

## 1-nji sapak

### Tema: Kristallik gözenek. Defektler

#### 1. Giriş.

#### 2. Jisimleriň häsiýetleri we elektrik geçirijiliginiň ululygy boýunça bölünişi

#### 3. Kristallik gözenek.

#### Giriş.

Garaşsyz, Baky bitarap Watanymyz häzirki wagtda hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedowyň parasatly syýasaty we ýadawsyz tagallalary netijesinde ylym-bilim ulgamynda we beýleki ähli ugurlarda täze galkynyş döwrüni başdan geçirýär. Muňa hormatly Prezidentimiziň “Türkmenistanda ýokary derejeli hünärmenleri we ylmy işgärleri taýýarlamagy üpjün etmek hem-de ylmy taslamalara döwlet maliýe goldawyny bermek hakynda” 2008-nji ýylyň ýanwar aýynyň 14-indäki 9378 belgili karary doly şaýatlyk edýär. Hormatly Prezidentimiziň watanyň gülläp ösmeginiň hatyrasyna jan aýaman zähmet çekmäge, ýurduň maddy baýlyklaryny halkyň eşretine gulluk etdirmäge gönükdirilen parasatly we öňdengörüjilikli syýasaty netijesinde halk hojalygynyň ähli pudaklarynda ägirt uly üstünlikler gazanylýar. **Mukaddes Ruhnamada şeýle diýilýär: “Bitarap Türkmenistan ýerasty hem ýerüsti tebigy gymmatlyklara, baýlyklara juda baýdyr. Bu ýerde nebitiň, tebigy gazyň, ýoduň, bromyň, bentonitiň, nahar duzunyň, natriý sulfatynyň, gipsiň, dürli gurluşyk materiallarynyň we beýleki käbir gazylyp alynýan baýlyklaryň uly gorlary bar”. (Saparmyrat Türkmenbaşy Ruhnama 2-nji kitap: 39-njy sah.)**

Şeýle bolansoň, Garaşsyzlyk ýyllarynda ýerli mineral çig mallary öndürýän we gaýtadan işleýän köp sanly önü

mçilikler döredildi we döredilýär. Muňa “Türkmenistany ykdysady, syýasy we medeni taýdan ösdürmegiň 2020-nji ýyla çenli döwür üçin Baş ugry” Milli Maksatnamasynda we nebit-gaz senagatyny ösdürmegiň Türkmenistanyň XVII Halk Maslahatynda kabul edilen 2030-nji ýyla çenli döwür üçin Maksatnamasynda öňde goýlan ägirt uly wezipeler doly şaýatlyk edýär. Bu resminamalara laýyklykda, halk hojalygynyň köp senagat önümlerine we materiallara bolan islegi öz ýerli baýlyklarymyzyň hasabyna kanagatlandyrylýar we daşary ýurtlara satylýar. Olardan eýýäm üstünlikli işe girizilen Türkmenbaşynyň nebiti gaýtadan işleýän zawodlar toplumyny, Tejenin karbamid, Baharlynyň sement zawodlaryny, Yaşlyk şäherçesindeki kagyz önümçilik toplumyny, Ruhabadyň turba zawodyny görkezmek bolar. Ýokary derejede awtomatlaşdyrylan we kompýuterleşdirilen bu önümçilikler in öňdebaryjy häzirki zaman tilsimatlary we enjamlary bilen abzallaşdyrylan.

*“Türkmenistanyň bazar özgertmeleriniň maksatnamasyny tutanyerli we yzygiderli durmuşa geçirýänligi, demokratik institutlary emele getirýänligi, halkyň in ýokary bähbitleriniň şanyna we hatyrasyna häzirki zaman döwletini gurýanlygy*

*hiç kimde hiç hili şübhe döretmeli däldir. Biziň Garaşsyzlyk alan günümüzden bäri geçen ýyllaryň içinde gazanan esasy üstünligimiz-munuň özi şu maksada ýetmek üçin halk bilen döwletiň bitewiligidir.*

**Biz XXI asyra öz ýolumyz bilen gideris, ilkinji, iň çylşyrymly döwrüniň meýilnamalaryny durmuşa geçirmek häzirki nesliň üstüne düşýär.”**

Elektronika bu elektronlara (zarýadly bölejiklere) elektrik we magnit meýdanlarynyň täsiri netijesinde ýüze çykýan fiziki hadysalary, fiziki kanunalaýyklyklary we eşleşiniň esasynda (iş prinsipi) şu özara täsir ýatan abzallaryň (priborlaryň) esasy häsiýetnamalaryny, işleýşini we ulanylyşyny öwrenýän ylymdyr.

Elektronika ylmy (pudagy) gaty giň bolup, esasan üç sany uly ylmy-tehniki ugra bölünýär:

1. Wakuum elektronikasy.
2. Gaty jisimler elektronikasy.
3. Kwant elektronikasy.

Bu ugurlaryň içinde iň bir çalt depgin bilen ösýäni gaty jisimler elektronikasydyr. Soňky 30-40 ýylyň içinde gaty jisimler elektronikasy görülip-eşidilmedik derejede ösdi. 1960 ýyllarda gaty jisimler elektronikasynyň esasy ýönekeý bipolar tranzistorlar, diodlar düzen bolsa, şu gün gaty jisimler elektronikasynyň esasynda çylşyrymly uly integral shemalary, çylşyrymly opoelektron gurluşlary, olaryň taýýarlanylş tehnologiýasy dürýär.

Gaty jisimler elektronikasy – häzirki zaman elektronikasynyň iň bir çalt ösýän ugry bolup, esasan ýarymgeçiriji materiallarynyň esasynda taýýarlanylýan abzallaryň (priborlaryň) işleýşiniň fiziki esaslaryny, taýýarlanylş tehnologiýasyny, işleýşini we bu abzallaryň dürli elektrik zynjyrlarynda, tehnikada ulanylyşyny öwrenýän ylymdyr.

#### **Jisimleriň häsiýetleri we elektrik geçirijiliginiň ululygy boýunça bölünişi.**

Özleriniň elektrik geçirijiliginiň ululygy we häsiýeti boýunça hemme jisimleri üç topara bölüp bolýar: 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 ýokarydyr. Metallarda elektrik geçirijiligi emele getirýan erkin elektronlaryň sany  $n = 10^{22}$  sm<sup>-3</sup> 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, izolýatordyrlar. 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) artmagy bilen dielektrikleriň udel garşylygy azalýar.

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

Ýöne ýarymgeçirijileri häsiýetlendirýän esasy zat olaryň elektrik geçirijiligi dälde, onuň üýtgemek tebigatydyr: OK arassa ýarymgeçirijiler dielektriklere meňzeş izolýatorlardyr. Bu bolsa erkin elektronlaryň konsentrasiýasynyň nola

deňdigini görkezýär. Temperaturanyň ýokarylanmagy bilen erkin elektronlar emele gelip (oýandyrylyp) olaryň konsentrasiýasy eksponenta boýunça artýar. Metallarda bolsa erkin elektronlaryň konsentrasiýasy temperatura baglylykda kän üýtgemeyär.

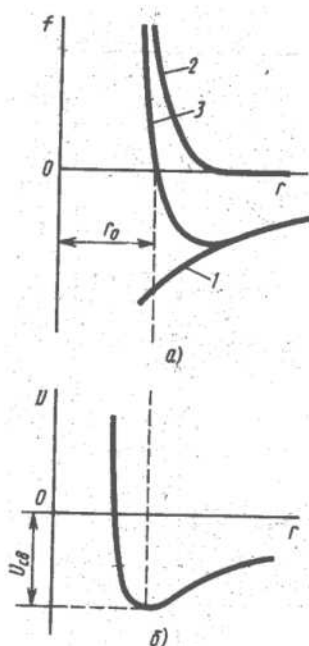
Ýarymgeçirijilerde erkin zarýadlaryň konsentrasiýasynyň artmagy, olaryň udel garşylygynyň eksponenta boýunça kemelmegine alyp gelýär. Belli boluşy ýaly metallarda temperaturanyň artmagy bilen udel garşylyk artýar.

Ýarymgeçirijileriň geçirijiligini başga dürli daşky täsirleriň üsti bilen hem artgymak mümkin: ýagtylyk, elektron akymy we beýleki ýokary energiýaly bölejikleriň täsiri.

Kristallik, organiki, amorf materiallaryň gaty köpüsi ýarymgeçiriji we dielektrik häsiýete eýedir. Meselem Mendeleewiň tablissasynyň IVB topar elementleri we VIB topar elementleri ýarymgeçirijilerdir. Mendeleewiň tablissasynyň III-V topar elementleriniň birleşmeleri ýarymgeçiriji häsiýete eýe bolup, bu ýarymgeçirijiler gaty jisimler elektronikasynnda giňden peýdalanylýar.

### **Kristallik gözenek.**

Atomlar we molekulalar bir-birine golaýlaşanda olaryň arasynda özara täsir güçleri ýüze çykýar. Otnositel uzak aralykda atomlaryň we molekulalaryň arasynda özara dartýş güýji  $f_d$  ýüze çykýar we aralygyň ýakynlaşmagy bilen artýar. Bölejikler belli bir aralyga çenli ýakynlaşandan soň özara itekleýiş güýji  $f_{it}$  ýüze çykyp, aralygyň kiçelmegi bilen özara dartýş güýjüne seredende çalt artýar.



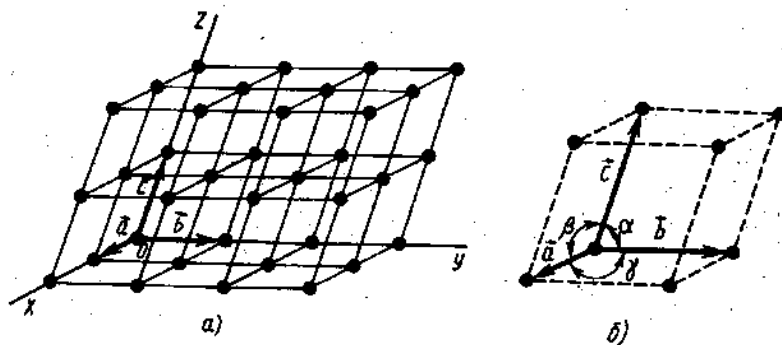
1.1-nji surat. Bölejikleriň arasyndaky özara täsir güýjüň (a) we energiýanyň (b) olaryň arasyndaky aralyga baglylygy.

Belli bir  $r = r_0$  aralykda özara dartýş we itekleýiş güýçleri deňleşýär. 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 translýasiýa gözenegine we esasy gözenege seredeliň.

### Brawe gözenegi.

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



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

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

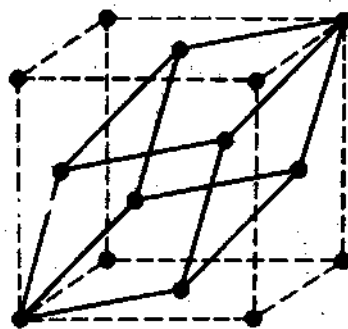
$$\mathbf{r} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + p\mathbf{c} \quad (1.1)$$

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

Haýsy hem bolsa bir düwüni translýasiýa ugry boýunça  $(x,y,z)$  parallel göçürmek bilen alynan gözenege - Brawe gözenegi giýlip at berilýär.  $a$ ,  $b$ ,  $c$  wektorlar esasynda gurulan iň kiçi parallelepiped, kristallyň gözeneginiň elementar ülüşi diýilýär. Kristallyň gözeneginiň elementar ülüşi alty sany ululyk bilen häsiýetlendirilýär üç sany ýaçeýkanyň gapyrgalary  $a$ ,  $b$ ,  $c$  we olaryň arasyndaky burçlar  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Bu ululyklara ýaçeýkanyň parametrleri diýilýär. Formasy boýunça ýönekeý ýaçeýkanyň ýedi görnüşi bar: triklin, monoklin, rombiki, romboedriki, geksoagonal, tetragonal we kubiki.

### Ýönekeý we çylşyrymly gözenekler.

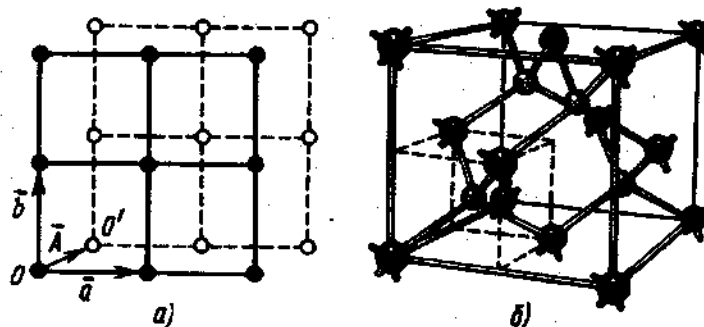
Gözenegiň ýönekeý üleşindäki düwünleriň sany boýunça gözenegi ýönekeý we çylşyrymly görnüşlere bölýärler. Ýönekeý gözenekde bir üleşde bir sany düwün ýerleşýär, emma çylşyrymly gözenegiň üleşünde birnäçe düwün ýerleşýär. Meselem göwrüm boýunça sentrirlenen gözenek (GS) iki düwünli gözenekdir, ýöne üstler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



1.3. Surat. Dört düwünli gapdal üst boýunça sentrirlenen 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 üleşini parallel göçürüp hemme gözenegi gurup bolmaýar. 1.4a suratda ikiölçegli gözenek umumy görnüşde görkezilen.



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

Şeýle gözenek gurulan ýagdaýynda, ony bir düwünli gözenegiň üleşi 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,  $O$  we  $O'$  düwünlerden durýan bazisi parallel göçümeçlik bilen alyp bolýar. 1.4b suratda üç ölçegli gözenegiň mysaly hökmünde almazyň gözenegi görkezilen. Bu gözenegi bir-birine görä göwrüm diagonallary boýunça  $1/4$  diagonalýň uzynlygyna süýşürilen iki sany üst boýunça sentrirlenen gözenegiň esasynda gurmak mümkin.

Kristallarda düwünleriň, ugurlaryň we tekizlikleriň belenilişi. Milleriň indeksi.

Düwünleriň indeksleri.

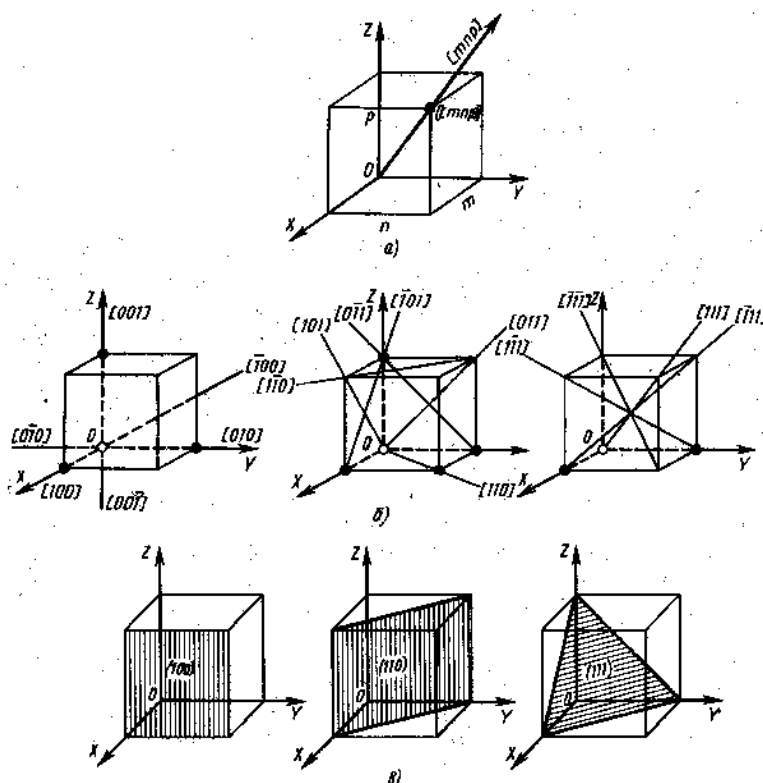
Kristallik gözenekde islendik düwüniň ýerleşşi üç sany koordinata boýunça tapylýar (x, y, z).

Ýönekeý ýagdaýda:

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

bu ýerde a, b, c - gözenegiň häsiýetnamalary. m, n, p – бүтін санлар, санlara

дүwүniň indeksleri diýilip at berilýär we şeýle belleniýär  $[[m \ n \ p]]$  (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).

Ugruň indeksleri.

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

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

Tekizligiň indeksleri.

Goý kristallografiki tekizlik koordinatalar 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 getirip, alýarys

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

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

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

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

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

Bu ýerde  $h = 2$ ;  $k = 3$ ;  $l = 5$ .

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

## 2-nji sapak

**Tema: Kristallarda defektler we olaryň görnüşleri: çyzykly, nokatlanç, üstleýin. Dislokasiýalaryň, defektleriň dykzlygynyň hasaplanylşy.**

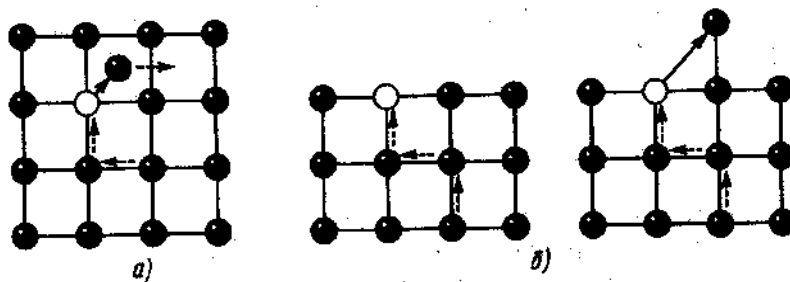
### Kristallardaky defektler.

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 çykýan defektler birnäçe görnüşe bölünýär: 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 Frenkeliň defektleri diýilip at berilýär (2.1 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 (2.1 surat). Şeýle defektleriň çëshmesi kristallardaky käbir bar bolan gurluş kemçilikleri bolup bilýär.



2.1-nji surat. Frenkel (a) we Şottki (b) defektleriň ýüze çykyşy.

Kristallardaky defektleriň dykzylygy, 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, egerde kristalda  $N$  düwün we  $N_1$  düwün ara baglanşyklar bar bolsa, onda formulanyň üsti bilen tapylýar.

$$N_F = \sqrt{N \cdot N_1} \cdot \exp\left[-\frac{U_F}{(2kT)}\right]. \quad (2.1)$$

Üst (Şottki) defektleriniň deňagramlykdaky sany:

$$N_S = N \cdot \exp[-U_S/(kT)], \quad (2.2)$$

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 çykman, beýleki atomlary süýşürüp aralygyna girmeli. Şeýle defektleriň ýüze çykmaklygynyň mümkinçiligi dürli atomly kristallarda uludyr. Birmeňzeş atomly kristallarda diňe Şottki defektleriniň ýüze çykmaklygynyň mümkinçiligi uludyr.

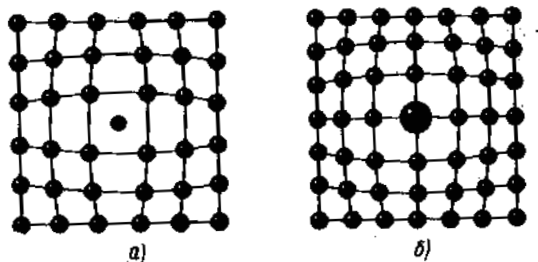
#### Garyndylar.

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 aralynda (внедрение) we düwündäki

atoma derek olaryň ýerinde (замещение) ýerleşip bilýär. Garyndylaryň atomynyň

diametrine baglylykda kristallik gözenende deformasiýa ýüze çykýar (2.2 surat).



2.2-nji surat. Girizme (a) we çalyşma (b) garyndy atomlary.



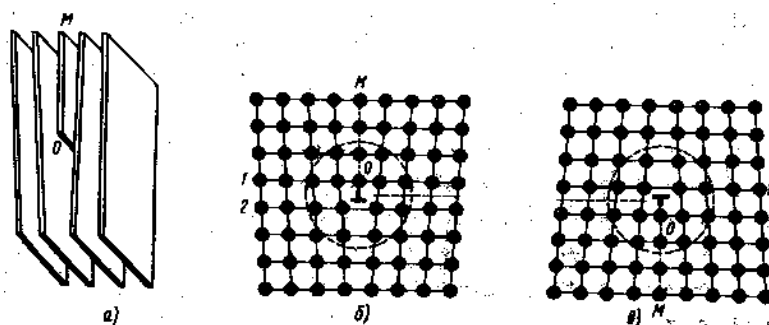
Häzirki zaman tehnologiýasy kristallary  $10^{-9}\%$  çenli arassalamaga mümkinçilik berýär. Şeýle arassa kristalda hem  $1\text{ sm}^3$  - göwrüme  $10^{11}$  atom galýar. Şol sebäpli hem gaty ýokary derejedäki arassa kristallara bolan isleg artýar.

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

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, 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  $10^2$ - $10^3\text{ sm}^{-2}$  töweregidir.

#### Çyzykly defektler.

Çyzykly defektler gyra we aýlow (wintowoy) dislokasiýalar girýär. Gyra dislokasiýasy. Kristalik gözenegiň atomlarynyň tekizliginiň haýsy hem bolsa biri tutuş kristal boýunça dowam etmän, kristalyň içinde üzülsin (2.3. Surat).



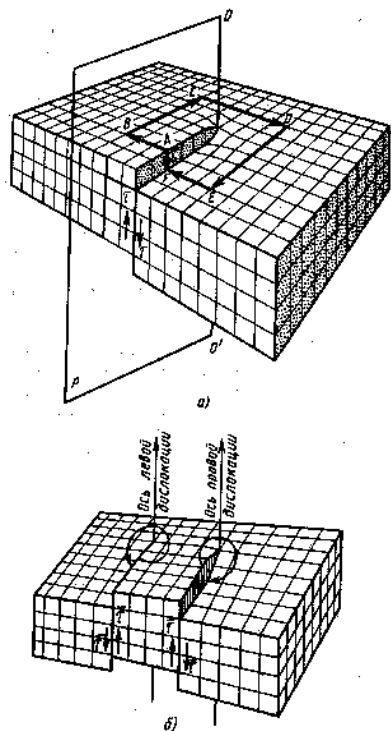
2.3. Surat. Gyra dislokasiýalaryň shemasy:

a) Kristalyň içinde ýüze çykýan, M – tekizligiň gyrasy, gyra dislokasiýasyny emele getirýär; b) O – merkezde položitel dislokasiýaly atomlaryň ýerleşşi; d) Şol merkezde otrisatel dislokasiýalar. Dislokasiýanyň ýaýran ýeri punktir bilen bellenen.

Bu tekizligiň gyrasy çyzykly defekti emele getirýär, şeýle defekte gyra ýa-da çyzykly dislokasiýa diýilip at berilýär. 2.3 suratda gyra dislokasiýasyna perpendikulýar ugurda atomlaryň ýerleşşi görkezilendir. Artykmaç atom tekizlige bolan OM tekizlige ekstratekizlik diýilip, onuň üzülýän nokady bolan O nokada dislokasiýa merkezi diýilýär. 2.36 suratda görkezilişi ýaly atom yzygiderligi 1 aşakda ýerleşen atom yzygiderligi 2 seredende bir atom artykmaç saklaýar. Dislokasiýa merkeziniň ýakynynda gözenegiň hemişeligi özgeren bolup, dislokasiýa merkezinden daşlaşmak bilen öz adaty ýagdaýyna gelýär.

#### Aýlowly dislokasiýalar.

Daşky güýjiň täsiri netijesinde, P tekizlikde kristalyň bir bölegi beýlekisine seredende süýşsin (2.4 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 süýşlendirler. Bu süýşme gözenegiň ýerli (lokalnyý) özgermegine getirip, oňa wint görnüşli (aýlawly) dislokasiýa diýilýär. OO' oka dislokasiýa oky diýilýär.



2.4. Surat. Buraw dislokasiýasy üçin Bürgersiň ABCDEF kontury we Bürgersiň  $b$  wektory ( $a$ ); sag we çep buraw dislokasiýalary.

2.4a suratda Bürgersiň kontury görkezilen. Suratdan görnüşi ýaly bu kontury ýapmaklyk üçin goşmaça  $b = \vec{F} \cdot A$  wektory girirmek zerur.  $\vec{F} \cdot A$  wektor dislokasiýa okuna parallel bolup oňa Bürgersiň oky diýilip at berilýär. Aýlawly dislokasiýalaryň sag we çep aýlawly görnüşleri bardyr.

### 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 sekuntdan birnäçe minuda çenli üýtgeýär. Bu bölekleriň bir birine geçýän ýerinde dislokasiýalar emele gelip, olaryň aralygyndaky burçuň artmagy bilen defektleriň dykyrlygy artýar.

### Ýerleşme defektleri.

Kristallik gözenekde atomlaryň ýerleşiş tekizliginiň düzgün boýunça bolmalysyndan islendik gyşarmasyna ýerleşme (upakowka) defekti diýilýär. Atom gatlaklarynyň düzgünli ýerleşişiniň bellenilişi atomlaryň ýerleşişiniň yzygiderligi bolup durýar, ýagny: ABCABC.... Emma kristalyň ösmeginde, ýa-da olaryň deformasiýasynda, atomlaryň ýerleşiş yzygiderliginiň ýa-da atom gatlaklarynyň ýerleşişiniň bozulmagy mümkin, ýagny atomyň  $a$  gatlagyndan soň  $b$  gatlagy derek  $c$  gatlagy ýerleşýär. Şeýle ýerleşme defekte aýrylma (wyçitaniýe) tipli 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 elektronikasynnda, fotoenergetikada, ýylylyk öwrüjilerinde we ş.m. dürli kristallary peýdalanmak üçin olaryň göwrümündäki, üstündäki defektleriň dykyzlygyny anyklamaklyk, olaryň emele geliş sebäplerini öwrenmeklik zerur bolup durýar. Defektleriň dykyzlygyny tapmaklyk üçin üsti ýa-da kese kesigi ilki tekizlenilip soňra ýylmalanan plastina himiki usul, bilen arassalanýar we onuň üstki gatlagy dürli kislotalaryň ergini bilen iýdidilýär. Şeýle ýagdaýda defektler has gowy ýüze çykýar, görünýär. Sonra optiki mikroskopyň kömegi bilen belli bir aýratyn alnan meýdanda defektleriň sany tapylýar. Soňra birlik meýdanda näçe defektiň barlygy hasaplanylýar. Şeýle hasaplama bilen tapylan kristaldaky, plastinadaky defektleriň dykyzlygy uly ýalňyşlyga getirmeýär. Gaty jisim elektronikasynyň tehnologiýasynnda giňden peýdalanylýar.

### 3-nji sapak

**Tema: Gaty jisimleriň zona nazariýetiniň esaslary.**

1. **Izolirlenen atomda elektronyň energetiki derejeleri.**
2. **Elektronlaryň kristalda umumylaşdyrylyşy.**
3. **Elektronyň kristaldaky tolkun funksiýasy.**

XX-asyryň başynda fizikler, atomlar we molekulalar derejesinde bolup geýýän 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 Şredengeriň deňlemesini şeýle görnüşde ýazyp bolýar.

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

$$\Psi \cdot \Psi^* = |\Psi|^2 = (\psi_1 + i\psi_2) \cdot (\psi_1 - i\psi_2) = \psi_1^2 + \psi_2^2 \quad (3.1)$$

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

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

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

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

$$E_{bd} = -\frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2} * \frac{1}{n^2}, \quad (3.2)$$

bu ýerde  $\varepsilon_0$  wakuumda dielektrik syzyjylyk,  $\hbar$  - Plankyň hemişeligi.  $e$  we  $m$  - elektronyň zarýady 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 atumlarda elektronlar diňe bir ýadro bilen täsir edişmän, olar bir-biri bilen hem täsir edişýärler. Şol sebäpli hem Şredengeriň deňlemesi gaty kynlaşyp onuň takyk çözgüdini almaklyk mümkin däl.

#### Elektronlaryň kristaldaky ýerleşişini we tolkun funksiýasy.

Gaty jisimlerde atamlaryň aralygy gaty golaý, şol sebäpli hem islendik atomyň walent elektrony goňşy atamlaryň güýçli täsirinde ýerleşýärler. Ilkinji şertde gaty jisimiň atamlary gözenekde hereketsiz berkidilen diýip hasap etseň, Şredengeriň deňlemesini walent elektronlar sistemasynyň stasionar ýagdaýy üçin şeýle görnüşe eýe bolar.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z_i^2} \right) + U(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots) \Psi = E \Psi \quad (3.3)$$

Bu ýerde  $x_i, y_i, z_i$  -i elektronyň koordinatalary,  $E$  hemme elektron sistemalarynyň energiýasy. Elektronlar sistemasynyň tolkun funksiýasy hemme elektronlaryň koordinatalaryna baglydyr.

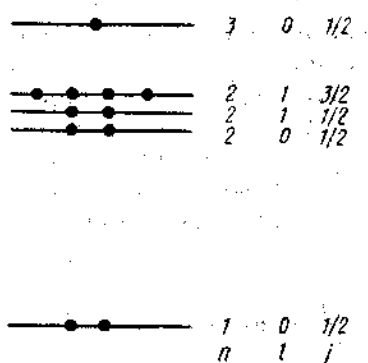
$$\Psi = \Psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots)$$

(3.3) 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 (3.3) umumy görnüşde çözmek mümkin däl. Bu deňlemäni ýeke-täk elektron üçin, ýagny  $\psi_i$  funksiýany bir elektronyň koordinataryna bagly ýagdaýda çözmegiň mümkinçiligi bar.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial z^2} \right) + U_i(x, y, z) \psi_i = E_i \psi_i \quad (3.4)$$

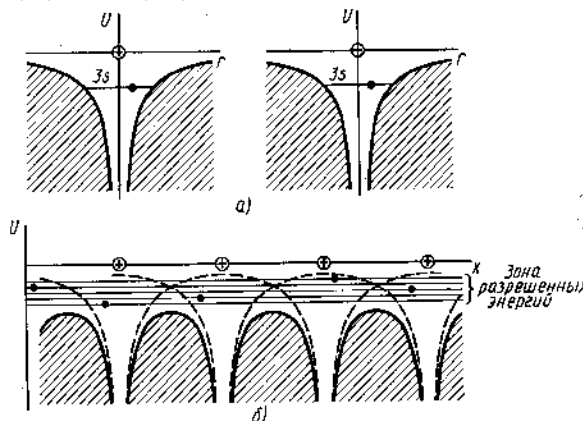
bu ýerde  $E_i$  i elektronyň energiýasy. Bu meseläni çözmek üçin gaty çylşyrymly, sebäbi her elektronyň ýagdaýy  $u(x,y,z)$  beýleki elektronlaryň ýagdaýyna bagly bolup galýar. Elektrony ideal kristalda, ýagny periodik kristallik

gözenekde, garyndy atom ýok ýagdaýynda seredeliň. Şeýle kristalda atomlar (ionlar) ideal potensial meýdanyny döredýär. Walent elektronynyň hereketini şeýle ideal kristalda, natriniň mysalynda seredeliň. (3.1 surat).



3.1. 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. (3.2-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 geler. 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 barýeri böwsüp geçme hadysasy ýüze çykýar.

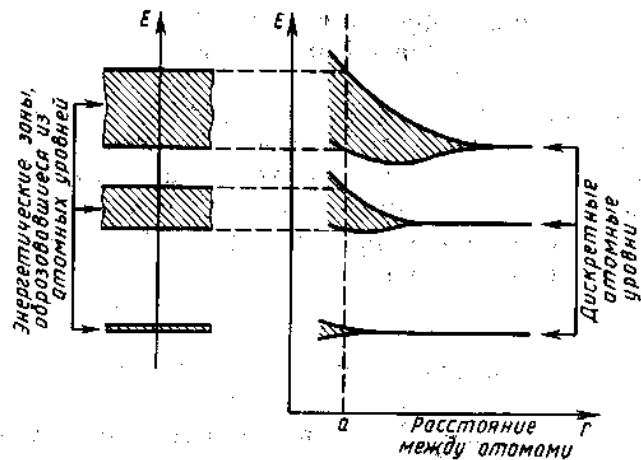


3.2. Surat. Atomlaryň golaýlamagy bilen elektronlaryň ýerleşiş ýagdaýynyň üýtgemegi.

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

Şeýlelikde, umumy laşan elektronlar kristalda özünü belli bir derejede erkin elektronlar ýaly alyp barýarlar. Seredýän mysalymyzda Na atomlarynda golaýlaşmazdan ozal 3s walent elektronlar 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 ugry 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 3.3 suratda görkezilen.

3.3-nji surat. Energetiki derejeleriň ýaýylmagy we kristalda energetiki zonanyň emele gelmegi.

#### Elektronyň kristaldaky tolkun funksiýasy.

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

$$\psi = Ce^{i(kr - \omega t)} \quad (3.5)$$

bu ýerde  $C$  - hemişelik koefisiýent,  $k$ -elektronyň tizligini we energiýasyny kesgitleýän tolkun wektory.

Blohyň teoremasyna laýyklykda elektronyň stasionar ýagdaýynyň tolkun funksiýasy şeýle görnüşe eýedir.

$$\psi(\mathbf{r}, t) = u(\mathbf{r}) e^{i(kr - \omega t)} \quad (3.6)$$

bu ýerde  $u(\mathbf{r})$  - gözenegiň periodyna bagly (deň) periodik köpeldiji. Bu funksiýalar bir-birine meňzeşdir, sebäbi ikisinde-de şol bir köpeldiji  $e^{i(kr - \omega t)}$  bar. Tapawudy bolsa, Blohyň funksiýasyndaky, kristalyň haýsy ýerinde elektronyň bolmagynyň ähtimallygyny kesgitleýän periodiki köpeldiji  $u(\mathbf{r})$ , her ýönekeý ýaçeýkada koordinata baglydyr. Tolkun wektorynyň ( $k$ ) 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 ýagdaýda şeýle ýazylýar.

$$u(\mathbf{r}) = u_{n,k}(\mathbf{r}) \quad (3.7)$$

Onda (6) funksiýany şeýle ýazyp bolar.

$$\psi_{n,k}(\mathbf{r}) = u_{n,k}(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} \quad (3.8)$$

Elektronlaryň kristaldaky öňe hereketi.

Elektronlaryň toparlaýyn tolkun hereketiniň geňişlikdäki tizligi - elektronýň toparlaýyn tizligi – onuň tolkun wektory bilen şeýle gatnaşyk boýunça bageýdyr.

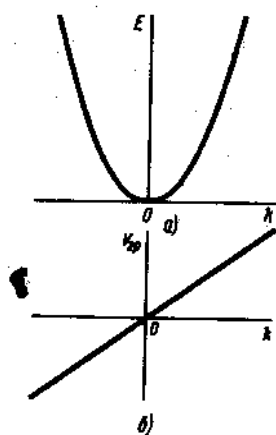
$$v_t = \frac{\hbar}{m_e} \cdot k, \quad (3.9)$$

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

Erkin elektronýň energiýasy:

$$E = E_k = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{m_e \hbar^2 k^2}{2m_e^2} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \quad (3.10)$$

Şeýlelikde erkin elektronýň energiýasynyň tolkun wektory bilen baglansygy parabola görnüşindedir. Şeýle elektronlar üçin  $v_t = f(k)$  baglansyk göni çyzyklydyr. (3.4 surat).



3.4. surat. Erkin elektronýň 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 elektronýň tolkun toplumynyň (paketiniň) kristaldaky tizligi şeýle kesgitlenilýär.

$$v_t = \frac{1}{\hbar} \text{grad}_k E \quad (3.11)$$

Bu ýerden tizligiň  $x$  oky boýunça düzüjisi

$$v_t = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{\partial E}{\partial k_x} \quad (3.12)$$

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

$$v_t = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{\partial E}{\partial k_y} \quad ; \quad v_t = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{\partial E}{\partial k_z} \quad (3.13)$$

#### Elektronýň daşky güýjüň täsiri esasyndaky hereketi.

Haçanda ideal kristalda daşky güýç täsir etmese, elektron islendik stasionar 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: elektronlaryň toparlaýyn tizliginiň ugruna, daşky güýjüň täsiri esasynda, elektronýň energiýasynyň üýtgemesi:

$$dE = Fdx = F v_t dt \quad (3.14)$$

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

$$\text{onda } dE = \frac{F}{\hbar} \frac{dE}{dk} dt \quad (3.15)$$

$$\text{ýa-da umumy görnüşde } \frac{d}{dt}(\hbar k) = F \quad (3.16)$$

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

$$a = \frac{dv_t}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} \right) \quad (3.17)$$

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

$$a = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2 E}{dk^2} \frac{dk}{dt} \quad (3.18)$$

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

$$a = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2} F \quad (3.19)$$

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

$$m_{ef} = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}} \quad (3.20)$$

$m_{ef}$  - 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 biler, onuň massasynyň ululygy erkin elektronyň massasyndan uly hem-de kiçi bolup biler.



## 4-nji sapak

**Tema: Zonalaryň elektronlar bilen doluşy. Jisimleriň metallara, dielektriklere we ýarym geçirijilere bölünişi.**

*Hususy ýarymgeçirijiler. Ýarymgeçirijileriň garyndyly geçirijiligi. Deşikler hakynda düşünje. Gadagan zona. Gadagan zonadaky aýratyn derejeler. Ýarymgeçirijileriň fotogeçirijiligi.*

### **Gaty jisimleriň zona nazarýetiniň başdaky düşüňjeleri**

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

■ Bu we başga-da köp soraglara gaty **jisimleriň zona nazarýetinde** jogaplar tapyldy. Bu nazarýetde kristalliki gaty jisim kadaly periodiki gurluş ýaly seredilýär, onda ionlar elektriki meýdanyny döredýär. Mesele bu meýdanda elektronlaryň özlerini alyp barylaryny ýazyp beýan etmekdedir. Munuň ýaly köp bölejikler ulgamy üçin Şredingeriň deňlemesini takyk çözmek mümkin dädir. Meseläni çözmegiň göräýmäge biri-birine gapma-garşy, ýöne birmeňzeş netijä getirýän iki usuly bardyr. Birinji usul - ýakynlaşma, baglanşan elektronlardan ugur alýar (berk baglanşyk ýakynlaşmasy). Bu usulda köp sanly izolirlenen atomlaryň toplumy bar, olaryň her biriniň elektronlary özleriniň diskret energetiki derjeleriniň ulgamyna eýedirler diýip düşünilýär. Elektronlaryň “öz” atomlary bilen baglanyşyk energiýasy olaryň kristalliki gözenekdäki hereketiniň kinetiki energiýasyndan has uly hasap edilýär. Izolirlenen atomlaryň ýakynlaşmagy bilen we olardan kristal emele gelende energetiki derejeler bilen näme bolup geýýändigine seredilýär. Elektronlaryň öz atomlary bilen baglanyşyklary şeýle güýçli, atomlar özleriniň ölçegleri bilen deňräk aralyga golaýlaşanlarynda diňe walent elektronlar bir atomdan beýleki atoma geýýär.

■ Ikinji usul erkin elektronlaryň ýakynlaşmasyndan ugur alýar (gowşak

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

### Güýçli baglanşyk ýakynlaşmasynda kristallarda energetiki zonalar

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

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

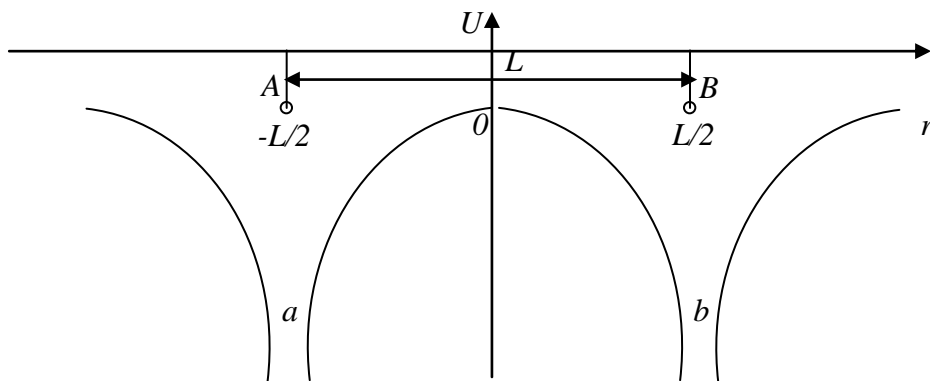
Oýandyrylan ýagdaýlarda bolýan atomlarda elektronlaryň energetiki derejeleri, energiýa we wagt üçin kesgitsizlik gatnaşygy bilen baglanşan, çäkli  $\Delta W_{n,\ell}$  ine eýedir. Şu formulanyň ikinjisine laýyklykda  $\Delta W_{n,\ell} \tau_n \geq h$ .

Atomyň oýandyrylan ýagdaýdaky ýaşaýyş wagty  $\tau_n$  elektronyň bu ýagdaýda ýaşaýyş wagty bilen gabat gelýär:

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

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

Görnüşi ýaly bu in  $\sim 1 eW$  tertibi bolan derejeleriň arasyndan örän kiçidir.



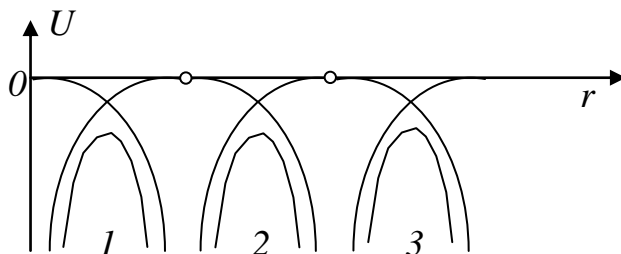
4.1. surat

■ Eger izolirlenen goňşy atomlar A we B biri birinden  $L \gg d$  aralyga

uzaklaşdyrylan bolsa, bu ýerde  $d$  – atomyň diametri, onda walent  $a$  we  $b$  elektronlar üçin goňşy atomlardaky potensial çukurlar örän giňdir, elektronlaryň olaryň içinden geçmeginiň ähtimallygy nola deň diýen ýalydyr. Elektronlar öz atomlaryna, “daňylandyrlar” we kristalda erkin elektronlar ýokdur (4.1-nji surat).

Atomlar golaýlaşdyrylanda, mysal üçin kristalliki gözenegi simmetriýasyny bozman gysylanda atomlaryň arasyndaky özara täsir artýar. Haçanda  $L$  – aralyk

kristalliki gözenegiň parametri  $d$  – bilen deňeşdirer ýaly ( $L \approx d$ ) ululyga çenli kiçeldise, atomlaryň özara täsiri olaryň elektriki meýdanlarynyň örtülmesine (kesişmesine) getirýär. Goňşy atomlary araçäklendirýän potensial egriler az-kem biri-biriniň üs tüne düşýär we elektronlar üçin 1-2 görnüşli potensial egrilerini berýär (4.2-nji surat).



4.2. surat

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

■ Hasaplamalary ýönekeýleşdirmek üçin potensial çukury gönüburçly hasap edeliň. Onda çukuryň durulygyny aşakdaky formula boýunça hasaplamak mümkindir

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

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

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

$$v = Dn \approx \frac{v}{2a} \exp \left[ -\frac{2d}{h} \sqrt{2m(U_0 - W)} \right]. \quad (4.1)$$

Hemme ululyklaryň san bahalaryny goýup alarys  $v \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ . Berlen atomdaky walent elektronyň ýaşaýyş wagty  $\tau$  ýygylgyga ters ululykdyr:

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

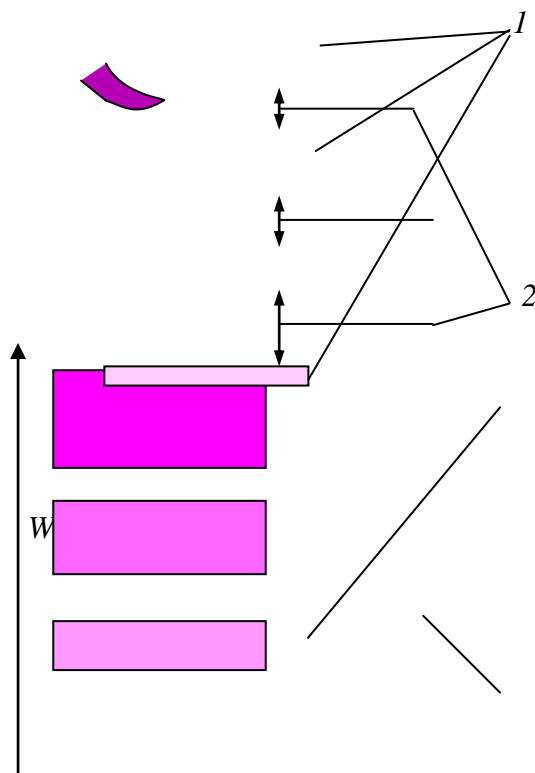
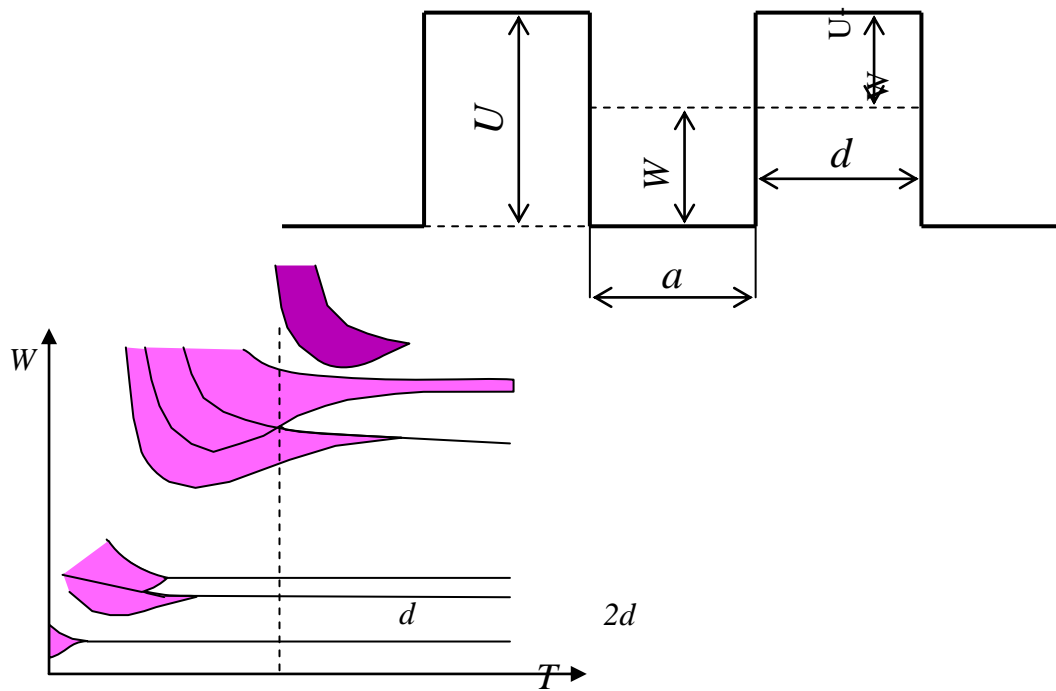
Görnüşini ýaly, bu ýagdaýda  $\tau$  walent elektronyň izolirlenen atomdaky oýandyrylan ýagdaýdaky ýaşaýyş wagtyndan ýedi derejä kiçelýär.  $\tau$ -nyň munuň ýaly bahalarynda walent elektronlaryň kesgitli atomlara degişlidi-gi barada aýtmagyň manysy ýokdyr. Olar “umumylaşdyrylan”, bileleşen bolýarlar we kwant gazyny emele getirýärler. Bu elektronlar kristal boýunça hereket edip bilýärler.

■ Kristalda atomlaryň özara täsirleri netijesinde ýaşaýyş wagtynyň çürt-kesik

kemelmegi bilen bagly bolan elektronyň  $\Delta W$  energetiki derejesiniň deňlemesini tapalyň. Kesgitsizlik gatnaşygy boýunça

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

4.3. surat



4.4-nji surat

4.5. surat

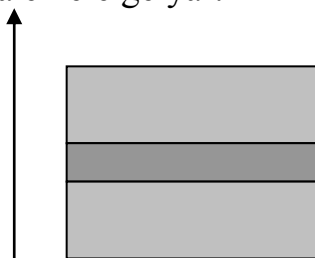
Izolirlenen atomdaky walent elektronynyň insiz energetiki derejesi kristalda inli zolaga –ini elektron-wolt birligi tertipli elektronlaryň **energiýasynyň gadagan däl bahalarynyň zonasyna** giňelýär (4.5-nji surat). Gadagan däl energetiki zonalary (1) biri-birlerinden elektronlaryň energiýasynyň gadagan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

■ Atomyň içki gabygynyň elektronlary üçin elektronynyň bir atomdan beýleki atoma syzyp (tunnel) geçişiniň ähtimallygy örän kiçidir. Bu potensial çukuryň durulygynyň kiçelmegi bilen baglydyr, netijede elektronynyň potensial çukur arkaly syzyp geçmeginiň  $\nu$  ýygylgy örän kiçelýär. Mysal üçin, esasy ýagdaýda Na atomyň elektronlary üçin  $\nu \approx 10^{-27} \text{ s}^{-1}$  we degişlilikde elektronynyň berlen atomyndaky orta ýaşayyş wagty  $\tau \approx 10^{20}$  ýyl. Diýmek, kristallarda atomlaryň içki gabyklarynyň elektronlary hem “öz” atomlary bilen izolirlenen atomlardaky ýaly berk baglanandyrlar. Kristallarda bu elektronlaryň energetiki derejeleri hem ýeke bir atomdaky ýaly insizdir.

#### Metallar, dielektrikler we ýarymgeçirijiler

■ Zona nazarýetinde gaty jisimleriniň dürli görnüşleri elektrik häsiýetleri boýunça,

energyýanyň gadagan we gadagan däl zonalarynyň ýerleşişleriniň häsiýetleri bilen tapawutlanýarlar. Energiýanyň gadagan däl zonalarynyň ininiň izolirlenen atomdaky elektronynyň  $W_{n,\ell}$  energiýasynyň artmagy bilen artýandygyny, gadagan zonalaryň inleriniň bolsa kiçelýändigini belläliň. Izolirlenen atomlaryň elektronlarynyň ýeterli derejede ýokary energiýa derejeleri üçin olardan emele gelen energetiki zonalary biri-birlerini örtýärler. Gaty jisimleriniň zona nazarýetinde olaryň dürli görnüşleriniň elektrik häsiýetleriniň dürlidigi gadagan zonalarynyň ini we gadagan däl energetiki zonalarynyň doldurylyşynyň dürlidigi bilen düşündirilýär. Gadagan zonalary gadagan däl zonalary bölmekleri ýa-da, eger gadagan däl zonalary biri-birlerini örtýän bolsalar umuman ýok bolmaky mümkindir. 4.6<sup>1)</sup> suratda aşaky gadagan däl zona ýokarky gadagan däl zona bilen örtülendir. **Garyndy** zona emele gelýär.



4.6. surat

<sup>1)</sup> Bu we indiki çyzyklarda walent zonalary gyzyly reňk bilen, geçiriji zonalary – çal reňk bilen reňklenendir.

■ Izolirlenen atomda gadagan däl kwantlanan energetiki derejeler elektronlar bilen doldurylan ýa-da boş bolup bilerler. Degişlilikde gaty jisimde energetiki zonalar dürli doldurylyşa eýe bolmaglary mümkindir.

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

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

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

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

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

Eger geçiriji zona doly doldurylmadyk bolsa we elektronlar bilen eýelenmedik ýokarky boş derejeleri saklaýan bolsa, onda gaty jisim geçirijidir. Mysal üçin, metalliki natriýde geçiriji zona ýarysyna çenli doldurylandyr (4.7 – nji surat), muňa Na-ň izolirlenen atomyndaky onbirinji walent elektronyň ýarysyna çenli doldurylan ýokarky oýandyrylan energetiki derejesi degişlidir. Gaty jisim geçiriji bolýar. Eger zonalaryň kesişmesi bar we garyndy zonalar emele gelen bolsa, özem aşakky zona

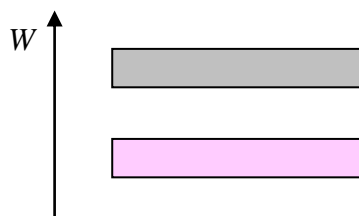
doldurylan, ýokarky bolsa boş, emma aşaky bilen kesişýär (4.7-nji surat).



4.7. surat

Aşgar – ýer metallary munuň ýaly geçirijileriň mysaly bolup bilýärler.

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



4.8. surat

Gaty dielektriklerde energetiki zonalar *kesişmeýärler*, özem walent zona geçiriji zonadan şertli  $2 eW$  – den köpräk energiýa aralygyna bölünip aýrylandyr. Kristalliki nahar duzy NaCl munuň ýaly jisimiň mysalydyr. NaCl -yň molekulasynda Na -niň atomynyň däskey (walent) elektrony Cl -yň däskey gabygyna geçýär. Netijede doly doldurylan elektron gabykly  $Na^+$  we  $Cl^-$  ionlar emele gelýärler. Şu sebäpli NaCl -yň kristalynda hloruň walent zonasy we ýokarda ýatýan natriýniň ionynyň geçiriji zonasy (4.8 – nji çyzgy),  $Na^+$  we  $Cl^-$  bu zonalaryň “aralygy”  $6 eW$  – a deň bolar ýaly ýerleşýärler. Diýmek däskey elektrik meýdany elektronlary  $Cl^-$  ionyň doly doldurylan

zonasyndan  $Na^+$  ionyň boş geçiriji zonasyna geçirip bilmeýär.

▪ Gaty dielektriklerde elektronlar kristal boýunça ýylylyk tizlikleri bilen süýşüp

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

### Ýarymgeçirijileriň hususy geçirijiligi

▪ Udel garşylygy  $10^{-6} - 10^{-8} \text{ Om}\cdot\text{m}$  bolan metallar we udel garşylygy  $10^{-8} \div 10^{-13}$

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



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

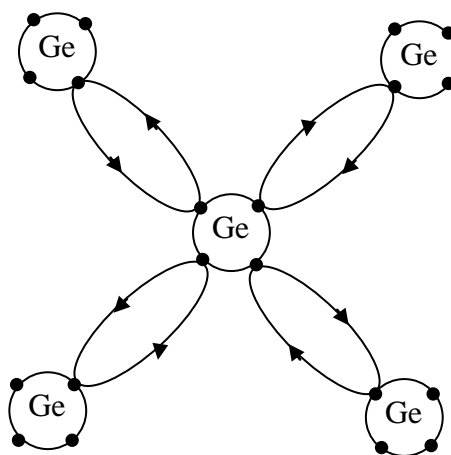
Germaniý – giňden ulanylýan ýarymgeçiriji elementleriň biridir. Ol elementleriň periodiki sistemasynyň IV toparynda we IV periodynda ýerleşendir. Onuň atomynyň 32 elektrony daşky gabykda dört walent elektron ýerleşer ýaly paýlanandyr. Germaniýniň kristalynda goňşy

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

4.9. surat

atomlaryň elektrony  $T=0\text{ K}$  -de arassa germaniýde “erkin” elektronlar ýok ýaly himiki ýada kowalent baglanşyklary (4.10 – njy surat) emele getirýär. Germaniý tebigatda seýrek we gymmat bahaly elementdir.

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



4.10. surat



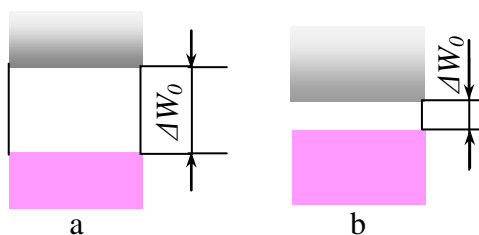
- *Ýarymgeçiriji garyndysyz diýip aýdylýar, eger ol himiki taýdan ideal arassa we ideal dogry kristalliki gözenegi bar bolsa. Onuň geçirijiligine ýarymgeçirijiniň hususy geçirijiligi diýilýär.*

Arassa ýarymgeçirijilerde hususy geçirijiligiň döremegi üçin elektronlary walent zonadan geçiriji zona “geçirmek” zerurdyr. Munuň üçin iň bolmanda gadagan zonanyň inine deň bolan energiýany sarp etmek gerekdir. Bu ululyk ýarymgeçirijileriň elektrik häsiýetiniň möhüm häsiýetnamasydyr we hususy geçirijiligi işjeňleşdiriş energiýasy diýilýär (kremniý üçin ol  $1.1\text{eV}$ ). Ýarymgeçiriji elementleriň işjeňleşdiriş energiýasy (elektronwoltlarda) 4.9-njy suratda tegeleklerdäki sanlaryň üsti bilen görkezilen.

- Ýarymgeçirijileriň garşylygynyň temperaturanyň artmagy bilen güýçli kiçelmegi käbir duýgur enjamlarda ulanylýar. Bu ýagdaýda olar özlärini metallara ters alyp barýarlar.

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

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



4.11. surat

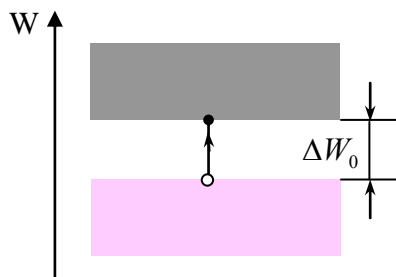
(4.11)-nji suratda dielektrigiň (a) we ýarym geçirijiniň (b) energetiki zonalarynyň ýerleşşi görkezilen. Temperaturanyň artmagy bilen ýylylyk oýandymasy netijesinde ýarymgeçirijiniň geçirijiliginiň döremeginde gatnaşýan, geçiriji zona geçýän elektronlaryň sany artýar. Şu sebäpli temperaturanyň artmagy bilen ýarymgeçirijiniň geçirijiligi artýar.

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

Ýagny, ýarym geçirijileriň “deşijekleriň” süýşmekleri bilen bagly elektrik geçirijiligine deşijekli geçirijilik diýip aýtmak kabul edilendir.

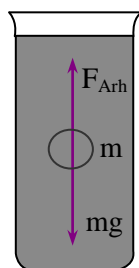
- Şunlukda elektronyň walent zonadan geçiriji zona geçmegi (onuň iň ýokarysyna golaýdan), (4.12 – nji surat) we walent zonada “položitel deşijegiň”

döremegi, ýarymgeçirijiniň elektrik geçirijiligiň döremegine mümkinçilik peýda bolýar. Daşky elektrik meýdany bar bolsa bu mümkinçilik amala aşýar. Kristalda zarýad äkidijilere (elektronlara) diňe daşky elektriki meýdany däl-de, eýsem



4.12. surat

kristalyň içki periodiki elektrik meýdany hem täsir edýär. Kristalyň meýdanynyň täsirini elektronyň effektiv massasy  $m^*$  düşüňjesini girizmek ýaly yoly bilen hasaba almak mümkindir. Bu massa elektrona kristalyň içki meýdanynyň täsiri hasaba alnan we  $m^*$  effektiv massaly elektron diňe daşky meýdanyň täsiri astynda hereket edýär diýip hasaplap bolmalydyr.



4.13. surat

■ Elektronyň  $m^*$  effektiv massasy düşüňjesini mehaniki meňzeşlikde düşündirmek mümkindir.  $\rho_0$  dykzlykly suwuklykly gapda  $P=mg$  agyrlýk güýjüniň täsiri astynda  $\rho$  dykzlykly şarjagaz hereket edýär diýeliň (4.13 – nji surat). Şarjagaza agyrlýk güýjünden başga içki güýjüň roluny ýerine ýetirýän arhimet güýji täsir edýär. Nýutonyň ikinji kanuny boýunça

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

Hereket diňe agyrlýk güýjüniň täsiri astynda bolup geçýär diýip hasap eder

ýäly  $m^* = \frac{m}{\rho_0 / \rho}$  effektiv massany girizmek mümkindir:

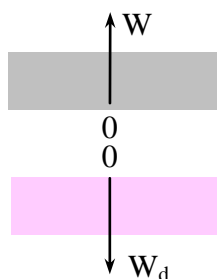
$$m^* a = P = mg$$

$$\text{bu ýerde } m^* = \frac{m}{1 - \rho_0 / \rho}$$

Görňüşi ýaly elektriw massa  $\rho_0$  we  $\rho$  dykzlyklaryň gatnaşygyna baglylykda položitel ýa-da otrisatel bolup bilýär. Elektronyň  $m^*$  effektiv massasyny girizmegiň oňalygy elektronyň energetiki ýagdaýy üýtgände ol hemişelikmi ýa-da hemişelik däl-digine baglydyr. Geçiriji zonanyň “düýbündäki” ( $m^* < 0$ ) elektronlar üçin  $m^* \approx$  hemişelik bolýandygy mälim boldy.

Ýarymgeçirijiniň walent zonasýnda elektrik meýdanynyň täsiri astynda hereket edýän ummasyz köp sanly elektronlaryň hereketini kwazibölejikleriň –

dessejikleriň kömegi bilen ýazyp beýan etmek amatlydyr. Walent zonadaky boşluk ýagdaýy san taýdan deň alamatlary boýunça gatnaşykly zarýadlary, effektiv massalary, spinleri we başga häsiýetnamalary  $q_e + q_d = 0$ ;  $m_e^* + m_d^* = 0$  ýagny  $q_\alpha = e > 0$ ,  $m_\alpha^* + m_e^* > 0$  bolan: iki bölejigiň toplumy – elektron we deşijek ýaly seretmek mümkindir.



4.14. surat

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

Mundan beýläk elektronlaryň energiýasy  $W_e$ -ni geçiriji zonanyň düybünden, deşijekleriň elengiýalary  $W_d$ -ni walent zonanyň iň ýokarysyndan (4.14-nji surat) hasap ederis.

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

- Ýarymgeçirijiniň hususy geçirijiliginde toruň dykzlygy elektronlaryň we deşijekleriň toklarynyň jeminden durýar:

$$J = J_e + J_d \quad (4.1')$$

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

$$J_e = e n_{oe} \langle V_e \rangle, \quad J_d = e n_{od} \langle V_d \rangle.$$

Eger elektronlaryň we deşijekleriň süýşijilikleri  $U_e$  we  $U_d$  –ni geçirsek  $\langle U_e \rangle = U_e E$ ,  $\langle U_d \rangle = U_d E$ ,

Onda

$$J = e n_0 (U_e + U_d) E. \quad (4.2)$$

Bir hususy geçirijilik üçin Omuň kanunynyň differensial görnüşini aldyk.

Udel elektrik geçirijiligi

$$\gamma = e n_0 (u_e + u_d). \quad (4.3)$$

Ýarymgeçirijiniň hususy geçirijiliginde zarýad äkidijileriň sany  $n_o$ -y tapalyň. Otag temperaturasynda  $n_o$  uly däl, sebäbi hususy geçirijiligi işjeňleşdiriş energiýasy  $\Delta W_0 \gg kT$ . Şu sebäpli geçiriji zonadaky elektronlar we walent

zonadaky deşikler birmeňzeş energiýaly haldaky gazlar däl we olar üçin (4.21) formula boýunça birmeňzeş energiýaly halatyn ululygy kiçidir:

$e^{\frac{\mu_e}{kt}} \ll 1$  we  $e^{\frac{\mu_d}{kt}} \ll 1$ . Bu ýerde  $\mu_e$  we  $\mu_d$ -elektronlaryň we deşikleriň himiki potentsiallary. Elektronlar we deşikler üçin formula boýunça Fermi – Diragyň paýlanma funksiýasy:

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

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

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

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

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

Şu sebäpli

$$dn_0 = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^2 \sqrt{W_e} \exp\left(-\frac{W_e \mu_e}{kT}\right) dW_e \quad (4.5) \text{ Walent zonadaky}$$

deşikler üçin aňlatma hem ýokarka meňzeşlikde alynýar:

$$n_{od} = \frac{2}{h^3} (2\pi m_d^* kT)^2 e^{\frac{\mu_d}{kT}} \quad (4.6)$$

Zarýad äkidijileriň sanyny hususy geçirijiligi işjeňleşdiriş energiýasy  $\Delta W_0$  arkaly aňlatmak üçin onuň bilen elektronlaryň we deşikleriň himiki potentsiallaryny baglanyşdyrmak gerekdir.

■ Walent zonada

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

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

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

Diýmek,  $W_d + \mu_d = -(W_e - \mu_e)$ . Galyberse-de walent zonada  $W_d = -W_e - \Delta W_0$ , ýagny  $W_d + W_e = \Delta W_0$  we  $\mu_d = -(\mu_e + \Delta W_0)$ . (6) formulany aşadaky ýaly ýazmak mümkindir:

$$n_{od} = \left(\frac{2}{h^3}\right) (2\pi m_d^* kT)^2 e^{\frac{-\Delta W_0}{kT}} e^{\frac{-\mu_e}{kT}} \quad (4.6')$$

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

$$n_0 = \sqrt{n_{oe} n_{od}} = \left(\frac{2}{h^3}\right) (2\pi kT \sqrt{m_e^* m_d^*})^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-W_o}{2kT}} \quad (4.7)$$

■ Hususy ýarymgeçirijide elektronlaryň  $\mu_e$  himiki potensiallaryny kesgitleýän we,

diýmek Ferminiň derejesiniň ýagdaýyny. Aşakdaky deňlemenden  $(m_e^*)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\mu_e}{kT}} = (m_d^*)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-\Delta W_o}{kT}} e^{\frac{-\mu_e}{kT}}$  almak mümkindir.

$$\mu_e = -\frac{\Delta W_o}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_d^*}{m_e^*} \quad (4.8)$$

(8) formuladan  $T=OK$  -de

$$\mu_e(o) = -\frac{\Delta W_o}{2} \quad (4.8')$$

bolmalydygy gelip çykýar. Ferminiň derjesi gadagan zonanyň ortasynda ýerleşendir.

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

$$\mu_e(T) = \mu_e(o) = -\Delta W_o / 2 = \text{hemişelik.} \quad (4.8'')$$

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

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

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

$$n_0 \sim (m_e^* m_d^*)^{\frac{3}{4}} T^{\frac{3}{2}} e^{-\Delta W_o / 2kT} \quad (4.9)$$

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

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

bolýandygyny görkezmek mümkindir.

Eger ýarymgeçiriji ideal arassa däl we onda gözenegiň bozulan ýerleri we garyndylar bar bolsa, onda pes temperaturalarda ionlaşan garyndylarda dargama esasy rol oýnaýar. Ýöne adaty we ýokary temperaturalarda äkidijileriň süýşüjiligi olaryň fononlarda dargamasyna baglydyr. (9) formuladan hususy ýarymgeçirijiniň udel elektrik geçirijiliginiň temperatura exponensial kanun boýunça baglydygy

gelip çykýar

$$\gamma = \text{hemiselik} (m_e^* m_d^*)^{\frac{3}{2}} \left[ (m_e^*)^{-\frac{3}{2}} + (m_d^*)^{-\frac{3}{2}} \right] \ell^{\frac{-\Delta W_o}{2kT}} \quad (4.10)$$

Udel elektrik geçirijiligine elektronlaryň we deşijekleriň goşantlary dürlidir we bu olaryň effektiv massasynyň dürliligi bilen baglydyr. (4.1)-nji tablisada  $T=300 K$  – de möhüm hususy ýarymgeçirijiler üçin elektronlaryň we deşijekleriň süýşüjilikleri görkezilen.

Tablisa 4.1

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

### Ýarymgeçirijileriň garyndyly geçirijiligi

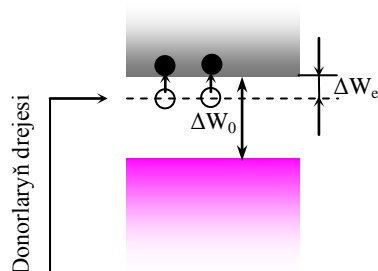
- Ýarymgeçirijä garandy girizilse onuň elektrik häsiýetine güýçli täsir edýär.

Başga elementleriň atomlary ýa-da ionlary we kristallik gözenegiň bozulan ýerleri: boş düwünler, kristal deformirlenende döreýän süşmeler, ýaryklar, garyndylardyr. Bu hemme garyndylar we gözenegiň bozulan ýerleri krisstalyň periodiki meýdanyna goşmaça üýtgame girizýär we elektronlaryň öžlerini alyp baryşlaryna we olaryň energetiki ýagdaýlaryna täsir edýär.

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

■ Garyndylar iki hili rol oýnaýar. Bir tarapdan olar kristaly goşmaça elektronlar bilen üpjün ediji, başga tarapdan kristalda bar elektronlaryň ýygnaýan merkezleri bolup hyzmat edýarler. Germaniýniň gözeneginde onuň atomlarynyň biri baş walent elektronly garyndy atom (fosfor, myşşak, surma) bilen çalşyrylanda näme bolup geçýändigine seredeliň. Garyndy atomyň dört walent elektrony germaniýniň goňşy atomlary bilen himiki baglanyşygy emele getirýär, başinji elektron walent baglanyşygy emele getirip bilmeýär. Bu “artyk” elektron ýadro bilen gowşagrak baglanyşandyr we beýleki elektronlar bilen deňeşdirilende ony ýarymgeçirijiniň geçiriji zonasyna geçirmek ýeňildir.

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



4.15. surat

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

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

Munuň ýaly ýarymgeçirijilere elektron (ýa-da  $n$  – görnüşli ýarymgeçiriji) ýarymgeçirijiler diýilýär.

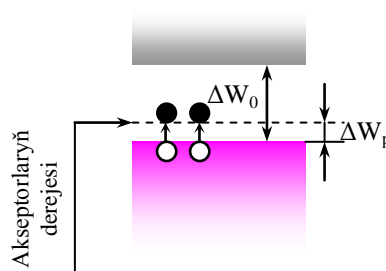
(4.16) suratda  $n$  -görnüşli ýarymgeçirijiniň energetiki derejeleriniň gurluşy görkezilen. (4.2) tablisada gadagan zonanyň  $\Delta W_0$  ininiň we käbir ýarymgeçirijiniň  $n$  – görnüşli geçirijiligiň işjeňleşme energiýasynyň bahalary görkezilen.

Tablisa 4.2

Ýarym geçiriji	Energiýa, $eW$			
	$\Delta W_0$	$\Delta W_e$		
		P	As	Sb
Si	0.10	0.045	0.050	0.039
Ge	0.72	0.012	0.013	0.010

■ Goý germaniýniň gözenegine üç walent elektronly garyndy atom (bor, alýuminiý, indiý) girizilen bolsun. Munuň ýaly atom germaniýniň gözeneginde zerur bolan doly baglanyşygy emele getirip bilmeýär (4.10 – nýj surata seret), sebäbi munuň üçin onda bir elektron ýetmeýär. Ýöne ol hemme baglanyşygyny germaniýniň goňşy atomyndan elektron alyp dolduryp bilýär. Boş baglanyşygyň yzygiderli doldurylmak hadysasy ýarymgeçirijide “deşijegiň” hereketi bilen deň derejelidir.

Üçwalentli garyndylar gadagan edilen zonada elektronlar bilen eýelenmedik garyndy energetiki derejeleriň emele gelmegine getirýär. Olara akseptor derejeler diýilýär. Bu ýagdaýda garyndy atomlara akseptor – atomlar diýilýär. Akseptor derejeler esasy kristalyň walent zonasynyň ýokarky araçäğinden birazrak ýokarrakda ýerleşýär. Mysal üçin, kremniýniň kristalynda, üçwalentli, bor girizilende, akseptor derejeler doldurylan zonalar  $\Delta W_F = 0.08 eW$  ululyga ýokarda ýerleşýär. Bu energiýa gadagan zonanyň umumy ininden köp esse kiçidir. Munuň ýaly ýarymgeçirijilerde deşijekli garyndyly geçirijiligiň ýüze çykmagy walent zonanyň ýokarky araçäginde ýerleşen elektronlaryň aňsat akseptor derejelere geçirip bolýanlygy bilen baglydyr.



4.16. surat



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

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

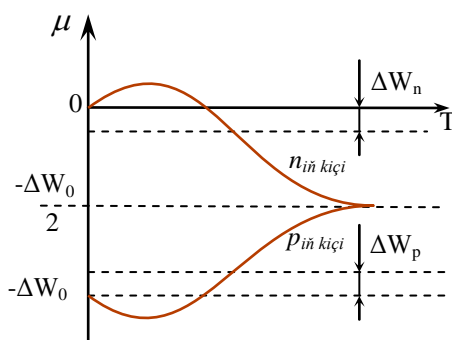
(4.3) tablisada käbir p-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin deşikli geçirijiligi işjeňleşdiriş  $\Delta W_p$  energiýasynyň bahalary görkezilen.

Tablisa4. 3

Ýarymgeçiriji	Energiýa, eW			
	$\Delta W_0$	$\Delta W_e$		
		B	Al	In
Si	0.10	0.045	0.060	0.070
Ge	0.72	0.010	0.010	0.011

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

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



4.17. surat

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

■  $T = OK$  – de Ferminiň derejesi garyndyly ýarymgeçirijilerde garyndyly geçirijiligiň görnüşine baglydyr.

n – görnüşli ýarymgeçirijilerde  $\mu(0) = -\Delta W_n / 2$ . Zarýadlary esasy äkidijiler geçiriji zonadaky elektronlardyr (geçiriji elektronlar). Walent zonadaky deşikler esasy däl äkidijilerdir.

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



Toguň esasy äkidijileri <sup>1)</sup> walent zonadaky deşijeklerdir, esasy dälleri – geçiriji zonadaky elektronlardyr.

Temperaturanyň Ferminiň derejesiniň ýagdaýyna täsiri çylşyrymly häsiýete eýedir,  $n$  – we  $p$  – görnüşli garyndyly ýarymgeçirijiler üçin dürlidir (4.17 – nji surat).

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

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

■ Togy äkidijileriň sany  $n_0$  hususy  $n_0^{hus}$  we garyndyly  $n_0^{gar}$  geçirijilikler-däki äkidijileriň sanyndan durýar:

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

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

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

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

Bu formulanyň birinjisinde  $\Delta W^{gar}$  ululyga ýa  $\Delta W_e$ , ya-da  $\Delta W_p$  diýip düşünmeli.

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

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

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

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

Udel elektrik geçirijiligi

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

*Ýarymgeçirijileriň fotogeçirijiligi.*

*(Ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň täsiriastynda döreyän geçirijilik)*

■ Ýarymgeçirijiniň elektromagnit şöhlelenmesi tarapyndan oýandyrylan elektrik

geçirijiligine fotogeçirijilik diýilýär.

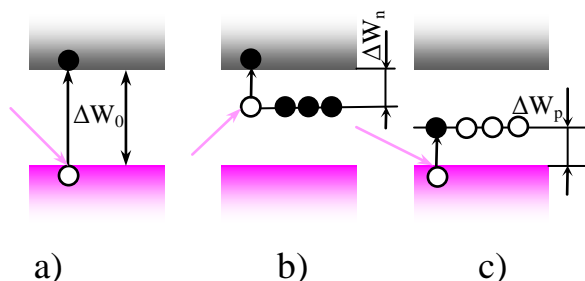
Fotogeçirijiligiň döremegine içki fotoeffekt sebäp bolýar. Ýarymgeçirijide (ýa-da dielektrikde) ýagtylygyň täsiri astynda goşmaça deňagramlyksyz tok äkidijiler döreyär. Ýarymgeçirijiniň jemleýji udel elektrik geçirijiligi

<sup>1)</sup> “Tok äkidiji” adalgasy köplenç “zarýad äkidijileri” manysynda ulanylýar.

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_f \quad (4.11)$$

Bu ýerde  $\gamma_0$  ýagtylyk düşmedik halatdaky udel elektrik geçirijilik;  $\gamma_f$  - udel elektrik fotogeçirijiligi.

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



4.18. surat

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

$$\gamma = en_c [u_n \langle \tau_n \rangle + u_p \langle \tau_p \rangle] \quad (4.12)$$

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

18. b), c) suratlarda donor (b) we akseptor (c) garyndyly ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň täsiri astynda tok äkidijileriň nädip döredilýändigleri görkezilen.

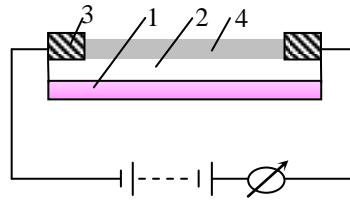
Bu ýagdaýlarda garyndy geçirijiligiň energiýasyndan az bolmadyk  $h\nu$  energiýaly foton ýa elektrony donor derejeden geçiriji zona geçirýar, ýa-da elektrony walent zonadan boş akseptor garyndy zona geçirýar.

■ Fotonyň energiýasy üçin  $h\nu \geq \Delta W$  talap  $h\nu = \Delta W$  şerden kesgitlenilýän içki fotoeffektiň gyzyň araçaginiň bardygyny aňladýar, bu ýerde  $\Delta W$  - degişli geçirijileriň işjeňleşdiriş energiýasy. Ýygylýkdan tolkun uzynlygyna geçip alarys.

$$\lambda_{giz} = hc / \Delta W \quad (4.13)$$

$\Delta W = 2eW$  bolanda hususy fotogeçirijilik üçin  $\lambda_{giz} = 600\text{nm}$ . Bu sary ýagtylyga degişlidir. Görünýän we ultramelewşe ýagtylyklar diňe ýarymgeçirijilikde däl-de eýsem,  $\Delta W > 2eW$  bolan dielektriklerde-de fotogeçirijiligi döretmegi mümkindir.

Garyndyly ýarymgeçirijilerde geçirijiligi işjeňleşdiriş energiýasy  $\Delta W \sim 0.01 \cdot eW$  we  $\lambda_{giz} \sim 10^{-5} \cdot 10^{-4}\text{m}$ , bu spektriň infragyzyly aralygyna degişlidir.



4.19. surat

- Yarymgeçirijileriň fotogeçirijileriniň ýagtylandyrmakda baglylygy fotorezistorlarda (fotogarşylyklarda) ulanylýar.

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

#### Soraglar

1. Gaty jisimleriň kristallarynda energetiki zonalar nähili emele gelýärler?
2. Zona nazaryetinde metallaryň ýarymgeçirijileriň we dielektriklerin arasyndaky tapawut nähili öwrenilýär?
3. Ýarymgeçirijileriň we metallaryň elektrik geçirijiliginiň temperatura baglylygy biri birinden näme bilen tapawutlanýar?
4. Dielektrik haýsy şertlerde zona nazaryetiniň nukdaý nazaryndan elektrik toguny geçirijä öwürýär?
5. Ýarymgeçirijileriň size belli görnüşlerini sanaň we häsiýetnama beriň?

## 5-nji sapak

### Tema: Ýarym gecirijilerde elektronlaryň we deşikleriň statistikasy.

**Fermi-Diragyň statistikasy boýunça paýlanyş funksiýa.  
Ýarymgeçirijide elektronlaryň we deşikleriň konsentrasıýasy.  
Hususy ýarymgeçirijilerde erkin zarýadlaryň konsentrasıýasy.**

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.

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

$$N(E)dE=f(E)g(E)dE \quad (5.1)$$

$f(E)$  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  $f(E)$  tapmaklyga gelýär.

Paýlanma funksiýasy, meselem elektronlar üçin, şeýle görnüşde ýazylýar.

$$F(E) = (e^{(E-\mu)/kT} + 1)^{-1} \quad (5.2)$$

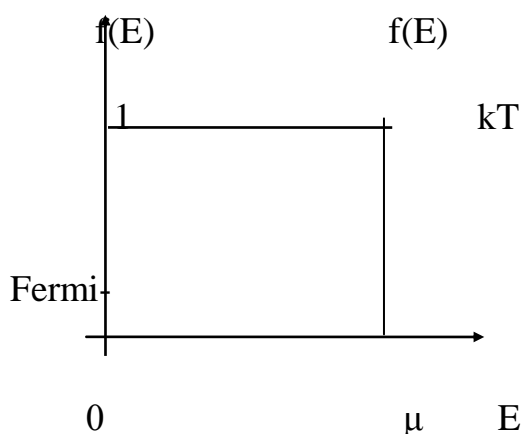
bu ýerde  $T$ -absolýut temperatura,  $\mu$ -ulgamyň himiki potensıýaly, köplenç halatda Ferminiň energiýasy ýa-da derejesi diýilýär.

(5.2) funksiýa Fermi-Diragyň funksiýasy diýilýär. Ilki bilen bu funksiýanyň  $T \rightarrow 0$  K ýagdaýyna seredeliň. Bu ýagdaýda  $\mu$ -den kiçi bolan  $E$  energiýadaky derejeleriň islendigi üçin  $f(E)=1$ . Şol bir wagtda islendik  $E > \mu$  dereje üçin  $f(E)=0$  (5.1-nji surat).

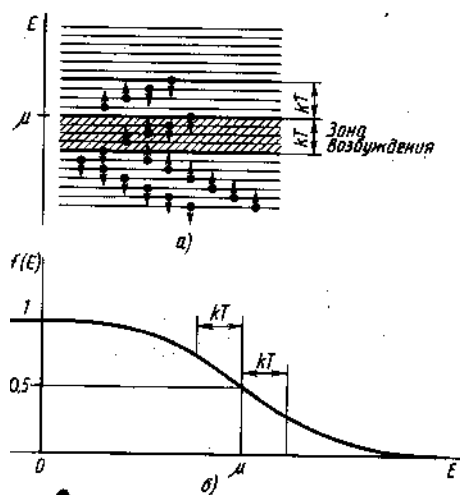
Şeýlelikde,  $T=0$  K temperaturada  $E < \mu$  bolan energetik derejeleriň hemmesi elektronlar bilen eýelenendir, emma  $E > \mu$  energetik derejeler boşdyr. Başga söz bilen aýdanyňda,  $T \rightarrow 0$  K iň pesdäki energetik derejeleri eýelemäge ymtylýarlar. Temperaturanyň artmagy bilen elektronlar termiki 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 oýandyrmasy

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

Ýylylyk oýandyrmasy esasynda elektronlaryň öň Fermiň derejesinden aşakda ýerleşen bir bölegi ýokary geçýär, şeýlelikde elektronlaryň energetik derejeler boýunça täze paýlanyşy emele gelýär (5.2-nji surat). Suratdan görnüşi ýaly, temperaturanyň artmagy bilen, energetik derejeler boýunça elektronlaryň paýlanyşy energiýa boýunça  $\mu$  ululykdan  $kT$  çuňlukda ýaýraýar.



5.1-nji surat.  $T=0K$  temperaturada Diragyň funksiýasy.



5.2-surat.  $T>0K$  bolanda elektronlaryň Fermiň derejisinden  $\mu$  ýokary oýandyrylyşy (a) we  $T>0K$  bolanda Fermi-Diragyň paýlanyş funksiýasy (b).

### Ýarymgeçirijilerde elektronlaryň we deşikleriň konsentrasiýasy.

Geçiş zonasynyň hemme energiýalary boýunça paýlanyşyň doly funksiýasyny (5.1) integrirläp, geçiş zonasyndaky elektronlaryň konsentrasiýasyny tapýarys:

$$n = \int_{(g.z.b)} n(E) dE = \int_0^{E_{zona dep}} g(E) f(E) dE \quad (5.3)$$

Bu ýerde  $n(E) \cdot V=1$  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.

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \frac{((2m_n)^{3/2})}{h^3} \int_0^\infty \frac{\sqrt{E} dE}{e^{(E-\mu)/(kT)} + 1} \quad (5.4)$$

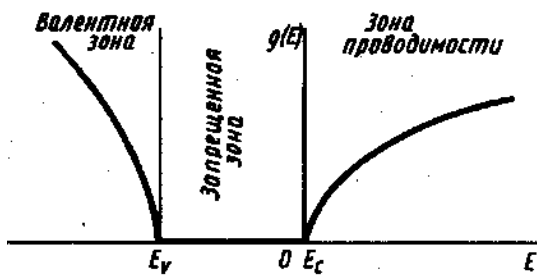
$$E(k) = -E_g - \frac{h^2 k^2}{2m_p}$$

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

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

$E_v = -E_g$  - walent zonanyň depesinde energiýa.

Geçiş zonasynyň düýbinde we walent zonasynyň depesinde derejeleriň dykzylygynyň funksiýasy 5.3 suratda görkezilen.



5.3. Surat. Geçiş zonanyň düýbünde we walent zonanyň depesinde derejeleriň dykzylygynyň funksiýasy.

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

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/(kT)} + 1} \approx e^{\mu/kT} \cdot e^{-E/kT} \quad (5.5)$$

Bu ýagdaýda geçiş zonanyň derejeleriniň elektronlar bilen doly bolmak mümkinçiligi kiçidir

$$f(E) \ll 1 \quad (5.6)$$

(5.6) şerte geçiş zonanyň elektronlar bilen doly bolmazlyk şerti (uslowiým newyroždennosti) diýilýär.

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

$$n(E) dE \approx \frac{(2m_n)^{3/2}}{2\pi^2 h^3} \sqrt{E} \cdot e^{\mu/(kT)} \cdot e^{-E/kT} \cdot dE \quad (5.7)$$

Bu deňlige Bolsmanyň paýlanyşy diýilip at berilýär. Elektron gazynyň umumy sany  $e^{\mu/kT}$  köpeldijä proporsionaldyr, emma olaryň energiýa boýunça paýlanyşy  $\sqrt{E} \cdot e^{-E/(kT)}$  köpelişler boýunça kesgitlenýär. Energiýa boýunça (5.7) deňlikden alnan integral Fermiň energiýasyna  $\mu$  baglylykda elektronlaryň umumy sanyny berýär.

$$n = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{\mu/(kT)} = N_c \cdot e^{\mu/(kT)} \quad (5.8)$$

$N_c$ -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 dolydyr. Şol bir temperaturada elektronyň 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.

$$f_p(E) = 1 - f(E) = \frac{1}{1 + e^{(\mu-E)/(kT)}} \quad (5.9)$$

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

$$f_p(E) \approx e^{-(\mu-E)/(kT)} \quad (5.10)$$

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

$$P = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-(\mu-E_v)/(kT)} = N_v e^{\frac{(\mu+E_g)}{(kT)}} \quad (5.11)$$

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

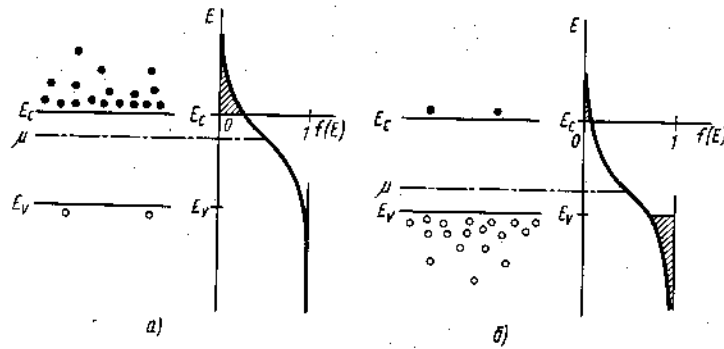
#### Hususy ýarymgeçirijide erkin zarýadlaryň konsentrasiýasy.

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

$$n_i = p_i \quad (5.12)$$

Bu ýerde  $i$  indeks, hususy ýarymgeçirijä degişlilik aňladýar.

(5.12) -nji şert, Fermiň derejesiniň gadagan zonanyň takmyndan ortasynda ýerleşýändigini aňladýar. Eger Fermiň derejesi geçiş zona ýäkyn ýerleşse, onda şeýle ýarymgeçirijide elektronlar deşiklere seredende has köp, sebäbi geçiş zonanyň düýbünde energetik derejeleriň elektronlar bilen doldurylyşy ( $f(E)$ ) walent zonanyň depesindäki derejeleriň elektronlar bilen eýeli daldiginden ( $1-f(E)$ ) gaty köpdür (5.4-nji surat).



5.4. Surat. n-tipli ýarymgeçirijilerde ( $n \gg p$ ) (a) we p-tipli 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 dürlidir.

Hususy ýarymgeçirijilerde Ferminiň derejesiniň takyk bahasyny  $n(\mu)$  bilen  $p(\mu)$  bahalaryny deňleşdirip alýarys (5.8) we (5.11).

$$N_c e^{\mu_i / (kT)} = N_v e^{-(\mu_i + E_g) / (kT)} \quad (5.13)$$

Eger (5.13) deňlikden Ferminiň derejesiniň bahasyny tapsak, onda şeýle aňlatmany alarys.

$$\mu_\phi = -\frac{E_g}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (5.14)$$

Haçanda  $T \rightarrow 0$  K Ferminiň derejesi gadagan zonanyň ortasynda ýerleşendir.  $\mu_i$ -niň alynan bahasyny (5.8) deňlige goýup, hususy ýarymgeçirijilerde erkin zarýadlaryň konsentrasiýasyny hasaplap bileris.

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot e^{-E_g / (2kT)} = \frac{2(2\pi \sqrt{m_n m_p} \cdot kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-E_g / (2kT)} \quad (5.15)$$

Bu ýerde  $m_n$  we  $m_p$ -elektronyň we deşiğiň effektiw massasy. (5.15) 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 (seroýe olowo) çenli kiçelmegi otag temperaturasynda  $n_i$ -niň 9 dereje artmagyna getirýär.



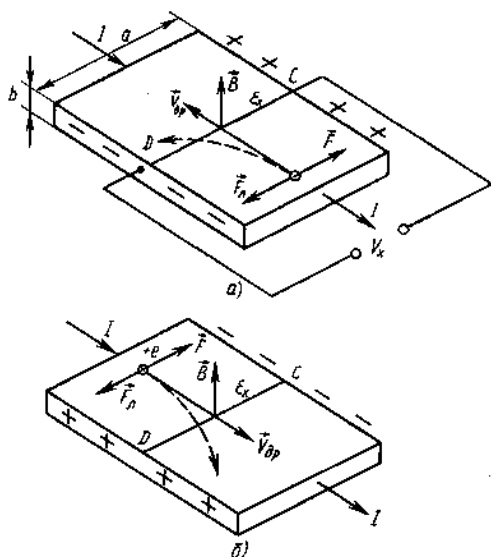
## 6-njy sapak

### Tema: Galwanomagnet effektləri. Hollyň effekti. Ettingsgauzeniň effekti. Termomagnet effektləri.

#### Hollyň effekti.

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

Goý göniburçly plastinkadan,  $J$  elektrik togy aksyn (6.1-nji surat). Magnit meýdany täsir etmedik ýagdaýynda, toguň ugruna perpendikulýar gapdal üstlerde  $C$  we  $D$  nokatlaryň arasyndaky potensiallaryň tapawudy nola deňdir. Haçanda tok geýän obrazes (plastinka) magnit meýdanyna ýerleşdirilse we magnit meýdanynyň induksiýasy  $B$  toguň ugruna perpendikulýar bolsa, onda  $C$  we  $D$  nokatlaryň arasynda  $U_H$  potensiallaryň tapawudy ýüze çykyp, oňa Hollyň e.h.g. diýilip at berilýär.



6.1. Surat. n-tipli (a) we p-tipli (b) ýarymgeçirijilerde Hollyň effektini düşündirýään çyzgy.

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

$$U_H = R_H \cdot B \cdot I / b = R_H \cdot B \cdot i \cdot a \quad (6.1)$$

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

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

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

$$F_L = -e [V_{dr} \cdot B] \quad (6.2)$$

bu ýerde  $e$  - elektronyň zaryady. Bu güýjün täsiriniň ugry burawyň düzgüni bilen kesgitlenilýär. Haçanda  $V_{dr}$  bilen  $B$ -niň arasyndaky burç  $90^\circ$  bolsa onda Lorensiň güýjiniň moduly,

$$F_L = \pm e V_{dr} B \quad (6.3)$$

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

Öz gezeginde  $E_H$  elektrona  $F = -e E_H$  güýç bilen Lorensiň güýjüne garşylykly ugra täsir eder. Eger  $F=F_L$  bolsa onda zaryadlaryň garşylykly üstlere toplanmagy tamamlanýar. Deňagramlyk şerti esasynda

$$e V_{dr} B = -e E_H \quad (6.4)$$

bu ýerden

$$E_H = -V_{dr} B \quad (6.5)$$

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

$$u_x = E_H a = + V_{dr} B a = (1/ (en)) i Ba \quad (6.7)$$

Şeýlelikde teoretiki usul bilen tapylan  $u_H$  tejribe (eksperiment) tarapyndan alynan formula getirýär.

Bu ýerde Hollyň hemişeligi

$$\begin{aligned} R_H &= -1/(en) \\ R_H &= 1/(ep) \end{aligned} \quad (6.8)$$

Haçanda biz  $E_H$  -yň bahasyny tapanymyzda (6.5) 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.

Hakykatyna seredende esasan hem ýarymgeçiriji materiallary üçin, zaryad geçirijileriň dreýf tizliginiň, onuň ýerleşen zonasyna baglylygyny we başga birnäçe fiziki parametrleri göz önünde tutup, takyk hasaplamalar geçirilse, onda Hollyň hemişeligini şeýle görnüşde ýazmak bolýar.

$$R_H = A / (en) \quad (6.9)$$

bu ýerde  $A$  - hemişelik, elektronyň öz hereket energiýasyny ýitirşine baglylykda, ýagny ýylylyk yrgylddysy 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, Hollyň e.h.g. ugry boýunça ýarymgeçirijiniň görnüşini kesgitlep bolýar. Onda Hollyň hemişeligi

$$R_H = A / (ep) , \quad (6.10)$$

p-görnüşli ýarymgeçirijiler üçin we

$$R_H = - A / (en), \quad (6.11)$$

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

$$R_H = A (u_p^2 p - u_n^2 n) / e (p u_p - n u_n)^2 \quad (6.12)$$

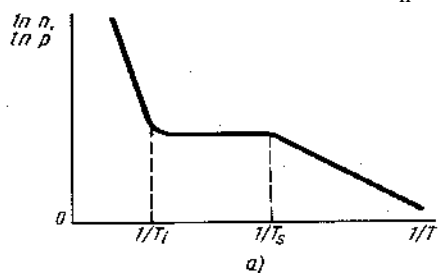
Hollyň effekti ýarymgeçirijilerde zarýad geçirijileriniň häsiýetnamalaryny öwrenmek üçin gaty uly eksperimental mümkinçilikdir. Hollyň hemişeligini  $R_H$  kesgitlep, zarýad geçirijileriniň konsentrasiýasyny,  $R_H$  alamaty boýunça olaryň tipini kesgitlemek mümkin.

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

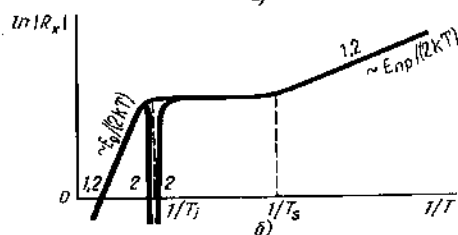
$$\begin{aligned} R_H \sigma &= A e u_n / en ; \\ R_H \sigma &= A u_n \end{aligned} \quad (6.14)$$

Bu gatnaşykdan eger-de A belli bolsa, elektronlaryň hereket edijiligini almak bolýar.

$$u_n = R_H \sigma / A$$



Soňky ýyllarda Hollyň effekte esasanan datçikler, gaty köp ýerlerde tehnikada, radioelektronikada, ölçeg gurallarynda giňden ulanylýar. (6.2 surat).

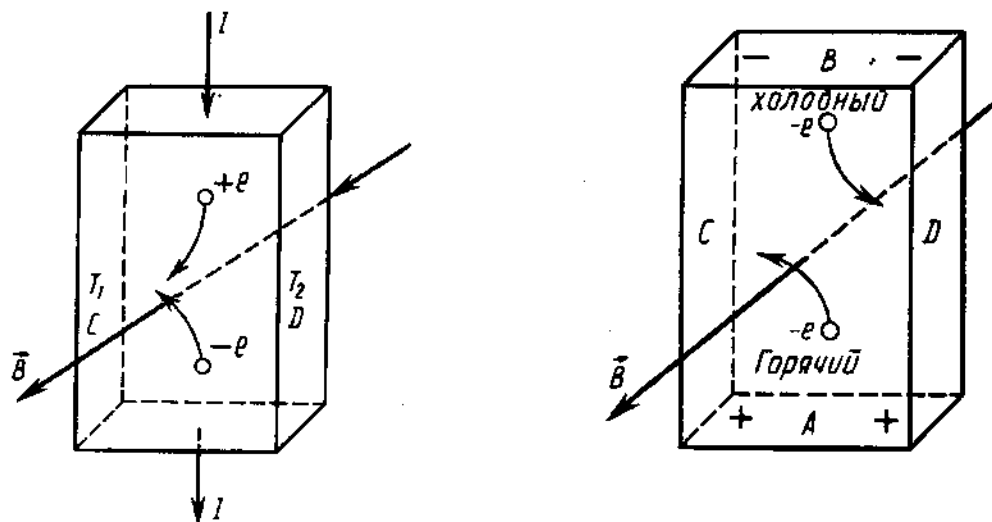


6.2. Surat. n-tipli (1 egri) we p-tipli (2 egri) ýarymgeçirijilerde zarýad geçirijileriň konsentrasiýasynyň (a) we Hollyň hemişeliginiň temperatura baglylygy.

#### Ettingsgauzeniň effekti.

Ettingsgauzeniň effekti Hollyň effekti bilen bilelikde ýüze çykýan effekt bolup, haçanda magnit meýdanyna ýerleşdirilen obrazeden tok goýberilende,

magnit meýdanynyň we toguň ugruna perpendikulýar ugurda, temperaturanyň gradiýenti ýüze çykýar. (6.3-nji surat) Bu effekt hususy ýarymgeçirijilerde özüniň ýokary bahasyna eýedir.



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

Öňki seredip geçişimiz ýaly, şeýle ýarymgeçirijilerde elektronlar we deşikler magnit meýdany tarapyndan şol bir ugra gyşardylýar. Şol sebäpli hem kristalyň bir gapdal üstünde elektronlaryň we deşikleriň sany deňagramlyk ýagdaýyndan artykmaç bolup rekombinasiýa prosesi ýylylyk generirleme prosesinden ýokarydyr, emma gapma-garşylykly üstde generirleme prosesi ýokarydyr. Şol sebäpli hem obrazesiň (ýarymgeçiriji plastinkanyň) bir gapdal üstünde ýylylyk elektronlary we deşikleri döretmäge harç bolýar, başga bir üstde bolsa olaryň rekombinasiýa prosesi esasynda bölünip çykýar. Şeýlelikde obrazesiň 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) granlarynyň arasynda temperaturanyň gradiýenti ýüze çyksyn ( $T_B < T_A$ ). (6.4 surat).

6.4. Surat. Rigi-Ledýuginň effektiniň ýüze çykyşynyň çyzgyda görkezilişi.

Onda A grandan B grana tarap elektronlaryň ugrukdyrylan hereketi ýüze çykar. Orazesiň 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, obrazesiň iki gutarýan ýeriniň arasynda potentsiallaryň tapawudynyň ýüze çykmagyna getirýär - bu ýüze çykýan e.h.g - e termo e.h.g. diýilip at berilýär.

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

Şeýlelikde dikleýin temperaturanyň gradiýentine bagly bolan kese temperatura 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.

## 7-nji sapak

### Tema: Galtaşma (kontakt) hadysalary

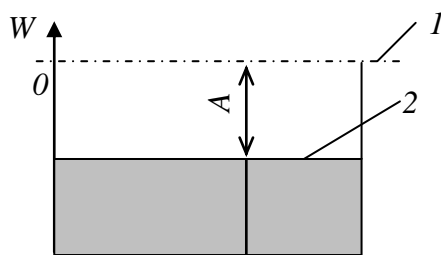
1. *Iki metalyň galtaşmasy*
2. *Metal bilen ýarymgeçirijiniň galtaşmasy*
3. *Elektronly we deşijekli ýarymgeçirijileriň galtaşmasy (p-n-geçiş)*
4. *Daşky potentsiallaryň tapawudynyň p-n-geçişe täsiri.*

#### *Iki metalyň galtaşmasy*

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

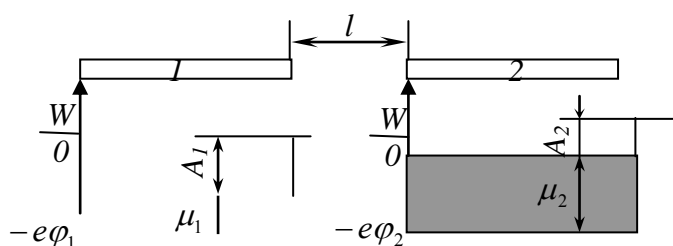
Olar kesgitli atoma “baglanylmadyk” elektronlary bar bolan metallarda we ýarymgeçirijilerde uly amaly gyzyklanma döredýär. Galtaşma (kontakt) hadysalary üçin elektronlaryň energiýasy möhüm rol oýnaýar. Elektronynyň energiýasynyň nol bahasyna derek zarýadsyzlanmadyk metal jisimden *daşdaky* erkin hereketsiz elektronynyň energiýasyny kabul etmek amatlydyr. Onda metalyň içindäki geçiriji elektronlar  $e\varphi$  çuňlugy bolan potensial gutuda bolýarlar, bu ýerde  $\varphi > 0$  - metalyň potentsialy. Zarýadsyz metaldan daşda potensial  $\varphi' = 0$ . Elektronynyň metaldan çykyş işi A Ferminiň derejesinden hasaplanylýar. 7.1 çyzgyda bu hemme energiýalar bellendirlir (1 – erkin hereketsiz elektronynyň energiýasynyň derejesi; 2 – elektrohimi potentsialyň derejesi).  $\mu - e\varphi$  ululyga elektrohimi potentsial diýilýär.

■ Elektrohimi potentsiallary we  $A_1$  we  $A_2$  çykyş işleri bilen tapawutlanýan, dürli hilli iki metala seredeliň. Goý  $A_1 < A_2$  (7.2-nji yzgy). Birinjä garanda ikinji metalda



7.1. surat

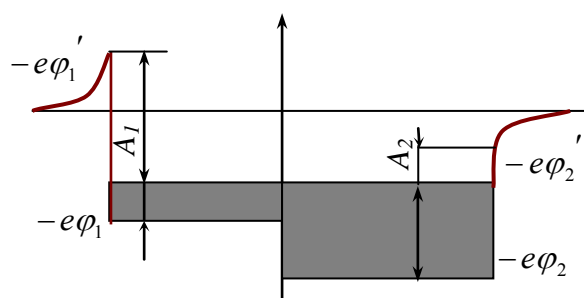
elektronlar tarapyndan ýokarrakky energetiki derejeler doldurylandyr. Ilki başga metallar kristalliki gözenegiň periodyndan birnäçe esse köp aralyga biri-birinden uzaklaşdyrylan. Eger metallar biri-birine degirilse, onda geçiriji elektronlar bölekleyin ikinji metaldan birinji metala geçýýärler. Bu ýagdaýda olaryň elektrohimiiki potensiallary deňleşýärler: metal 1 otrisatel zaryadlanýar, metal iki bolsa položitel (7.3 çyzgy).



7.2. surat

Şol bir wagtyň özünde galtaşýan (biri-birine degip duran) metallarda elektronlaryň energetiki derejeleriniň özara süýşmeleri bolup geçýär. Otrisatel zaryadlanan metalda hemme derejeler ýokary süýşýärler, položitel zaryadlanan metalda bolsa – aşak (7.3 çyzgy). Deňagramlylyk ýagdaýda elektro – himiki potensiallar deňleşýärler:

$$-e\varphi_1 + \mu_1 = -e\varphi_2 + \mu_2 \quad (7.1)$$



7.3. surat

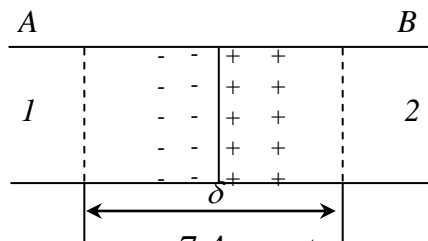
Biri-birine degip duran metallardaky Fermiň derejesiniň dürlilige **potensiallaryň içki galtaşma tapawudynyň** döremegine getirýär:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (\mu_1 - \mu_2) / 2. \quad (7.2)$$

Potensialyň  $\varphi_1$  - den  $\varphi_2$  - ä çenli üýtgemegi galyňlygy  $\delta$  bolan örän ýuka gatlakda bolup geçýär (7.4 çyzgy). Metallaryň biri-birine degip duran gatlagyny  $\delta$  galyňlykly tekiz kondensator ýaly seredelein we bu gatlakda metallaryň galan göwrümleri bilen deňeşdirilende tok äkidijileriň sanynyň mümkin bolan

üýtgemesine baha bereliň. Tekiz kondensatoryň obkladkalarynyň arasyndaky potentsiallaryň tapawudynyň formulasyndan peýdalanalyň:

$$\Delta\varphi' = \frac{q}{c} = \frac{\sigma S}{C} = \frac{\sigma S}{\varepsilon_0 S} \delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \delta. \quad (7.3)$$



7.4. surat

Bu ýerde  $q$  zaryad bilen  $\sigma$  üst dykzlygyny we obkladkalaryň  $S$  meýdanyny baglanyşdyrýan we tekiz kondensator üin  $C$  sygymyň formulalary ulanylan. (7.3) formuladan  $\sigma = \varepsilon_0 \Delta\varphi' / \delta$ . Haçanda  $\delta \sim 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  we  $\Delta\varphi' = 1 \text{ eV}$  bolanda  $\sigma \sim 0.03 \text{ Kl/m}^2$ . Metallaryň galtaşma gatlagynda birlik meýdançanyň içinde tok äkidijileriň sanynyň üýtgemegi  $\Delta n = \sigma / e \sim 2 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-2}$ . Galtaşma gatlakda birlik meýdançanyň içinden geçýän tok äkidijileriň sany  $n \sim \delta n_0 \sim 3 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{29} \text{ m}^{-2} = 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$ . Şeýlelikde,  $\Delta n / n = 1/150$ . Bu iki metal galtaşanda örän ýuka galtaşma gatlakda metallaryň galan göwrümlerinde elektronlaryň  $n_0$  sanynyň has az üýtgemesi bolup geçýär. Diýmek, iki metalyň galtaşýan ýeriniň udel elektrik geçirijiligi  $\gamma$  we udel garşylygy  $\rho$  bu metallaryň öz häsýetlerinden tapawutlanýarlar.

Şu wagta çenli aýdylanlar  $T = 0 \text{ K}$  temperatura degişlidir. Bilişimiz ýaly, metallardaky elektron gazy üçin himiki potensial  $\mu = \mu(T)$  temperatura baglydyr. Bu (7.2) formula laýklykda  $\varphi_1 - \varphi_2$  ululygynyň temperatura baglydygyny aňladýar. Ýöne  $\mu(T)$  baglylyk örän gowşakdyr. Metal gyzdyrylanda Ferminiň derejesi aşakdaky formula boýunça örän az süýşýär

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

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

■ İçki galtaşma potentsiallaryň tapawudyndan başga elektronlaryň 1 we 2 metallardan çykyş işine bagly bolan **daşky galtaşma potentsiallaryň tapawudy** hem bardyr:

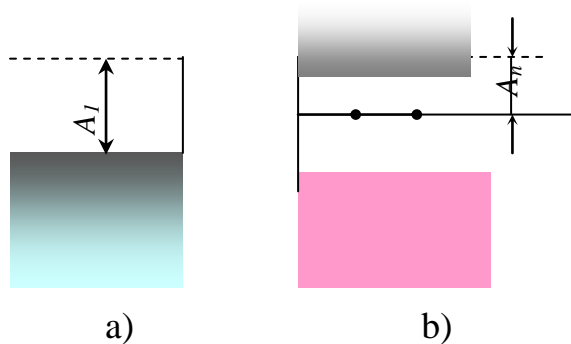
$$\varphi'_1 - \varphi'_2 = -(A_1 - A_2) / e. \quad (7.4)$$

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

### *Metal bilen ýarym geçirijiniň galtaşmagy*

■ Indi metal bilen ýarymgeçiriji galtaşanda bolup geçýän hadysa seredeliň.

Kesgitlilik üçin  $n$  – görnüşli ýarymgeçiriji saýlap alalyň. Mundan beýläk möhüm bolan pikiri öňe atalyň, ýagny elektronyň metaldan çykyş işi  $A_I$   $n$  – görnüşli ýarymgeçirijiden çykyş işinden ( $A_n$ ) uly. 7.5. a suratda metalyň geçiriji zonasynyň, ýarymgeçirijiniň walent zonasynyň we onyň donor derejeleriniň galtaşma çenli özara ýerleşişleri görkezilen. Metal bilen ýarymgeçiriji galtaşanda donor derejelerden elektronlar metala geçip başlaýarlar



7.5. surat

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

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

Daşky elektrik meýdanynyň güýjenmesiniň galtaşma gatlagyň ölçegine we garşylygyna täsirine jikme-jik seredeliň eger  $E$  wektor metaldan ýarymgeçirijä ugrukdyrylan bolsa (metal çeşmäniň položitel polýusy bilen, ýarymgeçiriji bolsa otrisatel bilen birikdirilen), onda elektronlar ýarymgeçirijiniň göwrümünde galtaşma gatlagla *sorulýarlar*, bu gatlagyň  $\delta$  galynlygynyň kiçelmegine we geçirijileriniň artmagyna getirýär. **Goyberiji** diýlip atlandyrylýan bu ugurda elektrik togy metal bilen ýarymgeçirijiniň gatlaşma gatlagy geçip bilýär. Eger  $E$  wektor ýarymgeçirijiden metala ugrukdyrylan bolsa, onda elektronlar goşa gatlakdan ýarymgeçirijiniň göwrümüne *gysylp çykarylýarlar*, bu ýagdaýda bekleýji gatlagyň galynlygy we onuň garşylygy artýar. Gatlak arkaly bu ugurda tok



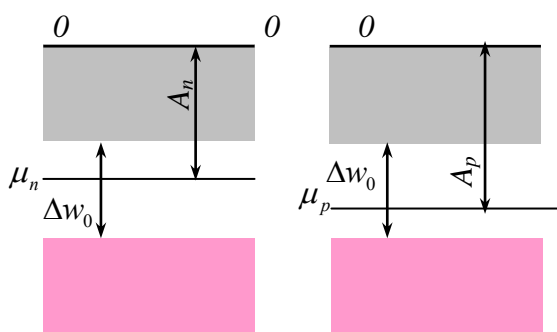
geçmeýär. Şeýlelik, bilen metal bilen ýarymgeçirijiniň gatlaşma gatlagy togy *birtaraplaýyn* geçirýär we üýtgeýän togy göneldýär.

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

### *Elektronly we deşijekli ýarymgeçirijiniň gatlaşmasy (p-n-geçiş)*

■ Häzirki zaman elektronikasynyň köp ýerlerinde dürli  $n$  – we  $p$ - görnüşli geçirijikli iki ýarymgeçirijiniň gatlaşmasy uly rol oýnaýar. Munuň ýaly gatlaşma **elektron - deşijek geçişi** ýa-da  $p$ - $n$  – geçiş diýilýär.

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



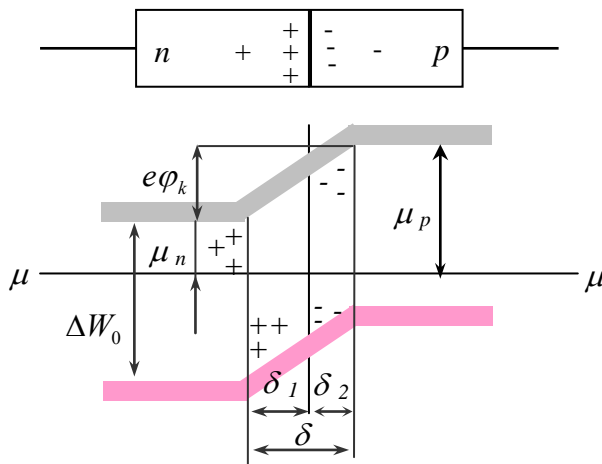
7.6. surat

Goý elektronyň çykyş işi  $A_n$  we Fermi derejesi  $\mu_n$  bolan donor ýarymgeçiriji çykyş işi  $A_p$  we Fermi derejesi  $\mu_p$  bolan akseptor ýarymgeçiriji bilen galtaşdyrylan (7.6- nýj surat). Munuň ýaly ýarymgeçirijileriniň galtaşmasy elektronlaryň  $n$  – ýarymgeçirijiden  $p$  – ýarymgeçirijä, deşijekleriň bolsa ters ugra bu bölejikleriň  $n$  – we  $p$  – ýarymgeçirijilerdäki ýokary sanlaryna laýyklykda geçmegine getirýär. Şol bir wagtyň özünde ýarymgeçirijileriň arasynda deňagramlylyk ýüze çykýar we himiki potensiallaryň deňleşmegi bolup geçýär.

■  $\delta_1$  galyňlykly galtaşma gatlagynda  $n$  – ýarymgeçirijiniň polojitel göwrüm zarýady emele gelýär,  $p$  – ýarymgeçirijiniň  $\delta_2$  galyňlykly galtaşma gatlagynyň bolsa otrisatel zarýad döreýär. Ýarymgeçirijilerde akseptorlaryň we donorlaryň sanlary deň bolanda zarýadlary ýygnan  $\delta_1$  we  $\delta_2$  gatlaklaryň galyňlyklary bir meňzeşdir ( $\delta_1 = \delta_2$ ) (7.7- nji surat).  $\delta_1$  we  $\delta_2$  gatlaklaryň esasynda donor ýarymgeçirijiden akseptor ýarymgeçirijide ugrukdyrylan **galtaşma potensiallaryň tapawudy** döreýär. Galtaşma potensiallaryň tapawudy bilen bagly bolan elektrik meýdany elektronlaryň  $n$  – den  $p$ - ýarymgeçirijä geçmegi kynlaşýar we olaryň  $p$  –

den  $n$  – ýarymgeçirijä geçmesi aňsatlaşýar.  $\varphi_k$  - ñ käbir bahalarynda tok äkidijileriniň biri-birine garşylykly ugrukdyrylan akymlyary deňleşýär we ýarymgeçirijeleriň arasynda deňagramlaşma hadysasy tamamlanýar – **deňagramlyk** ýüze çykýar.

Elektron  $n$  – den  $p$  – ýarymgeçirijä geçende  $\varphi_k$  potensialy ýeňip geçýär we



7.7. surat

elektronyň potensial energiýasyna geçýän iş edýär. Netijede galtaşma gatlagyň  $\delta$  galyňlygynyň çäginde  $p$  yarymgçinjidäki elektronlaryň hemme energetik derejeleri  $n$  ýarymgeçirijidäki elektronlaryň derejeler bilen deňleşende  $e\varphi_k$  “beýiklige” galýar (7.7- nji surat).

■ Galtaşýan ýarymgeçirijilerde iki äkidijileriň iki alamatlysy hem bardyr.

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

$$I_{0_{n-p}} = B \exp[-(\mu_n + e\varphi_k) / kT] \quad (7.5)$$

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

$$I_{0_{n-p}} = B \exp[-\mu_p / kT] \quad (7.6)$$

bu ýerde  $\mu_p$  -  $p$  – ýarymgeçirijide Ferminiň derejesinde geçiriji zonanyň düýbine çenli aralyk. (7.8) - nji çyzgy deňagramlylyk ýagdaýda  $\mu_p = \mu_n + e\varphi_k$  bolýandygynyň görkezýär. (7.5) - nji we (7.6) - nji çyzgylardan

$$I_{0_{n-p}} = I_{0_{n-p}} \quad (7.7)$$

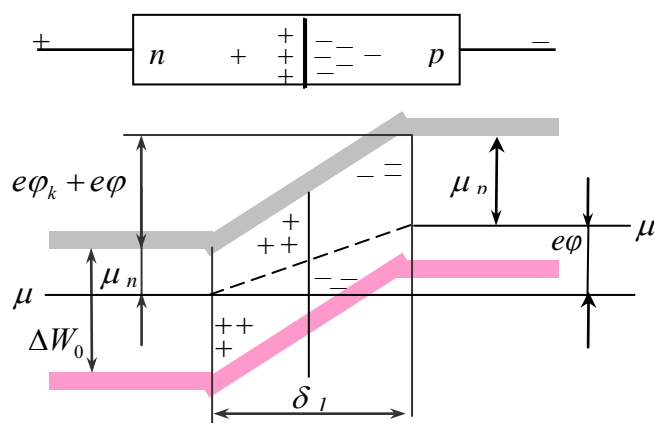
bolýandygy gelip çykýar. Şuňa meňzeşlikde deşijekleriň  $p$  – den  $n$  – e we  $n$  – den  $p$  – ýarymgeçirijä geçýän garşylykly akymlyary biri-birlerine deňdir. Diýmek, ýarymgeçirijiler deňagramlaşanlarynda toguň esasy äkidijileriniň akymy bilen ýok

edilýär (kompensirlenýär) we äkidijileriň  $p - n$  – geçiş arkaly jemleýji akymy nola deň.

### ***Daşky potentsiallaryň tapawudynyň $p - n$ – geçişe täsiri***

■ Goý  $p - n$  – geçişe galtaşma potentsiallaryň tapawudy  $\varphi_k$  - nyň ugry bilen gabat gelýän daşky potentsiallaryň tapawudy  $\varphi$  goýlan bolsun. Toguň çeşmesiniň plýusy  $n$  minusy bolsa  $p$  – ýarymgeçirijä dakylan. Bu  $n$  donor ýarymgeçirijiden  $p$  akseptor ýarymgeçirijä geçýän elektronlar üçin potensial böwediň beýikligini  $e\varphi$  ululyga (7.8- nji çyzgy) artdyrýar we  $p - n$  – geçişin deňagramlygyny bozýar. Elektronlaryň  $n$  – den  $p$ - ýarymgeçirijä akymy  $I_{n-p}$  deňagramlykly akym (7.5) bilen deňeşdirilende azalýar, sebäbi  $e(\varphi_k + \varphi)$  beýiklikli böwedi, beýikligi  $e\varphi_k$  bolan böwede garanda  $\exp[-e\varphi/kT]$  esse az elektron geçip bilýär. Elektronlaryň  $n$  – den  $p$  – ýarymgeçiriji ugurda akymy

$$I_{n-p} = I_{o_{n-p}} \exp[-e\varphi/kT] . \quad (7.8)$$



7.8. surat

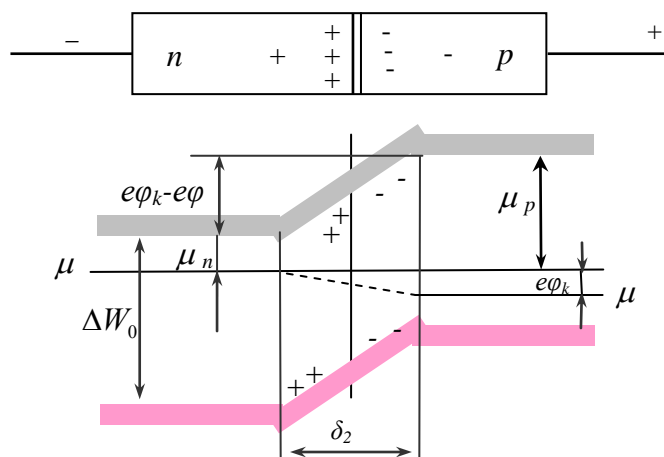
Böwediň beýikliginiň üýtgemegi  $p$  – den  $n$  – ýarymgeçirijä geçýän, (7.6) formula boýunça Fermiň deňlemesiniň  $p$  akseptor ýarymgeçirijiniň geçiriji zonasynyň düýbünden  $\mu_p$  aralygy bilen kesgiitlenýän elektronlaryň akymyny üýtgetmeýär.

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

$$I_n = I_{n-p} - I_{o_{n-p}} = I_{o_{n-p}} \exp[-e\varphi/kT] - I_{o_{n-p}} = I_{o_{n-p}} (e^{-e\varphi/kT} - 1) . \quad (7.9)$$

$p-n$  geçişde bu tok ulalan  $\delta$  galyňlykly galtaşma gatlak arkaly akýar. Bu ýagdaýda daşky potentsiallaryň tapawudynyň ugruna **bekleýän** ugur diýilýär.

■ Indi daşky potentsiallaryň tapawudyny toguň çeşmesiniň minusy  $n$  ýarymgeçirijide, plýusy bolsa  $p$  –ýarymgeçirijide bolar ýaly çatalyň (7.9-njy surat). Bu ýagdaýda potensial böwediň beýikligi  $e\varphi_k$  ululyga kiçelýär we  $e(\varphi_k - \varphi_1)$  ululyga deňdir we



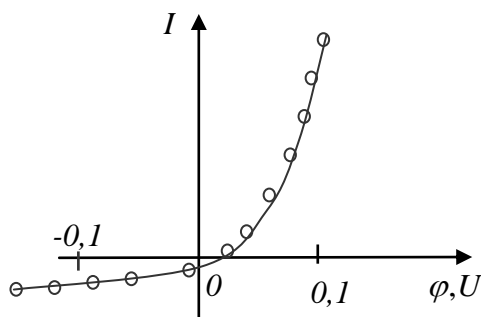
(7.9). surat

elektronlaryň çepden saga akymy  $\exp(e\phi_k/kt)$  esse artýar, çepden saga ugrukdyrylan jemleýji tok kemelen  $\delta_2$  galyňlykly galtaşma gatlak arkaly akýar we aşakdaka deňdir

$$I_n = I_{n-p} - I_{o_{n-p}} = I_{o_{n-p}} \exp[e\phi/kT] - I_{o_{n-p}} = I_{o_{n-p}} (e^{e\phi/kT} - 1). \quad (7.10)$$

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

(7.10) formula  $p$  –ýarymgeçirijidäki *esasy däl äkidijiler* girýär. Bu formulalar daşky potensiallaryň tapawudynyň täsiri astynda  $p$ – $n$  –geçiş arkaly elektrik akymynyň elektron düzüjisini aňladýär. Ondan başga elektrik akymynyň deşijekli ýarym-



7.10. surat

geçirijilerden biri-birine tarap ugrukdyrylan akymlyry bilen bagly bolan deşijekli düzüjisi hem bardyr. Bu  $I_p$  düzüjiler üçin formulalar (7.9) we (7.10) formulalara meňzeşlikde alynýar, ýöne olara  $n$  –ýarymgeçiriji üçin elektrik akymynyň esasy däl äkidijiler bolan deşijekleriň elektrik akymy döreýär.

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

akymlyrynyň jemidir. Eger daşky potensiallaryň tapawudy  $\phi$  bekleýän ugurda goýlan bolsa, onda  $\phi$  – niň artmagy bilen zynjyrdaky elektrik akymy özüniň  $\phi \approx 0,1W$  – da amala aşýan doýgun çäğine ymtylýar. Doýgun elektrik akymynyň güýji esasy däl äkidijileriniň galtaşma gatlak arkaly bir sekundyň dowamynda galtaşma gatlagyň iki tarapynda emele gelýän akymy bilen kesgitlenýär. Ýarymgeçirijilerde elektrik akymynyň esasy däl äkidijileriniň sany uly däl, şu

sebäpli doýgun elektrik akymy uly däldir. Beklenýän ugurda  $p - n$  – geçiş elektrik akymyny goýbermeýär diýen ýalydyr.

Eger  $p - n$  – geçişe daşky potentsiallarynyň tapawudy göni, goýberýän ugurda goýlan bolsa, onda elektrik akymynyň güýji  $p - n$  – geçiş arkaly eksponenta boýunça artýar we  $\varphi$  - niň kiçi bahalarynda uly bahalara ýetýär. (7.10)- ngy suratda  $p - n$  – geçişin wolt-amper häsiýetnamasy (WAH) görkezilen.

Oňat  $p - n$  – geçişlerde göneltme koeffisiýenti ýüz münlere ýetýär.  $p - n$  – geçişin göneldiji häsiýeti tehnikada giňden peýdalanylýar. Önümçilik  $p - n$  – geçişe esaslanan selenli, germaniýli we kremniýli göneldijileri öndürýär.  $p - n$  – geçişin göneldiji häsiýeti ýokary ýygyllykly elektromagnit yrgyldylaryny detektirmek üçin niýetlenen kristalliki diodlary gurnamak üçin ulanylýar. Olaryň kömegi bilen radiolokasiýada ulanylýan santimetirler zolagyndaky tolkunlar detektirlenýär. Kristallik diodlar çyraly (lampaly) diodlardan mehaniki berklikleri, arzanlygy, kiçi ölçegleri, uly işleýiş möhleti we başga möhüm aýratynlyklary bilen tapawutlanýarlar.

### S o r a g l a r

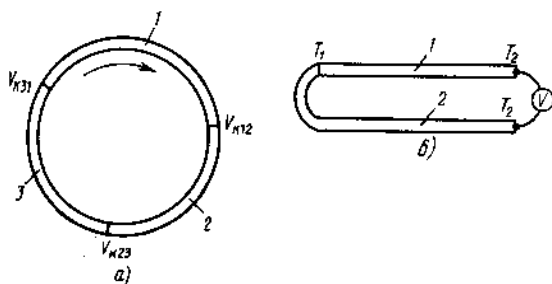
1. Nämе üçin iki metalyň galtaşmasyny birtaraplaýyn geçirijiligi döretmek üçin ulanyp bolmaýar.
2. Nämе üçin dürli görnüşli geçirijilikli iki ýarymgeçirijiniň galtaşmasy ( $p - n$  - geçiş) metal bilen ýarymgeçirijiniň galtaşmasyna garanda birtaraplaýyn geçirijiligi döretmek üçin amatly?
3. Elektrik meýdanynyň  $p - n$  – geçişe täsiri nämeden durýar?

## 8-nji sapak

### Tema: Termo-e.h.g. Zeýebekiň effekti. Peltýeniň effekti.

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

Mysal üçin üç sany dürli jşimlerden duran ýapyk zynjyra seredeliň (8.1 - surat ). Položitel diýip , sagat strelkasynyň ügruna zynjyrdaky togy ýüze çykarýaň ugra aýdalyň. Seredilýan materiallaryň termodinamiki çykyş işini degişlilikde  $\chi_{01}$ ,  $\chi_{02}$  we  $\chi_{03}$  diýip belläliň.



8.1-nji surat. Thermo-e.h.g. düşündirilişine degişli.

$$\text{Onda} \quad eU_{k12} = \chi_{01} - \chi_{02} \quad eU_{k23} = \chi_{02} - \chi_{03} \quad (8.1)$$

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

Eger (8.1) deňlikleriň sag we çep taraplaryny jemläp seretseň, onda seplesikde ýüze çykýan e.h.g. jemi nola deň bolar. Indi, mysal üçin 1-2 seplesigiň temperaturasyny üýtgedeliň. Ferminiň derejesinin hem-de termodinamiki çykyş işimiň 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 çykyp, oňa termoelektrohereketlendiriji güýç diýilýär.

Thermo-e.h.g. ýüze çykmagynyň esasy sebäbi diňe bir temperatura bilen seplesikdäki potensiallaryň tapawudynyň ýüze çykmaklygy bolman, geçirijiniň ugryna temperaturanyň üýtgemesi barlygy sebäpli erkin zarýadlaryň diffuziýasynyň we termodiffuziýa-synyň ýüze çykmaklygydyr. Mundan beýläk iň ýönekeý zynjyryň mysalynda, ýagny bir tarapy birleşdirilen iki geçirjä seredeliň. Geçirijileriň seplesmedik uçlaryna woltmetri birleşdireliň (8.1b surat). Bu effektiden başga ýüze çykýan goşmaça effektləri hasaba almazdan seredeliň.

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

$$U_{T-e.h.g.} = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_2 - T_1) \quad (8.2)$$

Bu ýerde  $\alpha_1$  we  $\alpha_2$  koeffisiýentler 1-nji we 2-nji materiallaryň häsiýetnamalaryna baglydyr. Olar differensial thermo-e.h.g. diýilip atlandyrylýar. Wýrožden däl n-tipi ýarymgeçirijiler üçin:

$$\alpha_n = -k/e \cdot (r + 2 - \mu/kT), \quad (8.3)$$

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

$$\lambda \sim E^r \quad (8.4)$$

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

Wýrožden däl p - tip ýarymgeçiriji üçin

$$\alpha_p = k/l \cdot (r + 2 - \mu^p/kT), \quad (8.5)$$

bu ýerde  $\mu^p$  - ferminiň derejesinden walent znanyň depisine çenli aralyk.

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

$$\alpha_{n,p} = (\alpha_n U_n + \alpha_p U_p) / (n U_n + p U_p) \quad (8.6)$$

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

$$\alpha_i = (\alpha_n U_n + \alpha_p U_p) / (U_n + U_p). \quad (8.7)$$

Termoelektrik effekti praktikada, şol bir sanda radioelektronikada hem geňden peýdalanylýar. Bu effektin, ýylylyk energiýasyny göni elektrik energiýasyna owurmeklik mümkinçiligi termogeneratorlarda peýdalanylýar. A. F. Ioffäniň teoriýasyna laýyklykda ýarymgeçiriji termoelementleriň ýylylyk

energiýasyny elektrik energiýasyna öwürüşiniň peýdaly täsir koeffisienti (p.t.k), şeýle ululyk bilen kesgitlenilýär  $(a^2\sigma)/\lambda$ , bu ýerde  $\lambda$  - ýarymgeçirijiniň ýylylyk geçirijilik koeffisiýenti;  $\sigma$  - udel elektrik geçirijiligi.

$(a^2\sigma)/\lambda$  - ululygyň, şeýle fiziki manysy bar.

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

Termoelektrik effekti termoparalarda temperaturany ölçemeklik üçin hem giňden ulanylýar.

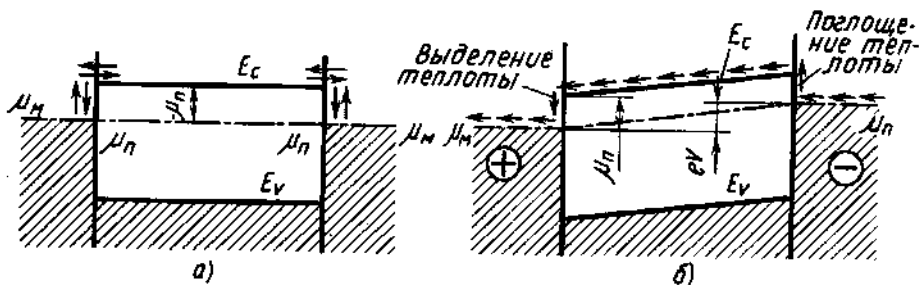
### Peltýeniň effekti.

Haçanda iki sany dürli materialyň seplesiginden elektrik togy geçende joule ýylylygyndan başga seplesikde goşmaça ýylylyk bölünip çykýar, ýada ýuwdulýar. Bu effekte - Peltýeniň effekti diýilýär. Bölünip çykýan, ýuwdulýan ýylylygyň mukdary  $Q_p$  seplesikden geçýän zarýadyň ululygyna  $I \cdot t$  göni proporsionaldyr.

$$Q_p = \pm \Pi \cdot I \cdot t \quad (8.8)$$

Proporsionallyk koeffisiýenti  $\Pi$  - Peltýeniň koeffisiýenti diýilýär.

Bu effektiň tabigatyna metal bilen ýarymgeçirijiniň mysalynda seredip geçeliň (8.2 surat). Ýönekeýlik üçin bu iki materialyň (metalyň we ýarymgeçirijiniň) seplesigini neýtral diýip alalyň. Şeýle seplesikde zarýadlara baýlaşdyrylan ýa-da garyplaşdyrylan gatlak bolmaýar hem-de zonalaryň egremi ýok. 8.2 suratda metal bilen n-ýarymgeçirijiniň aralygyndaky neýtral seplesigiň energetiki diagrammasy görkezilen.



8.2. Surat. Peltýeniň effektiniň düşündirilişi.

- m-ý-m - zynjyryň energetiki diagrammasy.
- Bu zynjyr elektrik togy göýberilende.

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

Şeýle seplesige daşky potensiallaryň tapawudyny birleşdireliň. Ýarymgeçirijide daşky potensialyň täsiri esasynda (täsir edýän naprýaženiýäniň aglabasy ýarymgeçirijide çököýär) çep seplesikden saga tarap Ferminiň derejesi ýuwaş-ýuwaşdan  $eU$  ululyga ýokary galýar. Metal ýarymgeçiriji gurluşda çepden saga urukdyrylan tok ýüze çykýar, elektronlar ters ugra sagdan çepden urukdyrylandyr. Suratdan görünişi ýaly, çep seplesikde ýarymgeçirijiden metala geçýän elektronlaryň, ýarymgeçirijide metaldakydan energiýasy

$-\mu_n + \langle E_n \rangle$  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. Elektronyň konsentrassiýasy ýokary bolmadyk  $n$  - tipli ýarymgeçiriji üçin, hasaplamalar esasynda  $\langle E_n \rangle$  tapýarys.

$$\langle E_n \rangle = (r + 2) kT, \quad (8.9)$$

$$\lambda \sim E^r$$

bu ýerde  $r$  – zaryadyň erkin ylgawynyň uzynlygynyň  $\lambda$  elektronyň energiýasyna baglanyşygyny görkezýän formuladaky dereje görkeziji.  $r$  – 4-nji deňlikdäki dereje görkeziji.

Şeýlelikde çep seplesikde ýarymgeçirijiden metala geçýän her elektron,  $\Delta E$  artyk energiýny alyp geçýär.

$\Delta E = -\mu_n + (r + 2) kT$ , (8.10)  $\Delta E$  - energiýa bu seplesikde goşmaça ýylylyk görnüşinde bölünip çykýar. Bu bölünip çykýan ýylylyga bolsa - Peltýeniň ýylylygy diýilýär. (8.10) - nji deňligi elektronyň zaryadyna ( $e$ ) bölüp Peltýeniň koeffisiýentini alarys

$$|\Pi| = k/e (r + 2 + \mu_n/kT) T \quad (8.11).$$

Sag seplesikde elektron, metaldan ýarymgeçirijä geçende,  $-\mu_n$  potensial barýeri ýeňip geçýär. Ondan başgada metaldan geçen elektron ýarymgeçirijidäki elektronlar bilen deňagramlygy saklamak üçin ýenede  $\langle E_n \rangle$  ululyga energiýasyny artdyrýar. Bu energiýalaryň 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, radioappaturalary sowadygy holodilnikleri hem-de mikroholodilnikleri döretmäge mümkinçilik berýar.

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



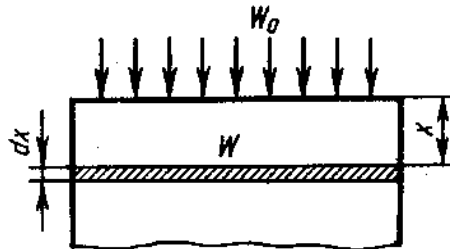
## 9-njy sapak

### Tema: Ýarymgeçirijilerde optiki hadysalar.

**Gaty jisimlerde (ýarymgeçirijilerde) ýagtylyk şöhlesiniň ýuwdulmagy we geçmesi. Ýarymgeçirijilerde şöhlenenme (lýuminessensiýa) hadysasy.**

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

Birhilli ýarymgeçiriji plastinkasynyň üstüne kuwwaty  $W_0$  bolan ýagtylyk şöhlesi gelip düşsin (9.1 surat). Ýagtylyk şöhlesi ýarymgeçirijiniň içine aralaşdygyça önüň kuwwaty azalýar.



9.1. Surat. Gaty jisimde ýagtylygyň ýuwdulma kanunyna düşündiriş.

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

$$dW = -\alpha \cdot W \cdot dx \quad (9.1)$$

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

Ýagtylygyň jisimiň üstünden serpilmesini hasaba alyp (9.1) deňligi integrirläp alarys.

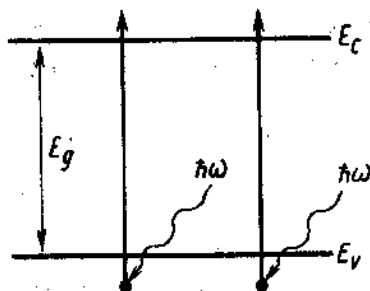
$$W = W_0(1-r)e^{-\alpha x} \quad (9.2)$$

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

hadysasy hem bolup geçýär. Emma biz ýönekeýlik üçin ýagtylygyň geçýän sredasynda diňe ýüwdulma hadysasyna seredeliň.

Hususy ýuwdulma.

Hususy ýuwdulmada, ýarymgeçirijilere gelip düşýän ýagtylyk energiýasy, elektronlary walent zonasynan geçiş zonasyna geçirmeklige harç bolýar (9.2 surat).



9.2. Surat. Ýarymgeçirijilerde ýagtylygyň hususy ýuwdulmasynyň görkezilişi.

Energiýanyň saklanmak kanunyna laýyklyda, walent zonadan elektronlary geçiş zona geçirmeklik (oýandymaklyk), haçanda ýagtylyk kwantynyň energiýasy  $h\nu$  ýarymgeçirijiniň gadagan zonasynyň giňliginden  $E_g$  kiçi bolmadyk ýagdaýynda mümkindir:

$$h\nu \geq E_g$$

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

$$\lambda_{\max} = 2\pi \cdot \frac{c}{\nu} = 2\pi c \cdot \frac{\hbar}{E_g} \quad (9.3)$$

bu ýerde  $c$  - ýagtylygyň tizligi.

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

$$\lambda_{\max} = \frac{1.24}{h\nu} \quad (9.4)$$

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

$$P_n = P_p + P_{\text{fot}} \quad (9.5)$$

Bu ýerde  $P_n = \hbar \cdot k_n$  - elektronyň impulsy;  $P_p$  - walent zonadaky emele gelen deşigiň impulsy;  $P_{\text{fot}}$  - elektrony oýandyran fotonyň impulsy. Egerde fotonyň impulsynyň elektronyň impulsyndan  $10^3$  esse kiçiligini göz önünde tutsaň onda elektronyň geçiş zona geçmegi bilen onuň impulsy deşigiňkä seredende üýtgemän galýar:

$$\hbar k_n \approx \hbar k_p \quad (9.6)$$

Energetiki diagrammada şeýle geçişi göni geçiş diýilip atlandyrylyp, wertikal strelka bilen görkezilýär (9.2.3a surat).

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

$$\alpha_s = \frac{e^2 \left[ 2m_n m_p / (m_n + m_p) \right]^{\frac{3}{2}}}{4\pi \cdot \bar{n} \cdot c \cdot \hbar^2 \cdot \epsilon_0 \cdot m_e} \cdot (\hbar v - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (9.7)$$

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

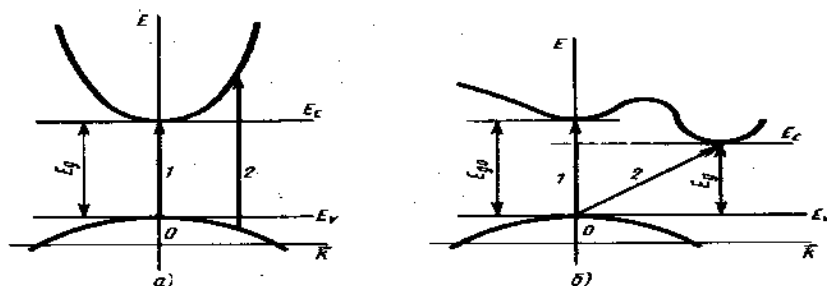
$$\alpha_s \cong 2.7 \cdot 10^5 (\hbar v - E_g)^{\frac{1}{2}}$$

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

Haçanda ýarymgeçirijide geçiş zonanyň düýbi  $E_c$  walent zonanyň depesi  $E_v$  bilen, k wektoryň dürli bahalarynda ýerleşen bolsa (9.3b surat), onda wertikal boýunça  $E_{g0}$  aralyk gadagan zonanyň giňliginden uludyr  $E_g = E_c - E_v$ . Bu ýagdaýda optiki göni geçiş boýunça elektronlaryň oýandyrylmagy üçin, ýagtylyk kwantynyň energiýasy  $E_{g0}$ -dan artyk ýada deň bolmalydyr

$$\hbar v \geq E_{g0} \quad (9.8)$$

$E_{g0}$  ululyga optiki gadagan zonanyň ginligi diýilp at berilýär. Şeýle ýarymgeçirijilerde göni geçişden başgada göni däl geçiş ýüze çykyp bilýär, 9.3b suratda gytak strelka bilen görkezilen.



9.3. Surat. Göni (a) we göni däl (b) zonara geçişli ýarymgeçirijileriň zona diagrammasy. Görkeziji çyzyjyklar bilen zona-zona geçişiniň ugry görkezilen.

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

$$E_n = E_p + \hbar\nu \pm E_{\text{fon}}; \quad (9.9)$$

$$P_n = P_p + P_{\text{fot}} \pm P_{\text{fon}}; \quad (9.10)$$

Deňlikde plýus alamat, haçanda hadysada fononyň ýuwdulmasy bolup geçse, minus haçanda hadysa fononyň göýberilmegi bilen bolup geçse. Ýarymgeçirijilerde fononyň energiýasynyň 0.01 eV-dan geçmeýänligini göz önünde tutsan, haçanda fotonyň energiýasy  $h\nu \approx 1$  eV töweregi bolanda, onda fononyň energiýasyny hasaba almasaň hem bolýar. Fononyň impulsy  $\hbar k_{\text{fon}}$  elektronyň impulsy ýaly Brillýuen birinji zonasynda ýatýar.

Ýarymgeçirijilerde lýuminessensiýa hadysasy. Ýarymgeçiriji gurluşlarda rekombinassion şöhlelenme.

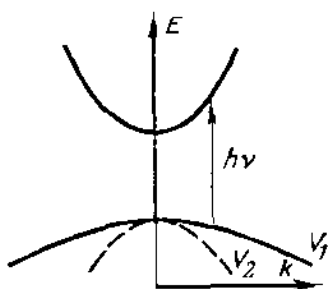
Oýandyrylan ýagdaýyndaky ýarymgeçirijilerde, elektromagnit tolkunlarynyň şöhlelenmesiniň (göýberilmeleriniň) ýüze çykmagy mümkin. Bu hadysa lýuminessensiýa diýlip at berilip, ol ýuwdulma hadysa ters hadysadyr. Ýarymgeçirijiniň şeýle oýandyrylan ýagdaýyny birnäçe usul bilen almak mümkin. Haçanda lýuminessensiýa daşky gelip dýşýän ýagtylygyn energiýasynyň hasabyna ýüze çykýan bolsa onda oňa fotolýuminissensiýa diýilip at berilýär.

Eger-de lýuminessensiýa kristaly ýakary tizlikli elektronlar bilen urmaklygyn hasabyna ýüze çykýan bolsa, onda oňa katodolýuminessensiýa diýilip at beilýär. Bulardan başgada lýuminessensiýa rentgen şöhlesi tarapyndan oýandyrylyp bilýär, şeýle Lýuminissensiýa rentgenolýuminissensiýa diýilýär. Ýokarda aýdylanlary göz önünde tutup lýuminissensiýa şeýle kesgitleme berilýär. Lýuminissensiýa bu jisimiň ýylylyk şöhlelenmesinden artykmaç energiýanyň hasabuna ýüze çykýan

şöhledenme bolup, adaty elektromagnit şöhlesi ýaly häsiýetlendirilýär. Kesgitlenmä laýyklykda, jisimiň deňagramlykdaky ýylylyk şöhledenmesinden tapawutlylykda, lüminissensiýa deňagramlykda däl şöhledenmedir. Islendik elektromagnit şöhledenmesi ýaly, lüminissensiýa özüniň intensiwlegi, kogerentligi we oýandyrmadan soňky şöhledenmän dowamlylygy bilen tapawutlanýar. Lüminissensiýada ýagtylygynyň ýuwdulmasy we şöhledenmesi aralyk hadysalar bilen bir-birinden bölünendir, şol sebepli hem oýandyрма bes edilenden soň hem lüminissent şöhleleme belli bir wagtdan edilýär

#### Geçiş zonasyny bilen walent zonasynyň arasyndaky göni geçiş.

Goni geçişli gadagan zonaly ýarymgeçirijilerde ýagtylygynyň ýuwdulmagy erkin elektronyň we erkin deşigiň emele gelmegini ýüze çykaryp, olaryň tolkun wektorlary birmeňzeşdir ( $k=k$ ). Yagtylyk energiýasy ýuwdulandan soň, belli bir wagtdan erkin elektron geçiş zonanyň düýbüne gelýär, erkin deşik walent zonasynyň depesine barýar (şeýle hadysa relaksasiýa diýülýär). Gaty jisimlerde şeýle ýagdaý köplenç  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  c töweregi wagtda amala aşýar. Haçanda relaksasiýadan soň erkin elektronyň we deşigeň birmeňzeş tolkun wektorlary bar meňzeş bolan ýagdaýynda, rekombinassiýa prosessiniň ähtimallygy ýokarydyr (9.4 surat).



9.4. Surat. Göni şöhledenmeli (izluçatelnyý) geçişler.

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

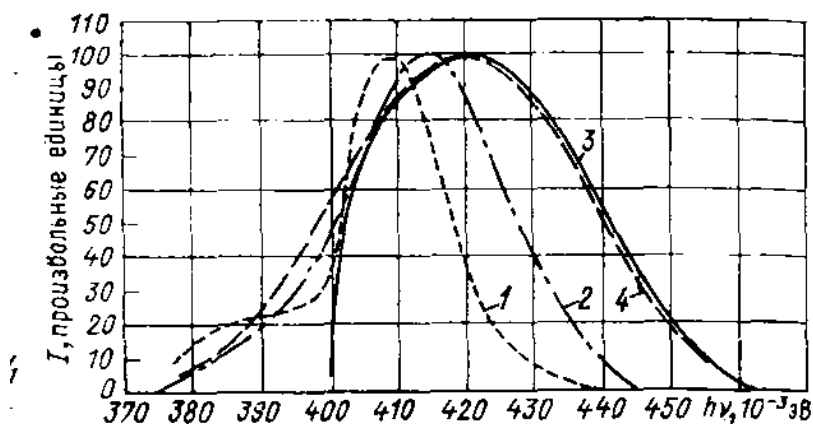
$$I(h\nu) = B(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (9.11)$$

bu ýerde B - hemişelik san.

Bu aňlatmadan görünişi ýaly, erkin zaryadlaryň rekombinassiýasy esasynda ýüze çykýan şöhledenme-lüminessensiýa, spektriň kiçi energiýasy tarapyndan, ýagny  $h\nu = E_g$ , çäklidir.

Gelip düşýän ýagtylygynyň energiýasynyň  $h\nu \geq E_g$  bolmagy we artmagy, geçiş zonasyna ýokardaky derejeleriň doldurylmagyna getirýär. Bu bolsa energiýasy gadagan zonanyň giňliginden ( $E_g$ ) uly bolan ýagtylyk fotonlarynyň şöhledenmegine we lüminessensiýanyň spektrinde gysga tolkun uzynlykly (ýokary energiýaly) «guýrugyň» emele gelmegine getirýär. 9.5. suratda n-tipli InAs ýarymgeçiriji kristalynyň fotolüminessensiýa şöhledenmesiniň spektri görkezilen. Suratdan görnüşi ýaly garyndylaryň konsentrasiýanyň artmagy bilen

spektrde ýokary energiýa tarap gyranyň we spektriň maksimumynyň uly energiýa süýşmegi Fermiň derejesiniň geçiş zonanyň düýbine şüýşmegi bilen düşündirilýär.



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

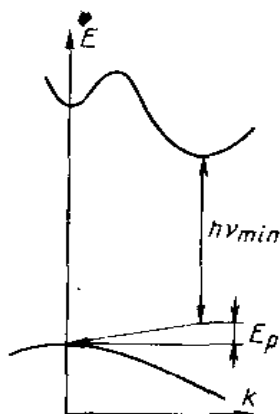
Geçiş zona we walent zona aralykdaky göni däl geçiş.

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

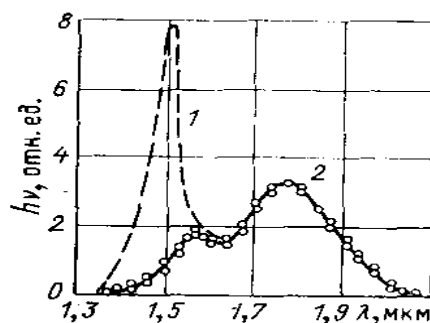
$$I(h\nu) = B(h\nu - E_g + E_{\text{fon}})^2 \quad (9.12)$$

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

Eger-de ýarymgeçirijide göni we göni däl geçişin bolmagynyň mümkinçiligi bar bolsa onda, lýuminessensiýa iki aýratyn bölekden durýar. Lýuminessensiýa spektriniň uzyn tolkun uzynlyklysy göni däl geçişe degişli, gysga tolkun uzynlyklysy göni geçişe degişlidir. 9.6 suratda göni däl geçiş we 9.7 suratda germaniý kristalynyň lýuminessensiýa şöhlelenmesiniň spektri görkezilen.



9.5. Surat. Göni däl şöhlelenmeli geçişler.



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

#### Ýarymgeçirijilerde lýuminessensiýa şöhlemenmesiniň relaksasiýasy.

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

$$I_1 \approx \left( \frac{dn}{dt} \right) \quad (9.13)$$

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

$$n = n_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (9.14)$$

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

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

$$I_1 \sim e^{-t/\tau} \quad (9.15)$$

bu gatnaşykdan:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (9.16)$$

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

### **Edebiýatlar:**

1. Türkmenistanyň Konstitusíasy. Aşgabat, 2008.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
3. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. II tom. Aşgabat, 2009.
4. Gurbanguly Berdimuhamedow. Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, Halky söýmek bagtdyr. Aşgabat, 2007.
5. Gurbanguly Berdimuhamedow. Türkmenistan – sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. Aşgabat, 2007.
6. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň Ministrler Kabinetiniň göçme mejlisinde sözlän sözi. (2009-njy ýylyň 12-nji iýuny). Aşgabat, 2009.
7. Türkmenistanyň Prezidentiniň “Obalaryň, şäherleriň, etrapdaky şäherçeleriň we etrap merkezleriniň ilatynyň durmuş-ýaşaýyş şertlerini özgertmek boýunça 2020-nji ýyla çenli döwür üçin” Milli maksatnamasy. Aşgabat, 2007.
8. “Türkmenistany ykdysady, syýasy we medeni taýdan ösdürmegiň 2020-nji ýyla çenli döwür üçin Baş ugry” Milli maksatnamasy. “Türkmenistan” gazetini, 2003-nji ýylyň, 27-nji awgusty.
9. “Türkmenistanyň nebitgaz senagatyny ösdürmegiň 2030-njy ýyla çenli döwür üçin Maksatnamasy”. Aşgabat, 2006.
10. Шалимова К.В. Физика полупроводников. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы». М., «Энергия», 1985.
11. Зи С. «Физика полупроводниковых приборов». В 2-х книгах, М: Мир -1987 г.
12. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов, 1980.
13. Ökdirow A., Kuliýew T.A. Senagat elektronikasy – A.: Ylym, 2005.



## Mazmuny

<b>№</b>	<b>Tema</b>	<b>Sahypa</b>
<b>1</b>	<i>Giriş. Kristallik gözenek. Defektler.</i>	<b>1</b>
<b>2</b>	<i>Kristallarda defektler we olaryň görnüşleri: çyzykly, nokatlanç, üstleýin. Dislokasiýalaryň, defektleriň dykyzlygynyň hasaplanylyşy.</i>	<b>7</b>
<b>3</b>	<i>Gaty jisimleriň zona nazariýetiniň esaslary.</i>	<b>11</b>
<b>4</b>	<i>Zonalaryň elektronlar bilen doluşy. Jisimleriň metallara, dielektriklere we ýarym geçirijilere bölünişi.</i>	<b>17</b>
<b>5</b>	<i>Ýarym gecirijilerde elektronlaryň we deşikleriň statistikasy.</i>	<b>36</b>
<b>6</b>	<i>Galwanomagnit effektleri. Hollyň effekti. Ettingsgauzeniň effekti. Termomagnit effektleri.</i>	<b>41</b>
<b>7</b>	<i>Galtaşma (kontakt) hadysalary</i>	<b>45</b>
<b>8</b>	<i>Termo-e.h.g. Zeýebekiň effekti. Peltýeniň effekti.</i>	<b>53</b>
<b>9</b>	<i>Ýarymgeçirijilerde optiki hadysalar.</i>	<b>57</b>
<b>10</b>	<i>Edebiýatlar</i>	<b>64</b>