

Ə.Ş.ABDİNOV, H.M.MƏMMƏDOV

**BƏRK CİSİM
ELEKTRONİKASI**

(Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti)

*Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyinin
26 aprel 2004-cü il tarixli 355 sayılı
əmri ilə təsdiq edilmişdir*

«TƏHSİL» NƏŞRİYYATI
BAKİ—2004

22.1 я 72

A 14

+ 621.3
A 14

Elmi redaktoru:

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof. B.Ş.Barxalov

Rəyçilər:

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof. N.M.Mehdiyev

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof. R.A.Süleymanov

Abdinov Ə.Ş., Məmmədov H.M.

A 14 Bərk cisim elektronikasısı. Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti.
Bakı, «Təhsil», 2004, . 136 səh.

Kitabda fizika, elektronika, fiziki elektronika, radiofizika, eləcə də bəzi başqa istiqamət və ixtisaslarda tədris olunan elektron cihazları, bərk cisim elektronikasısı, yarımqeçirici cihazlar fənlərinin proqramlarına uyğun olaraq bərk cisimlər (yarımqeçiricilər) əsasında yaradılmış ən geniş yayılmış elektron cihazları, onların iş prinsipi, quruluşu, növləri, parametrləri və xarakteristikaları haqqında məlumatlar şərh olunur.

O, əsasən ali məktəblərin uyğun ixtisasları üzrə bakalavr pilləsində təhsil alan tələbələr üçün dərs vəsaiti kimi nəzərdə tutulmuş olsa da, mühəndislər, aspirantlar, elmi işçilər və ali məktəb müəllimləri üçün də faydalı ola bilər.

A $\frac{160100000}{053}$ 2004

**BDU-nün
Elmi kitabxanası**

22.1 я 72

© «Təhsil», 2004

MÜNDƏRİCAT

	səh.
GİRİŞ	5
I Fəsil. Bərk cisim elektronikasının element bazası	7
§ 1.1. Yarımkəçirici cihazların təsnifatı	7
§ 1.2. Yarımkəçirici cihazların üstünlükləri və çatışmazlıqları	9
§ 1.3. Elektrik keçidləri	10
II Fəsil. Elektron-deşik keçidi ($p-n$ keçid)	12
§ 2.1. $p-n$ keçidin əmələ gəlməsi	12
§ 2.2. $p-n$ keçidin potensial çəpərinin hündürlüyü və eni ..	15
§ 2.3. $p-n$ keçidə xarici elektrik sahəsinin təsiri	18
§ 2.4. İdeal $p-n$ keçidin volt-ampər xarakteristikası	21
§ 2.5. $p-n$ keçidin növləri	25
§ 2.6. $p-n$ keçidin tutumları	29
§ 2.7. $p-n$ keçidin dəşilməsi	34
III Fəsil. Yarımkəçirici diodlar	40
§ 3.1. Yarımkəçirici diodların təsnifatı	40
§ 3.2. Düzləndirici diodlar	41
§ 3.3. İmpuls diodları	44
§ 3.4. Stabilitron	47
§ 3.5. Tunel diodu	52
§ 3.6. Çevrilmiş diod	57
§ 3.7. Varikap	58
IV Fəsil. Tranzistorlar	65
§ 4.1. Bipolyar tranzistorlar	65
§ 4.2. Bipolyar tranzistorun dövrəyə qoşulma sxemləri	68

§ 4.3. Bipolyar tranzistorun dövrəyə qoşulma rejimləri	68
§ 4.4. Bipolyar tranzistorun gücləndirmə mexanizmləri ...	69
§ 4.5. Bipolyar tranzistorun parametr və xarakteristikaları	72
§ 4.6. Dreyf tranzistoru	75
§ 4.7. Unipolyar tranzistor.....	78
V Fəsil. Güclü sahə cihazları	87
§ 5.1. Gann effekti və Gann diodları.....	87
VI Fəsil. Tenzoelektrik cihazları (tenzoqeydedicilər)	95
§ 6.1. Tenzorezistor	96
§ 6.2. Tenzodiodlar.....	98
VII Fəsil. Maqnit sahəsi qeydediciləri	101
§ 7.1. Holl qeydediciləri.....	101
§ 7.2. Maqnitorezistorlar	105
§ 7.3. Maqnitodiodlar	108
VIII Fəsil. İstilik və termoelektrik cihazları	111
§ 8.1. Termorezistor	111
§ 8.2. Termoelektrik hadisələri	119
§ 8.3. Termoelektrik generatorları.....	123
§ 8.4. Termoelektrik soyuducuları və istilik nasosları (termoelektrik qızdırıcıları)	130
ƏDƏBİYYAT SİYAHISI	135

GİRİŞ

Geniş mənada **elektronika** dedikdə, müxtəlif (bərk, maye, qaz və plazma kimi) mühitlərdə baş verən elektron hadisələrinin, onların əsasında cihaz və qurğuların hazırlanmasının, işləməsinin və istehsalının fiziki əsaslarını öyrənən elmi-texniki sahə nəzərdə tutulur.

Elektronika bugünkü mərhələsində elmin, texnikanın, sənayenin, məişət texnikasının əsasında durduğu kimi, digər elm və texnika, eləcə də istehsalat sahələri də onun inkişafına zəmin yaradır və ehtiyaclarını təmin edir. Buna görə də elektronikanın geniş miqyasda əhəmiyyətə və rola malik olması şübhəsizdir.

Bütövlükdə elektronikanın **fiziki, texniki və sənaye elektronikaları** kimi üç əsas sahəsi var. **Fiziki elektronika** mühit, cihaz, qurğu və sistemlərdə baş verən elektron proseslərini öyrənir. **Texniki elektronika** müxtəlif elektron prosesləri əsasında cihaz, qurğu və sistemlərin yaradılması imkanlarını, bu imkanların **praktiki olaraq reallaşdırılması variantlarının** fiziki əsaslarını müəyyənləşdirir. **Sənaye elektronikas** isə elektronikanın digər iki sahəsinin (fiziki və texniki elektronikanın) tövsiyələrinin elmi əsaslarla kütləvi istehsal səviyyəsində yerinə yetirilməsi məsələlərini həll edir.

Elektronikanın sonuncu iki sahəsinin – texniki və sənaye elektronikasının uğurları ilk növbədə fiziki elektronikanın inkişaf səviyyəsindən asılıdır. Fiziki elektronika elektronikanın digər iki sahəsinin ideya mənbəyi və istiqamətvericisidir. Fiziki elektronikanın elmi əsaslarla irəli sürdüyü tövsiyələr olmadan texniki elektronika və sənaye elektronikas

ya heç nə edə bilməz, ya da etdikləri sənətçilik səviyyəsindən yuxarı qalxmaz. Bu isə müasir həyatın tələblərindən çox uzaqdır.

Fiziki elektronikanın özünün də çox müxtəlif istiqamət və

problemləri var. Həmin istiqamət və problemlərin əsas prinsip və məqamları ilə gələcəyin peşəkar mütəxəssislərini lazımcasına tanış edə bilmək üçün «Fiziki elektronika» istiqamətində təhsilin bakalavr pilləsinin baza tədris proqramına «Vakuum texnikasının əsasları», «Emissiya elektronikasını», «Bərk cisimlərin fizikası», «Qaz boşalması və plazma fizikası», «Radiofizika», «Elektron və ion cihazları», «Elektron optikası», «Bərk cisim elektronikasını», «Mikroelektronika», «Optoelektronika», «Kvant elektronikasını», «Fizikada və elektronikada kompyüter texnologiyası» fənləri daxil edilmişdir.

Adları çəkilən fənlərdən hər biri kimi, «Bərk cisim elektronikasını» fənninin də konkret məqsədi var və bu məqsəd onun məzmununda öz əksini tapır.

Daha dəqiq deyilsə, «Bərk cisim elektronikasını» fənninin əsas məqsədi müxtəlif bərk cisimlərin (yarımkeçiricilərin) əsasında hazırlanmış elektron cihazlarının, onların əsas işçi elementlərinin yaradılması və işləməsinin, onlarda baş verən elektron proseslərinin fiziki əsaslarının təhlilini şərh etmək, bu cihaz və elementlərin ən mühüm parametrlər, xarakteristika və imkanlarını araşdırmaqdır.

İ F Ə S İ L

BƏRK CİSİM ELEKTRONİKASININ ELEMENT BAZASI

§ 1.1. Yarımkəçirici cihazların təsnifatı

Bərk cisim elektronikasının element bazasını başlıca olaraq yarımkəçirici cihazlar təşkil edir. **Yarımkəçirici cihaz** dedikdə **işçi elementi** yarımkəçirici material olan və iş prinsipi məhz yarımkəçiricilərə xas elektron proseslərinə əsaslanan cihazlar nəzərdə tutulur.

İlk yarımkəçirici cihazlar 40-50 il bundan əvvəl meydana gəlsələr də, onlara olan güclü tələbat və maraq nəticəsində qısa müddətdə bu cihazların çeşidi və praktiki tətbiq sahələri təsəvvürə gəlməyəcək dərəcədə genişlənmişdir.

İndi demək olar ki, hər bir elm, texnika və istehsalat sahəsində, hər bir texniki qurğuda müəyyən bir yarımkəçirici cihaz və ya cihazlar kompleksindən istifadə olunur.

Çox vaxt yarımkəçirici cihazlarla aparılan işi asanlaşdırmaq, müəyyən sistemli şəkllə salmaq üçün onları müxtəlif prinsiplər əsasında qruplaşdırırlar. İndiki halda ən geniş yayılmış qruplaşdırmalar işçi materialına, fəaliyyət prinsipinə, quruluşuna, hazırlanma texnologiyasına, işçi tezlik intervalına, tətbiq sahəsinə, gücünə və s. görə aparılan qruplaşdırmalardır.

Məsələn, yarımkəçirici cihazlar işçi materialına görə – germanium, silisium, selen, kadmium selen, qallium arsen və başqa yarımkəçirici materialların həcmində baş verən proseslərə əsaslanan cihazlar; quruluşuna görə – bircins və qeyri-bircins ($p-n$ keçid, hetero keçid, metal-yarımkəçirici və başqa tipli elektrik keçidləri əsasında qurulan) cihazlar; iş prinsipinə görə – fotoelektrik, maqnetoelektrik, termoelektrik, tenzoelek-

trik cihazlar və başqa cihazlar qrupuna ayrılırlar. Sonuncu halda yarımkeçirici cihazların iş prinsipinin uyğun olaraq fotoelektrik, maqnitoelektrik, termoelektrik, tenzoelektrik hadisələrinə əsaslandığı nəzərdə tutulur. Yarımkeçirici cihazlar işlədiyi tezlik diapazonuna görə – alçaq, yüksək və ifrat yüksək tezlikli; gücünə görə – kiçik, orta və böyük güclü; yaxud da sadəcə olaraq – təbii sahələrinə və ya yerinə yetirdikləri funksiyalarına görə – düzləndirici, gücləndirici, qəbuledici, qeydedici; çevirdikləri enerjinin növünə görə – elektroçevirici, fotoçevirici, şüalandırıcı və s. cihazlar qrupuna da ayrılırlar. Ən çox çeşidli çeviricilər elektrik çeviriciləridir. Bu qrupa əksər diodlar və demək olar ki, bütün tranzistorlar, tiristorlar daxildir.

İnfraqırmızı şüalar texnikasının, lazer sistemlərinin və optoelektronikanın inkişafı ilə əlaqədar olaraq son dövrlərdə fotoelektrik və şüalandırıcı cihazlar (fotorezistorlar, fotodiodlar, fototranzistorlar, fotoelementlər, işıq diodları və müxtəlif növ lazerlər) qrupu daha böyük inkişaf tapmışdır. Lakin bu cihazların öyrənilməsi başqa bir fənnin – «Optoelektronika»nın mövzusuudur.

Bir sıra başqa fiziki effektlərə əsaslanan (məsələn, pyzeo-elektrik effekti, Holl effekti, Zeyebek effekti, Qann effekti və s.) müxtəlif funksiyalı yarımkeçirici cihazların hazırlanması da son vaxtlar çox geniş vüsət almışdır.

Bəzi hallarda yarımkeçirici cihazlar quruluşuna və hazırlanma texnologiyasına (ərintili, diffuziyalı, meza, $n-p-n$, $p-n-p$, $p-i$, $n-i$ cihazlar) görə də qruplaşdırılır.

İndi tədqiqat üçün maraq kəsb edən yarımkeçirici materialların yüzlərlə yox, minlərlə (Si , Ge , As , P , S , Se , Te və s. kimi sadə, A_1B_7 , A_1B_6 , A_1B_5 , A_2B_6 , A_3B_5 , A_3B_6 , A_4B_6 , $A_1B_3C_6$, $A_1B_5C_6$ və s. kimi mürəkkəb) olmasına baxmayaraq yarımkeçirici cihazların hazırlanmasında əsasən onların yalnız çox

az bir qismindən (germanium, silisium, selen, bəzi A_2B_6 və A_3B_5 birləşmələri və s.) istifadə olunur.

Yarımkeçirici cihazlar sənayesində istifadə olunan ən başlıca yarımkeçirici materiallar isə hələlik germanium və silisiumdur. Son vaxtlar A_3B_5 yarımkeçirici birləşmələri qrupundan olan $GaAs$ də nisbətən geniş tətbiq tapmışdır.

Qeyd etmək lazımdır ki, yarımkeçirici cihazların istehsalında kimyəvi təmiz yarımkeçirici materiallardan demək olar ki, çox nadir hallarda istifadə olunur. Bu məqsədlə əsasən aşqarlanmış yarımkeçirici materiallar geniş tətbiq olunur.

Yarımkeçirici cihazın işçi həcmi onun əsas elementi olan yarımkeçirici materialın fiziki sərhədləri ilə məhdudlanır. Əsas işçi element xüsusi bir germetik örtük (korpor) daxilində yerləşdirilir və həmin örtük işçi yarımkeçirici materialı ətraf mühətdən təcrid (izolə) edir və müxtəlif arzuolunmaz təsirlərdən qoruyur. Örtük metaldan, şüşədən və ya plastmasdan düzəldilir. Cihazın işçi elementi xarici elektrik dövrəsinə müxtəlif üsullarla (lehımləmə, qaynaq, pərçim və s.) ona bərkidilmiş xüsusi çıxışlar vasitəsi ilə qoşulur.

Kiçik güclü yarımkeçirici cihazlarda işçi materialın ölçüləri $10^{-2} \div 10^{-1} \text{ mm}^3$ tərtibində olur. Daha güclü cihazlarda isə bu ölçülər bir neçə, hətta bəzən onlarla kub millimetrə çatır.

Yarımkeçirici cihazların örtüklərinin (korporlarının) ölçüləri həmin cihazların istismar olunduğu sahələrin xarakterindən, səpilən gücün qiymətindən, uyğun elektron sxemlərinin tip və təyinatından asılı olur.

§ 1.2. Yarımkeçirici cihazların üstünlükləri və çatışmazlıqları

Yarımkeçirici cihazlar indi öz elektrovakuum analoqların-

dan daha intensiv tədqiq olunur və daha geniş istifadə edilirlər. Bunun başlıca səbəbi onların elektrovakuum cihazları ilə müqayisədə bir sıra əsaslı üstünlüklərə malik olmasıdır. Daha mühüm əhəmiyyət kəsb edən üstünlüklər isə yarımkəçirici cihazların öz elektrovakuum analoqlarına nisbətən daha kiçik kütlə və ölçüyə malik olmaları; közərmə enerjisi tələb etməmələri; yüksək etibarlılığa, böyük xidmət müddətinə, yüksək mexaniki davamlılığa və daha böyük faydalı iş əmsalına malik olmaları; kiçik qidalanma gərginliklərində işləyə bilmələri, mikroelektronika sxem və qurğularında istifadə oluna bilmələri, ucuz başa gəlmələridir.

Lakin bu cihazların da müəyyən çatışmazlıqları var. Belə ki, elektrovakuum cihazlarından fərqli olaraq yarımkəçirici cihazların parametr və xarakteristikaları temperaturdan və radioaktiv şüalanmaların təsirindən güclü asılı olmaqla yanaşı, zaman keçdikcə pisləşirlər (bu cihazların qocalması baş verir). Bundan əlavə yarımkəçirici cihazlarda məxsusi küy böyük, giriş müqavimətinin qiyməti isə kiçik olur. Tranzistorların faydalı gücünün kiçik olması da yarımkəçirici cihazların çatışmazlıqlarındandır.

Lakin bu qüsurlar və çatışmazlıqlar yarımkəçirici cihazların konstruksiya (layihə) və texnologiyasının getdikcə təkmilləşdirilməsi hesabına ya tamamilə aradan qaldırılır, ya da nisbətən zəiflədilir.

§ 1.3. Elektrik keçidləri

Əksər yarımkəçirici cihazlar qeyri-bircins yarımkəçirici sistemlər – **yarımkəçirici elektrik keçidləri** əsasında hazırlanır və belə keçidlərdə baş verən fiziki proseslər əsasında işləyir.

Elektrik keçidi – müxtəlif keçiricilik tipinə, yaxud keçiriciliyin müxtəlif qiymətinə malik olan eyni yarımkeçirici materialın, eləcə də müxtəlif materiallardan olan yarımkeçiricilərin, və ya metal-yarımkeçirici, metal-oksüd-yarımkeçirici, metal-dielektrik-yarımkeçirici kontaktında yaranan keçid təbəqəsinə deyilir.

Elektrik keçidlərinin əsas tipləri **homo $p-n$** , eləcə də **izotip ($n-n$, $p-p$)**, **anizotip ($n-p$) hetero**, $p-i$, $n-i$, n^+-n , p^+-p və **metal-yarımkeçirici** keçidləridir.

Nəzərə almaq lazımdır ki, elektrik keçidlərini iki yarımkeçirici materialı, yaxud metalla yarımkeçiricini sadəcə mexaniki kontakta gətirməklə yaratmaq olmaz. Çünki bu hissələrin hər birinin səthi başqa maddələrin atomları, özlərinin oksidləri və s. ilə çirklənmiş olur. Buna görə də elektrik keçidlərini yaratmaq üçün müxtəlif texnoloji əməliyyatlardan istifadə edilir ki, bunların da ən geniş yayılmışları aşqarlama, əritmə, epitaksiya, ion implantasiyası üsullarıdır.

İ F Ə S İ L

ELEKTRON-DEŞİK ($p-n$) KEÇİDİ

§ 2.1. $p-n$ keçidin əmələ gəlməsi

Elektron-deşik keçidi və ya $p-n$ keçid əks tip keçiriciliyə malik iki yarımkeçiricinin kontaktındakı elektrik keçidinə deyilir. Əgər bu yarımkeçiricilər eyni materialdandırsa, belə keçid **homo $p-n$ keçid**, müxtəlif materialdandırsa – **hetero $p-n$ keçid** adlanır.

$p-n$ keçidin əmələ gəlmə mexanizminə baxaq. Fərz edək ki, eyni yarımkeçirici materialdan, lakin əks tip (p - və n - tip) keçiriciliyə malik, eyni səviyyədə ($N_D = N_A$) aşqarlanmış iki yarımkeçirici kristal aşqarların tam ionlaşdığı temperaturdan yüksək temperaturda ($T \geq T_i$) elektrik kontaktına gətirilib (şəkil 1, a). Bu o deməkdir ki, toxunma yerində (kontakt müstəvisində) bir sistem təşkil edən bu iki kristalın birindən digərinə keçdikdə kristal qəfəsin ölçüləri tərtibində heç bir təhrif hiss olunmur. Həmin hissələrdə uyğun olaraq: $n_{no} = p_{po}$; $p_{no} = n_{po}$ və $p_{no} \ll n_{no}$; $n_{po} \ll p_{po}$. Burada n_{no}, n_{po} - uyğun olaraq əsas və qeyri-əsas elektronların, p_{po}, p_{no} - isə deşiklərin konsentrasiyasıdır. Belə ($N_D = N_A$ olan) elektrik keçidi **simmetrik $p-n$ keçid** adlanır. Həmin iki əks tip keçiricilikli kristalın bir-birindən ayıran müstəviyə $p-n$ keçidin **metallurji sərhəddi** deyilir. Həqiqətdə isə belə bir kəskin sərhəddən danışmaq olmaz. Lakin əksər hallarda sadəlik üçün qəbul edilir ki, sərhəd kəskindir və hesablamalarda, eləcə də izahatlarda həmin sərhədi «X»- koordinatının başlanğıcı kimi

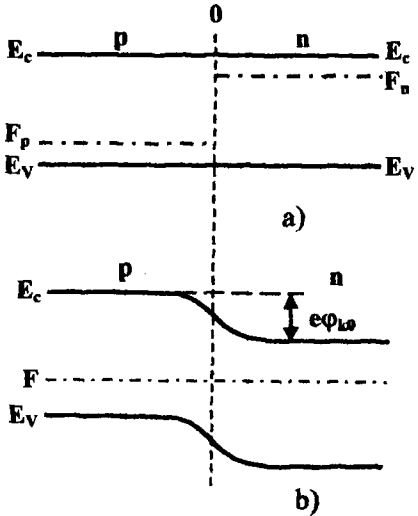
götürmək olar. Bu halda fərz edilir ki, kristal X- oxu boyunca yönəlib.

Bu sistemdə onun uzunluğu - «X» oxu boyunca elektron və deşiklərin konsentrasiyasının qradienti mövcud olduğundan həmin hissəciklərin, yəni elektron və deşiklərin, bir-birinin əksinə olan istiqamətlərdə diffuziyası baş verir. Bu diffuziya prosesində keçid müstəvisindən həm sağda, həm də solda L_D -diffuziya uzunluğundan böyük olmayan məsafədə yerləşən elektron və deşiklər iş-

tirək edir. Diffuziya olunmuş elektron və deşiklər diffuziya olunduqları həcmdə əks işarəli yüklərlə rekombinasiya olunur. Nəticədə keçid müstəvisinin hər iki tərəfində müəyyən qalınlıqdakı qatda kompensə olunmamış əks işarəli ionlar, daha doğrusu p - hissədə mənfi, n -hissədə isə müsbət həcmi yüklər yaranır.

Yaranmış bu ikiqat həcmi yüklər sərhəd yaxınlığında müəyyən E_d -daxili elektrik sahəsi yaradır və həmin elek-

trik sahəsinin qiyməti diffuziya prosesi davam etdikcə ilk anlar ərzində böyüyür. Lakin həmin sahənin təsiri altında eyni zamanda yüklərin əks istiqamətdə dreyfi də baş verir, E_d -



Şəkil 1. p - və n - tip keçiricilikli iki yarımkeçirici materialdan ibarət sistemin ilk anda (a) və xarici gərginlik olmadıqda ($U_x = 0$) p - n keçidin tarazlıq halı qərarlaşdıqdan sonrakı (b) enerji diaqramı.

sahəsinin qiyməti böyüdükcə dreyf prosesinin intensivliyi də artır. Nəhayət, elə bir an gəlir ki, bu iki proses, yəni diffuziya ilə dreyf bir-birini tarazlaşdırır. Bu andan etibarən sistemin dinamik tarazlıq halı yaranır. Belə tarazlıq halında:

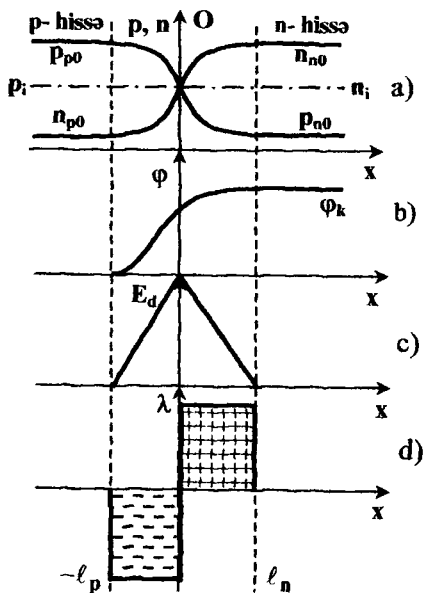
$$j_D = j_{Dp} + j_{Dn} = j_E = j_{Ep} + j_{En}; \quad j_T = j_D + j_E = 0 \quad (2.1)$$

olur. Burada j_D, j_{Dp}, j_{Dn} - tam, elektron və dəşik **diffuziya cərəyanlarının**, j_E, j_{En}, j_{Ep} - tam, elektron və dəşik **dreyf cərəyanlarının**, j_T - işə dinamik tarazlıq halında sistemdən axan yekun (tam) cərəyanın sıxlıqlarıdır.

Məlumdur ki, j_T - yekun cərəyanın sıxlığının sıfır olduğu belə tarazlıq halında baxılan p - n keçidli sistem vahid (eyni bir) F -Fermi səviyyəsi ilə xarakterizə olunmalıdır. Nəticədə, tarazlıq halında sərhəd yaxınlığında qiyməti **kontakt potensiallar fərqi**ə bərabər olan və hissəciklərin diffuziyasına

mane olan $\varphi_{k0} = \varphi_{op} - \varphi_{on}$ potensiallar fərqi yaranır (şəkil 2, b).

p - n keçidin sərhəd yaxınlığındakı oblastında yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının (a), potensialın (b), daxili sahənin



Şəkil 2. p - n keçid oblastında sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının (a), daxili sahənin potensialının (b) və intensivliyinin (c), bağlı (həcmi) yüklərin konsentrasiyasının (d) koordinatdan asılılığı

intensivliyinin (c) və bağlı yüklərin konsentrasiyasının (d) koordinatdan asılılığı şəkil 2- dəki kimi olar. Burada şaquli punktir xətlərlə məhdudlanmış və n , p , φ , E , λ - nın dəyişməsinin baş verdiyi $\ell_{p-n} = \ell_p + \ell_n$ qalınlıqlı sərhədyanı oblast (qat) $p-n$ keçidin **bağlayıcı təbəqəsi** adlanır.

Qeyd etmək lazımdır ki, $p-n$ keçidi əmələ gətirən p - və n - tip keçiricilikli yarımkəçiricilərin $p-n$ keçidin bağlayıcı təbəqəsindən kənarında qalan hissələrinin enerji diaqramı dəyişmir və **$p-n$ keçidli sistemin ballast hissəsi** adlanır. $p-n$ keçidli sistemin ballast hissələrində yarımkəçiricinin elektroneytrallığı saxlanılır və E_d daxili elektrik sahəsinin qiyməti sıfır olur.

Bağlayıcı təbəqədə isə sərbəst elektron və deşiklərin buradan getməsi nəticəsində elektroneytrallıq pozulur. Bu təbəqədə akseptor və donor atomlarının tərpənməz ionları yaranır. Bağlayıcı təbəqədə sərbəst yükdaşıyıcılar olmadığından bu təbəqənin R_{p-n} müqaviməti baxılan yarımkəçirici sistemin ℓ_{p-n} -dən kənarında qalan hissələrinin R_b - **ballast müqavimətindən** çox-çox böyük olur ($R_{p-n} \gg R_b$). Əsl həqiqətdə belə olmasa da, **ideal $p-n$ keçid** üçün belə olduğunu, yəni bağlayıcı təbəqədə sərbəst yükdaşıyıcıların heç olmadığını qəbul etmək mümkündür və belə sadə hal üçün $p-n$ keçidin əsas fiziki kəmiyyətlərini hesablamaq olar.

§ 2.2. $p-n$ keçidin potensial çəpərinin hündürlüyü və $p-n$ keçidin eni

$p-n$ keçidin potensial çəpərinin hündürlüyü ($\varphi_{K0} = \varphi_{op} - \varphi_{on}$) onu təşkil edən p - və n - tip keçiricilikli yarımkəçiricilər arasındakı kontakt potensiallar fərqi ilə bərabərdir.

Yarımkəçirici materiallarda elektronların çıxış işi uyğun Fermi səviyyəsindən (F_n və F_p) hesablandığından:

$$e\varphi_{K0} = \varepsilon_{Fn} - \varepsilon_{Fp} \quad (2.2)$$

Digər tərəfdən isə bərk cisimlər fizikasıdan məlumdur ki:

$$\varepsilon_{Fn} = \varepsilon_c - kT \ln \frac{N_c}{N_D} ; \varepsilon_{Fp} = \varepsilon_v + kT \ln \frac{N_g}{N_A} \text{ və } \varepsilon_g = \varepsilon_c - \varepsilon_v$$

ε_{Fn} və ε_{Fp} - nin bu ifadələrini p - n keçidin potensial çəpərinin hündürlüyünün ifadəsində nəzərə aldıqda:

$$e\varphi_{K0} = \varepsilon_{Fp} - \varepsilon_{Fn} = \varepsilon_c - \varepsilon_v - kT \ln \frac{N_v N_c}{N_A N_D} \quad (2.3)$$

və

$$N_v N_c = n_i^2 \exp\left(\frac{\varepsilon_g}{kT}\right) \quad (2.4)$$

olduğundan:

$$e\varphi_{K0} = kT \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.5)$$

olar. Lakin baxılan sistemdə $N_A = p_{po}$, $N_D = n_{no}$ və yarımkəçiricidə verilmiş temperaturda $n_i^2 = n_{no} p_{no} = p_{po} n_{po}$. Buna görə də p - n keçidin potensial çəpərinin hündürlüyü üçün:

$$e\varphi_{K0} = kT \ln \frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} \rightarrow e\varphi_{K0} = kT \ln \frac{p_{po}}{p_{no}} = kT \ln \frac{n_{no}}{p_{po}} \quad (2.6)$$

ifadələrini yazmaq olar.

$p-n$ keçid üçün yazılmış Puasson tənliyindən keçiddəki E_d -daxili elektrik sahəsinin intensivliyi üçün:

$$\ell_p \leq x < 0 \text{ oblastında } E_K(x) = -\frac{eN_A}{\varepsilon\varepsilon_0}(\ell_p + x);$$

$$0 < x \leq \ell_n \text{ oblastında } E_K(x) = -\frac{eN_A}{\varepsilon\varepsilon_0}(\ell_n - x);$$

$$x = 0 \text{ qiymətində isə } E_K(\text{max}) = \frac{eN_A\ell_p}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{eN_D\ell_n}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

ifadələrini yazmaq olar.

$p-n$ keçid üçün Puasson tənliyini ikiqat inteqrallamaqla isə $p-n$ keçidin potensial çəpərinin hündürlüyünün qiyməti üçün:

$$\varphi_{K0} = -\frac{1}{2} E_K(\text{max})(\ell_p + \ell_n)$$

alınar. Buradan da $(\ell_p + \ell_n) = \ell_{p-n}$ olduğunu nəzərə almaqla

$$\ell_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{K0}}{e} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \right)} \quad (2.7)$$

ifadəsini yazmaq olar.

Bu sonuncu, ifadə əsasında aparılmış sadə hesablamalardan silisium (Si) və germanium (Ge) kimi ən geniş tətbiq tapmış yarımkəçiricilər əsasında hazırlanan $p-n$ keçidlərin qalınlığı üçün orta səviyyəli aşqarlanmalarda $\ell_{p-n} = 10^{-5} \div 10^{-4}$ m ($0,1 \div 1$ mkm) qiymətləri alınır.

Qeyd etmək lazımdır ki, bu deyilənlər xarici elektrik sahəsi təsir etməyən ($U_x = 0$) simmetrik $p-n$ keçidlər üçündür.

**BDU-nün
Elmi kitabxanası**

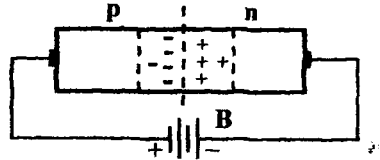
§ 2.3. p - n keçidə xarici elektrik sahəsinin təsiri

p - n keçidə xarici elektrik sahəsi ($U_x \neq 0$ xarici gərginlik) təsir etdikdə (şəkil 3), iki hal ola bilər – **düzünə** və **əksinə** (yaxud da **açıq** və **bağlayıcı**) **istiqamətdəki** hallar.

Xarici gərginliyin müsbət qütübünün p - n keçidin p - hissəsinə qoşulduğu, yəni xarici gərginliklə kontakt potensiallar fərqi-nin işarələri bir-birinin əksinə yönəldiyi hal **açıq** və ya **düzünə** **istiqamət** adlanır.

Xarici gərginliyin müsbət qütübünün p - n keçidin n - hissəsinə qoşulduğu hal isə **bağlayıcı** və ya **əksinə** **istiqamət** adlanır.

Fərz edək ki, p - n keçidə düzünə istiqamətdə müəyyən U_x - xarici gərginlik təsir edir və bağlayıcı təbəqənin (p - n keçidin) R_{p-n} - müqaviməti sistemin bağlayıcı təbəqədən kənarında qalan hissəsinin R_b - müqavimətindən çox-çox böyükdür ($R_{p-n} \gg R_b$). Artıq deyildiyi kimi, bu hissə p - n keçidli sistemin ballast hissəsi, onun müqaviməti isə p - n keçidli sistemin ballast müqaviməti adlanır. $R_{p-n} \gg R_b$ olduğuna görə tətbiq edilən xarici gərginlik demək olar ki, tamamilə p - n keçiddə düşür ($U_x \approx U_{p-n}$). Ona görə də xarici gərginliyin təsiri altında p - n keçiddəki potensial çəpərin hündürlüyü $\varphi_k = \varphi_{k0} - U_x$ qiymətinə qədər azalır (şəkil 4, a). Bu zaman keçidin tarazlığı pozulur, yəni $j_D > j_E$ olur. Nəticədə, dəşiklərin p - hissədən n - hissəyə, elektronların isə əksinə istiqamətdə (n - hissədən p - hissəyə) diffuziya hərəkəti hesabı-



Şəkil 3. Düzünə istiqamətdə yönəlmiş xarici elektrik sahəsində ($U_x \neq 0$) p - n keçidin dövrəyə qoşulma sxemi

na $p-n$ keçiddən sıfırdan fərqli ($j_T^d \neq 0$) yekun cərəyan axar. Başqa sözlə, düzünə istiqamətdə xarici gərginlik ($U_x > 0$) təsir etdikdə $p-n$ keçiddən yükdaşıyıcıların qeyri-əsas olduqları hissəyə diffuziya hərəkəti baş verir. Bu proses **qeyri-əsas yükdaşıyıcıların injeksiyası** adlanır.

$U_x > 0$ gərginliyinin təsiri altında $p-n$ keçidin potensial çəpərinin hündürlüyü, keçiddəki E_d - daxili elektrik sahəsinin qiyməti, eləcə də bağlayıcı təbəqənin ℓ_{p-n} - eni kiçilər və:

$$\ell_{p-n}^d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_{k0} - U_x)}{e} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \right)} \quad (2.8)$$

olar.

Bu halda injeksiya olunmuş qeyri-əsas yükdaşıyıcıların $p-n$ keçidin sərhədlərindəki konsentrasiyası xarici gərginlikdən asılı olaraq:

$$p_n = p_{no} e^{\frac{eU_x}{kT}} \quad \text{və} \quad n_p = n_{po} e^{\frac{eU_x}{kT}} \quad (2.9)$$

şəklində eksponensial qanunla artar.

İnjesiya olunmuş yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının nisbi dəyişməsinə qiymətləndirmək üçün **injeksiya səviyyəsi** adlanan və:

$$\delta = \frac{\Delta p_n}{n_{no}} = \frac{\Delta n_p}{p_{po}}, \quad (2.10)$$

ifadəsi ilə təyin olunan kəmiyyətdən istifadə edilir. Burada Δp_n və Δn_p injeksiya olunmuş qeyri-əsas yükdaşıyıcıların (uyğun olaraq deşiklərin və elektronların) konsentrasiyalıdır.

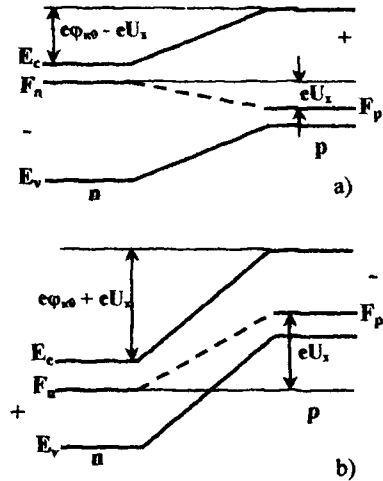
δ -kəmiyyətinin qiymətindən asılı olaraq aşağı ($\delta \ll 1$), orta ($\delta \approx 1$) və yüksək ($\delta > 1$) injeksiya səviyyələri halları mümkündür.

p - n keçidə əksinə (bağlayıcı) istiqamətdə xarici gərginlik ($U_x < 0$) tətbiq edildikdə isə onun potensial çəpərinin hündürlüyü $\varphi_k = \varphi_{k0} + |U_x|$ qiymətinə qədər artır, keçiddə tarazlıq pozulur və ondan axan difuziya cərəyanının qiyməti kiçilir, yəni $j_D < j_E$ olur (şəkil 4, b). Bu halda keçiddən qeyri-əsas yükdaşıyıcıları (elektronların və deşiklərin) dreyfi hesabına yaranan sıfırdan fərqli (j_T^2) cərəyan axar. Keçidin eni isə:

$$l_{p-n}^2 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_{k0} + |U_x|)}{e} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}} \quad (2.11)$$

olar.

Əksinə gərginliyin artması ilə bağlayıcı təbəqənin eni və E_d - daxili sahənin qiyməti böyüyür, keçiddən axan əksinə cərəyanın (j_T^2) qiyməti isə dəyişmir. Bu ondan irəli gəlir ki, keçidin sərhədləri yaxınlığında qeyri-əsas yükdaşıyıcıların



Şəkil 4. Düzünə (a) və əksinə (b) istiqamətdə təsir edən xarici elektrik sahəsində ($U_x \neq 0$) p - n keçidin enerji diaqramı

konsentrasiyasının qradienti U_x - xarici gərginlikdən asılı olaraq dəyişmiş. Əksinə, gərginliyin artması ilə yalnız mövcud olan qeyri-əsas yükdaşıyıcıların əksinə cərəyanda iştirak edən hissəsinin miqdarı dəyişir. Nəhayət, $U_x < 0$ gərginliyi elə bir qiymətə çatır ki, mövcud qeyri-əsas yükdaşıyıcıların hamısı j_T^2 - əksinə cərəyanda iştirak edir. Əksinə gərginliyin bu qiymətdən böyük qiymətlərində p - n keçiddən axan cərəyan dəyişməz bir qiymət alır. Əksinə istiqamətdə qoşulmuş p - n keçiddən axan belə cərəyana p - n keçidin **əksinə doyma cərəyanı** (I_0) deyilir. Eyni p - n keçiddə I_0 - cərəyanının qiyməti yalnız temperaturun dəyişməsi ilə dəyişir.

§ 2.4. İdeal p - n keçidin volt-ampere xarakteristikası

p - n keçiddən axan cərəyanın keçidə tətbiq olunan xarici U_x gərginliyindən asılılığının, daha doğrusu ideal p - n keçidin volt-ampere xarakteristikasının analitik şəklə (ifadəsi) ilk dəfə hələ keçən (XX) əsrin əllinci illərində Şokli tərəfindən müəyyənləşdirilmişdir. Ona görə də bu ifadə çox vaxt p - n keçid üçün Şokli düsturu və uyğun nəzəriyyə isə ideallaşdırılmış p - n keçid üçün Şokli nəzəriyyəsi adlandırılır.

İdeallaşdırılmış p - n keçid dedikdə bir sıra şərtləri ödəyən p - n keçid nəzərdə tutulur. Daha doğrusu, fərz edilir ki:

1) p - n keçidin həcmi yüklər oblastındakı aşqar atomlarının hamısı ionlaşmış;

2) p - n keçidin həcmi yüklər oblastında sərbəst yükdaşıyıcıların generasiyası prosesi baş vermir ($G_n, G_p = 0$, burada G_n və G_p elektron və deşiklərin generasiya əmsallarıdır);

3) $p-n$ keçidin eninə ölçüləri elədir ki, keçidə səth effektlərinin təsiri yoxdur;

4) $p-n$ keçidin qalınlığı çox-çox kiçikdir ($\ell_{p-n} \rightarrow 0$);

5) Baxılan sistemin ballast hissələrinin (R_b) və cərəyan kontaktlarının (R_K) müqavimətləri keçidin özünün R_{p-n} - müqavimətindən çox-çox kiçikdir ($R_b, R_K \ll R_{p-n}$). Ona görə də tətbiq olunan U_x - xarici gərginlik tamamilə $p-n$ keçiddə düşür ($U_x = U_{p-n}$);

6) $p-n$ keçidin həcmi yüklər oblastında sərbəst yükdaşıyıcıların rekombinasiyası baş vermir ($r_e, r_p = 0$, burada r_e və r_p - uyğun olaraq elektron və deşiklərin rekombinasiya əmsallarıdır);

7) Cərəyan kontaktları $p-n$ keçiddən elə uzaqlıqdadır ki, onlarda baş verən proseslər $p-n$ keçidə heç bir təsir göstərmir;

8) Cərəyan kontaktlarından injeksiyanın səviyyəsi çox-çox aşağıdır.

Bu şərtlər (fərziyyələr) daxilində $p-n$ keçidli sistemin istənilən en kəsiyi üçün doğru olan **cərəyanın kəsilməzliyi tənliyini**:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} - p \mu_p \frac{\partial E}{\partial x} \\ \frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + n \mu_n \frac{\partial E}{\partial x} \end{cases} \quad (2.12)$$

yazıb, onu $x = 0$; $x = \ell_n$; $x = -\ell_p$ sərhəd şərtləri daxilində həll etdikdə $p-n$ keçidin VAX-ı üçün $\ell_n \gg L_p$; $\ell_p \gg L_n$ olan hal üçün (burada L_n və L_p - uyğun olaraq elektronların və de-

şiklərin diffuziya məsafələrinin uzunluğudur):

$$I = S \cdot e \cdot \left[\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right] \left[\exp\left(\frac{eU_x}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.13)$$

$\ell_n \ll L_p$; $\ell_p \ll L_n$ olan hal üçün isə

$$I = S \cdot e \cdot \left[\frac{D_p p_{no}}{\ell_n} + \frac{D_n n_{po}}{\ell_p} \right] \left[\exp\left(\frac{eU_x}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

ifadəsini almaq olar. Bu ifadədə S - keçidin en kəsiyinin sahəsi, e - elektronun yükü, D_n, D_p - uyğun olaraq elektron və deşiklərin diffuziya əmsalları, μ_n, μ_p - isə yürüklüdür.

$\ell_n \gg L_p$; $\ell_p \gg L_n$ olduqda:

$$I_0 = S \cdot e \cdot \left[\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right], \quad (2.15)$$

$\ell_n \leq L_p$; $\ell_p \leq L_n$ olduqda isə

$$I_0 = S \cdot e \cdot \left[\frac{D_p p_{no}}{\ell_n} + \frac{D_n n_{po}}{\ell_p} \right] \quad (2.16)$$

ifadəsi ilə təyin olunan I_0 kəmiyyəti **p - n keçidin doyma cərəyanı adlanır.**

Göründüyü kimi, bu cərəyan keçidə tətbiq olunan xarici gərginlikdən asılı olmayıb, yalnız p - n keçidin hazırlandığı yarımkeçirici material, keçidin ölçüləri və temperatur ilə təyin olunur. Ona görə də p - n keçidin VAX-1 daha sadə şəkildə:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU_x}{kT}} - 1 \right) \quad (2.17)$$

ifadəsi ilə təsvir oluna bilər. Bu ifadədən görünür ki, $U_x > 0$ qiymətlərində (düzünə istiqamətdə) VAX-ın eksponensial həddi:

$$\exp\left(\frac{eU_x}{kT}\right) \gg 1 \quad (2.18)$$

və p - n keçiddən axan düzünə cərəyan (I_d):

$$I_d = I_0 e^{\frac{eU_x}{kT}}, \quad (2.19)$$

yəni (I_d) düzünə cərəyan keçidə tətbiq olunan xarici gərginlikdən eksponensial şəkildə asılıdır.

Əksinə istiqamətdə ($U_x < 0$) isə:

$$\exp\left(\frac{eU_x}{kT}\right) \ll 1 \quad (2.20)$$

və p - n keçiddən axan əksinə cərəyan (I_a):

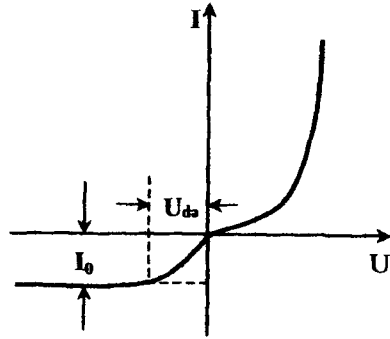
$$I_a = -I_0 \quad (2.20 a)$$

Bütün deyilənlərə əsasən ideal p - n keçidin VAX-ın qrafiki təsviri şəkil 5- dəki kimi olar.

Qeyd etmək lazımdır ki, $U_x > 0$ və $U_x < 0$ qiymətlərində (düzünə və əksinə istiqamətlərdə) bu qrafikin gərginlik oxunda miqyaslar eyni deyil- ~ 10 və ya ~ 100 dəfələrlə fərqlənir. Belə ki, düzünə istiqamətdə işçi oblast cəmi bir neçə

volta uyğun gəlidiyi halda, əksinə istiqamətdə 10 və 100 voltlarla məhdudlanır.

Əksinə istiqamətin başlanğıc hissəsində cərəyanın kiçik artımı artıq deyildi kimi əksinə gərginliyin sıfırdan U_{da} - qiymətinə qədər artması ilə qeyri-əsas sərbəst yükdaşıyıcıların daha çox hissəsinin cərəyana səfərbər edilməsi ilə əlaqədardır.



Şəkil 5. İdeal $p-n$ keçidin volt-ampere xarakteristikası

§ 2.5. $p-n$ keçidin növləri

$p-n$ keçidləri öz əlamətlərinə görə simmetrik, qeyri-simmetrik, kəskin, tədrici, nöqtəvi, müstəvi, birtərəfli və s. kimi müxtəlif növlərə ayırırlar.

Ən sadə və nəzəriyyəsi ətraflı öyrənilmiş $p-n$ keçidlər – ideallaşdırılmış **simmetrik kəskin $p-n$ keçidlərdir** (şəkil 7, a). Belə $p-n$ keçidlərdə $n_n = p_p$; $N_D = N_A$; $p_n = n_p$. Başqa sözlə, bu cür $p-n$ keçidlərdə aşqarların öz tip və konsentrasiyalarına görə dəyişməsinin baş verdiyi oblastın Δx qalınlığı çox-çox kiçik olur ($\Delta x \rightarrow 0$). Qeyd etmək lazımdır ki, real $p-n$ keçidlərdə isə həmişə Δx - sıfırdan fərqlidir ($\Delta x > 0$) və real $p-n$ keçid o halda kəskin $p-n$ keçid adlanır ki, burada Δx keçidin həcmi yüklər oblastının qalınlığından, yəni bağlayıcı təbəqəsinin ℓ_{p-n} - enindən çox-çox kiçik olsun ($\Delta x \ll \ell_{p-n}$). Əgər