiya usullarynyň birnäçe görnüşi bilelikde ulanylyp täzeden işlenilýär..

Mikroelektronikada litografiya usuly göwrüm ýarymgeçirijili nusgasynyň we epitaksial gatlakly, dielektrik, metal gatlakly gurluşlaryň esasynda ýarymgeçiriji abzallaryny döretmekde, IMS her bir üleşini döretmekde hem-de olaryň arasyny baglanyşdyrmakda giňden peýdalanylýar.

Bu usul bilen taýýarlanylýan abzalyň ýokary hilli bolmagynda, fotoşablonyň hili we ony taýýarlamagyň tehnologiýasy uly orun eýeleýär.

Fotoşablon – tekiz parallel üstleri bolan aýdyň – dury plastinka (kwars, aýna we ş.m.) bolup, ýagtylyk şöhlesiniň gerek tolkun uzynlygyny bökdençsiz geçirýär, üstünde döredilen ýagtylyk geçirmeýji çyzyklaryň – çyzgynyň kömegi bilen, fotoşablonlar plastinkanyň üstündäki her bir gatlagy, üleşiň bölegini yzygiderli taýýarlamga mümkinçilik berýär.

Fotorezist – ýagtylyga ýokary duýujylygy bolan we işlenenden (proýawit edilenden) soň, daşky iýiji (agressiw) täsirlere, meselem kislotanyň, aşgaryň täsirine, durnukly ýagdaýa geçýär. Emma ýagtylygyň gysga tolkun uzynlykly böleginiň täsiri bilen fotorezistiň molekulalary dargaýar, ol özüniň himiki täsire durnuklylygyny ýitirýär.

Fotorezistiň duýujylygy, onuň ýagtylyk şöhlesiniň täsiri esasynda polimerizasiya geçişi bilen kesgitlenýär. Duýujylyk S harpy bilen bellenilip şeýle kesgitlenilýär:

$$S = 1/H = 1/E \cdot t, \quad (11.1)$$

bu ýerde H – ekspozisiya, E – ýagtylandyryş, t – ekspozisiya wagty. Fotorezistiň duýujylygy fotolitografiya usulynyň öndürjiligini kesgitleýär.

Fotorezistiň esasy häsiýetnamalarynyň birisi, onuň kislotanyň täsirine durnuklylygy bolup, ol şeýle bahalandyrylýar:

$$K = h/x \quad (11.2)$$

bu ýerde h – kislotanyň iýen gatynyň dikligine çunlugy, x – gapdal ugur boýunça (kesleýin) iýijiligi. x – näçe kiçi bolsa, fotorezist şonçada kislota durnukly hasaplanylýar. Sebäbi taýýarlanylýan elektron zynjyrynyň ülüşleriniň ýerleşişiniň takyklygy we hili ýokarlanýar.

3. Integral mikroshemalaryň taýýarlanylş tehnologiýasynyň aýratynlyklary. ***Integral mikroshemalarynyň gurluşy, işleýiş aýratynlyklary.***

Ýarymgeçiriji materiallarynyň esasynda dürli elektron abzallaryny taýýarlamagyň tehnologiýasynyň örän çalt depgin bilen ösüşi we ýokary derejede kämilleşmegi, häzirki zaman elektronikasynyň element esasynyň düýpli özgermegine getirdi. Elektronikanyň şeýle element esasy integral mikroshemalary we uly integral mikroshemalary bolup, olaryň taýýarlanylş tehnologiýasy şlenip düzüldi. Umuman bu integral mikroshemalaryny taýýarlamak boýunça ýerine ýetirilýän tehnologiýa işleriniň toplumyny, ýagny tehnologiýa işleriniň toplumyny iki topara bölüp bolýar:

1) Ýarymgeçiriji nusgasynyň (plastinasynyň) üstünde we içinde işjeň hem-de işjeň däl ülüşleri döretmek, olary özara baglanyşdyrmak, birleşdirmek işleri;

2) Uly plastinany kristallara (aýratyn mikroshemalara) bölmek, düzmek we IMS montaj işlerini ýerine ýetirmek.

IMS-nyň kristaly taýýarlananda, mikroshemanyň işleýiş funksiýasy bilen bagly şertler ýerine ýetirilip, nusga ýa-da epitaksial gatlakly ýarymgeçiriji plastinasy talap edilýän görnüşe getirilýär. Elektron strukturalaryň zynjyr boýunça ýerine ýetirilişi işjeň ülüşleriň (bipolýar we MDÝ-tranzistorlar) we işjen däl ülüşleriň (rezistorlar we kondensatorlar) ýerlikli, maksatly peýdalanylmagyna esaslanandyr. Şol sebäpli hem IMS nusgalaryny taýýarlamagyň esasy meselesi, tranzistorlary, diodlary, kondensatorlary, rezistorlary kristalda döretmek we olaryň arasyndaky ygtybarly arabaglanşygy, izolýasiýany amala asyrmak bolup durýar.

IMS taýýarlananda ýerine ýetirilýän işleriň birinjisi, şu ýokarda sanalanlar bolup dursa, bu işleriň ikinjisi (dowamy) taýýar elektron zynjyrlý tutuş nusgany (uly birnäçe IMS-dan durýan nusgany) kristallara bölmeklik, olary birleşdirmeklik, korpusda montaj etmeklik bolup durýar. Şeýle tehnologiýa işleriniň yzygiderli ýerine ýetirilmeginiň netijesinde IMS-nyň konstruksiýa taýdan taýýar görnüşü alynýar.

Önümçiligiň yzygiderligi (etaplary).

Ýarymgeçiriji IMS öndürmekligiň esasy yzygiderligi şu aşakylardan durýar:

- Ýarymgeçiriji plastinalary taýýarlamak, olar bilen işlemek üçin himiki reaktiwleri saýlamak, taýýarlamak;

- Fotoşablony işläp düzmek we taýýarlamak;

- Ýarymgeçiriji plastinalarda işjeň ülüşleri (elementleri) taýýarlamak;

- Içki birleşikler üçin meýdançalary we birleşikleri taýýarlamak;

- IMS ýygnamak, korpusda ýerleşdirmek we germetika işlerini berjaý etmek;

Taýýarlanan IMS-nyň işjeňligini we hilini barlamaklyk, olaryň iş ukyplaryna gözegçilik etmeklik, tehnologiýa-gözegçilik işleriniň aýrylmasyz, zerur bölegi bolup durýar.

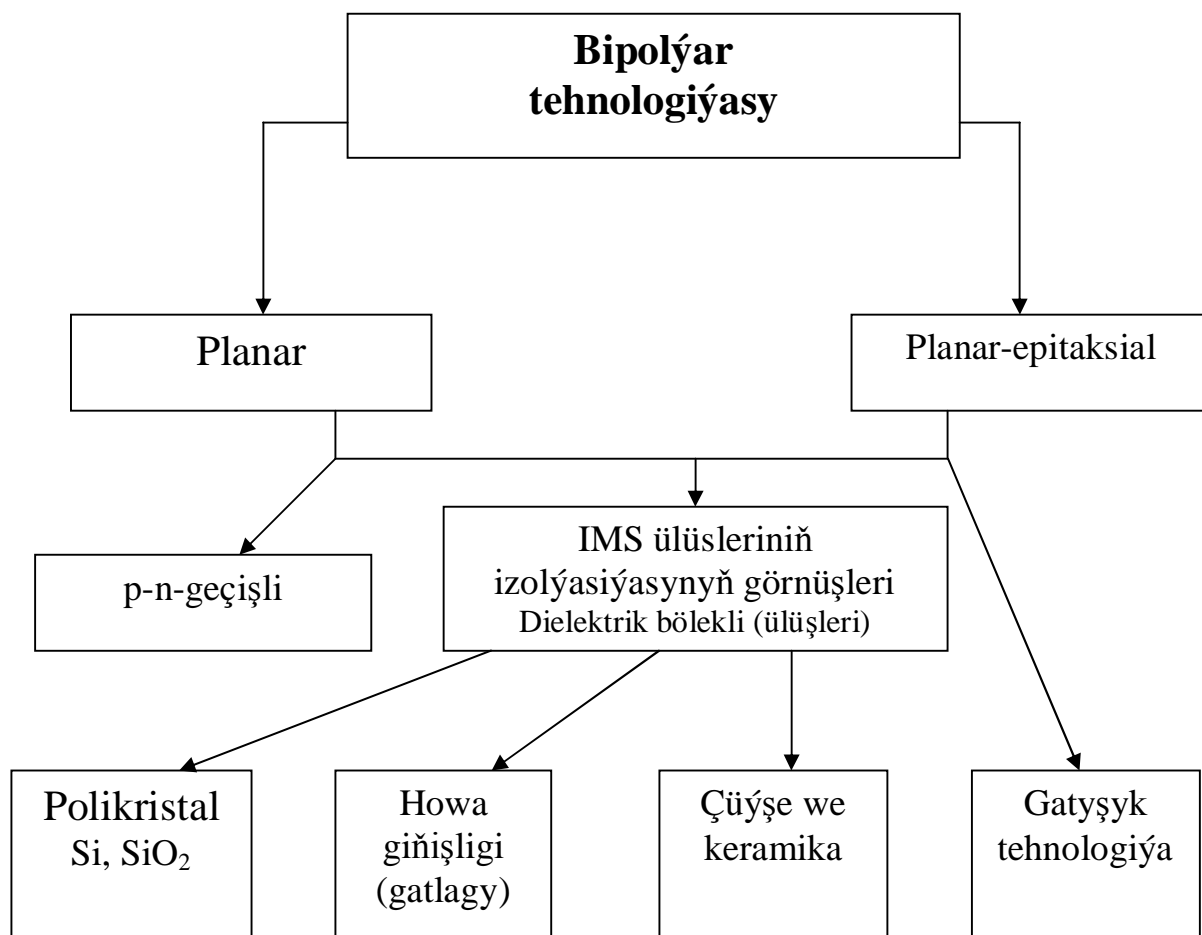
Önümçiligiň yzygiderliginiň klassifikasiýasy (bölünişi).

Ýarymgeçiriji IMS önümçiliginde esasy ugur plastinkada işjeň ülüşler bolan tranzistorlary we diodlary taýýarlamagyň tehnologiýasyna, tehnologiýa usulyna esaslanandyr. Esasy işjeň üleşi bipolar tranzistorlar bolan ýarymgeçiriji IMS-da baş struktura n^+p-n ýarymgeçiriji strukturasyny bolup, kollektor böleginde garyndynyň deň derejede paýlanmagyny gazanmaklyk zerurdyr. Mikroshemanyň ähli işjeň we işjeň däl üleşleri şeýle n^+p-n ýarymgeçiriji strukturanyň esasynda döredilýär. Mysal üçin diod gurluşy üçin, kollektor ýa-da emitter $p-n$ -geçişiň haýsy hem bolsa biri, käbir ýagdaýda ikisi hem peýdalanylýp beliniýär. Rezistorlar tranzistorlaryň baza ýa-da emitter böleginiň esasynda, oňa ikitaraplaýyn birleşikleri döretmek bilen taýýarlanýar. Kondensatorlar,

tranzistor gurluşlarynyň haýsy hem bolsa bir p-n-geçişine ters ugra elektrik meýdanyny bermeklik bilen peýdalanylýar. Kondensatorlar hökmünde köplenç metal-dielektrik-ýarymgeçiriji strukturalar peýdalanylýar. Şeýlelikde, ýarymgeçiriji IMS döretmegiň esasy tehnologiýasy ýokary derejede kämil n^+ -p-n-strukturalary taýýarlamak we gatlaklarda garyndylaryň deň derejede paýlanmagyny gazanmaklyk bolup durýar. Ondan başgada gatlaklaryň arasynda izolýasiýanyň we bu gatlaklara birleşmeleriň ýokary derejede ygtybarly bolmagy zerurdyr.

Ýarymgeçiriji integral mikroshemalary döretmekde (bipolýar tranzistorly mikroshemalarda), planar we planar-epitaksial tehnologiýalar esasy orun eýeläp, tranzistor strukturalaryny döretmegiň esasyny düzýär. Bipolýar tranzistorlara esaslanan ýarymgeçiriji IMS döretmegiň tehnologiýasynyň klassifikasiýasy 11.1 suratda getirilen.

IMS döretmegikligiň tehnologiýasynyň klassifikasiýasynda iki sany düzgün (prinsip) peýdalanylýar: tranzistor gurluşyny döretmegiň we izolirleýji gatlagyny döretmegiň usullary. Belli boluşy ýaly ýarymgeçiriji tehnologiýasynda izolirleýji gatlagyny döretmegiň üç usuly bar: birinji- p-n-geçişe ters ugura daşky elektrik meýdanyny bermek; ikinji-dielektrik gatlagyny döretmek; üçünji-dielektrik gatlagyny p-n-geçiş bilen kombinirlemek.



11.1. Surat. Bipolýar tehnologiýada tehnologik işleriň (prosesleriň) toparlara bölünişi (klassifikasiýasy).

Adaty tehnologiýa.

Adaty tehnologiýanyň mazmuny, p-görnüşli plastinkanyň üstünde alnan n-gatlaga, işlenilip düzülen konstruksiýa laýyklykda, belli bir ýerlerde aýratyn diffuziýa prosessini geçirmeklik hem-de izolirlenen bölekleri döretmeklik üçin bölüji diffuziýany epitaksial gatlagyň turtuş galyňlygyna geçirmeklik bolup durýar. Ýarymgeçiriji IMS işjeň we işjeň däl ülslerini döretmegiň yzygiderligi,

ýagny tranzistor, diod, rezistor, kondensator we shemanyň içki birleşmeleri ýaly ülüşleri döretmeklik, saýlanyp alnan tehnologiýanyň talaplaryna we mümkinçiliklere görä kesgitlenýär.

Bu tehnologiýada ilki bilen birmeňzeş geometrik ölçegleri bolan plastinalaryň toplумы (10-20 sany) taýýarlanylýar. Integral mikroschemasynyň esasy hökmünde köplenç diametri 60-102 mm bolan kremniý plastinalary saýlanyp alnyp olaryň üsti himiki usul bilen arassalanýar. Soňra kremniý plastinalarynyň üstünde okislenme hadysasy geçirilýär ýa-da okis gatlagy çökdürilýär. Ondan soňra plastinanyň üstüne fotorezist çaýylyp, işlenilip, soňky tehnologiýa işleri yzygiderli amala aşyrylýar.

EDEBIÝATLAR

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. Türkmenistan sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. TDNG. Aşgabat, 2007.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, halky söýmek bagtdyr. – Aşgabat. Ýlym, 2007.
3. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň ýurdy täzeden galkyndyrmak baradaky syýasaty. – Aşgabat. Türkmen döwlet neşirýaty gullugy. 2007.
4. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 1t.- Aşgabat: Türkmenistanyň Ministrler Kabinetiniň ýanyndaky Baş arhiw müdirligi, Türkmenistanyň Prezidentiniň Arhiw gaznasy, 2008.
5. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 2t.- Aşgabat: Türkmenistanyň Ministrler Kabinetiniň ýanyndaky Baş arhiw müdirligi, Türkmenistanyň Prezidentiniň Arhiw gaznasy, 2009.
6. Щука А. А. Электроника. Учебное пособие. Санкт-Петербург. БХВ-Петербург. 2006.
7. Гуртов В. Твдотельная электроника. Учебное пособие. Москва. Техносфера. 2005.
8. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. Перевод с французского под редакцией Ермакова О. Н. Москва. Техносфера. 2006.
9. Ермаков О. Н. Прикладная оптоэлектроника. Москва. Техносфера. 2004.
10. Барывин А. А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы. Москва. Физматлит. 2008.
11. Епифанов Г. И., Мома Ю. А. Твдотельная электроника. Москва. Наука. 1986.
12. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В двух книгах. Москва. Мир. 1984.
13. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. Москва. Наука. 1986.
14. Гусева М. Б., Дубинина Э. М. Физические основы твердотельной электроники. Москва. Наука. 1986.
15. Игумнов Д. В., Костюнина Г. П., Громов И. С. Элементы твердотельной электроники. Москва. Наука. 1986.
16. Степанов И. В. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Москва. Наука. 1988.
17. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. Москва. Наука. 1987.
18. Бонч-Буревич В. Я., Калашников С. Г. Физика полупроводников. Москва. Наука. 1990.
19. Лозовский В. Н., Константинова Г., Лозовский С. В. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность. Санкт-Петербург- Москва-Краснодар. Лань. 2008.
20. Зегрия Г.Г., Перел Б.И. Основы физики полупроводников. Москва. Физматлит. 2009.
21. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. Москва. Физматлит. 2008.
22. Ökdirow A., Kulyýew T. Senagat elektronikasy. Aşgabat. Ýlym. 2005.
23. Фистул В.И. Введение в физику полупроводников. Москва. Высшая школа. 1975.
24. Шалимова К.В. Физка полупроводников. Москва. Энергия. 1976.