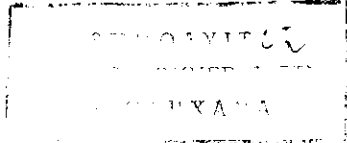


Ə.Ş.ABDİNOV, H.M.MƏMMƏDOV

**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

15564

53+621.313

A 14

22.1 я 72
A 14

Elmi redaktoru:

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

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 elektronikasi. Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti.
Bakı, «Təhsil», 2004, . 136 səh.

Kitabda fizika, elektronika, fiziki elektronika, radio-fizika, eləcə də bəzi başqa istiqamət və ixtisaslarda tədris olunan elektron cihazları, bərk cisim elektronikasi, yarımkeçirici cihazlar fənlərinin proqramlarına uyğun olaraq bərk cisimlər (yarımkeçiricilər) əsasında yaradılmış ən geniş yayılmış elektron cihazları, onların iş prinsipi, quruluşu, növləri, parametr 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 $\frac{1601000000}{053}$ 2004

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. Stabiltron.....	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 parametrləri 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 (bərəkət, 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 elektronikalari** 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 elektronikasi** 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 elektronikasi 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 lazımınca tanış edə bilmək üçün «Fiziki elektronika» istiqamətində təhsilin bakalavr pilləsinin baza tədris proqramına «Vakuüm 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.

BƏRK CİSİM ELEKTRONİKASININ ELEMENT BAZASI

§ 1.1. Yarımqeçirici cihazların təsnifatı

Bərk cisim elektronikasının element bazasını başlıca olaraq yarımqeçirici cihazlar təşkil edir. Yarımqeçirici cihaz dedikdə işçi elementi yarımqeçirici material olan və iş prinsipi məhz yarımqeçiricilərə xas elektron proseslərinə əsaslanan cihazlar nəzərdə tutulur.

İlk yarımqeçirici 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 genişlənməmişdir.

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

Çox vaxt yarımqeçirici cihazlarla aparılan işi asanlaşdırmaq, müəyyən sistemli şəkə 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, yarımqeçirici cihazlar işçi materialına görə – germanium, silisium, selen, kadmium selen, qallium arsen və başqa yarımqeçirici materialların həcminə baş verən proseslərə əsaslanan cihazlar; quruluşuna görə – bircins və qeyri-bircins ($p-n$ keçid, hetero keçid, metal-yarımqeçirici və başqa tipli elektrik keçidləri əsasında qurulan) cihazlar; iş prinsipinə görə – fotoelektrik, maqnitoelektrik, 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 – tətbiq 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 mövzusudur.

Bir sıra başqa fiziki effektlərə əsaslanan (məsələn, pyezoelektrik effekti, Holl effekti, Zeybek 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.

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

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

Yarımkəçirici cihazın işçi həcmi onun əsas elementi olan yarımkəçirici materialın fiziki sərhədləri ilə məhdudlanır. Əsas işçi element xüsusi bir germetik örtük (korpus) daxilində yerləşdirilir və həmin örtük işçi yarımkəçirici 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 (lehimləmə, qaynaq, pərçim və s.) ona bərkidilmiş xüsusi çıxışlar vasitəsi ilə qoşulur.

Kiçik güclü yarımkəçirici 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 millimetərə çatır.

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

§ 1.2. Yarımkəçirici cihazların üstünlükləri və çatışmazlıqları

Yarımkəçirici 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 yarımkeçirici cihazların öz elektrovakuum analoglarına 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 yarımkeçirici cihazların parametr və xarakteristikaları temperaturdan və radioaktiv şüalanmaların təsirindən güclü asılı olmaqla yanaşı, zaman keçdikcə pisləşirlər (bu cihazların qocalması baş verir). Bundan əlavə yarımkeçirici cihazlarda məxsusi küy böyük, giriş müqavimətinin qiyməti isə kiçik olur. Tranzistorların faydalı gücünün kiçik olması da yarımkeçirici cihazların çatışmazlıqlarındandır.

Lakin bu qüsur və çatışmazlıqlar yarımkeçirici cihazların konstruksiya (layihə) və texnologiyasını getdikcə təkmilləşdirilməsi hesabına ya tamamilə aradan qaldırılır, ya da nisbətən zəiflədir.

§ 1.3. Elektrik keçidləri

Əksər yarımkeçirici cihazlar qeyri-bircins yarımkeçirici sistemlər – **yarımkeçirici 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-oksit-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.

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 yarımkəçiricinin kontaktındakı elektrik keçidinə deyilir. Əgər bu yarımkəçiricilər 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 yarımkəçirici materialdan, lakin əks tip (p - və n - tip) keçiriciliyə malik, eyni səviyyədə ($N_D = N_A$) aşqarlanmış iki yarımkəçirici 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: $n_{n0} = p_{p0}$;

$p_{n0} = n_{p0}$ və $p_{n0} \ll n_{n0}$; $n_{p0} \ll p_{p0}$. Burada n_{n0}, n_{p0} - uyğun olaraq əsas və qeyri-əsas elektronların, p_{p0}, p_{n0} - isə deşiklərin konsentrasiyasıdır. Belə ($N_D = N_A$ olan) elektrik keçidi **simmetrik $p-n$ keçid** adlanır. Həmin iki əks tip keçiricilikli kristalı 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.

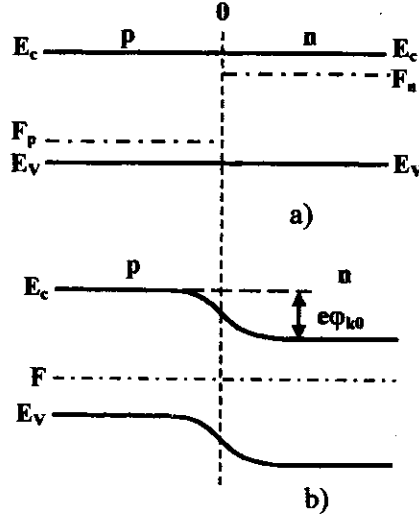
Bu sistemdə onun uzunluğu - «X» oxu boyunca elektron və deşiklərin konsentrasiyasının qradienti mövcud olduğundan həmin hissəciklərin, yəni elektron və deşiklərin, bir-birinin əksinə olan istiqamətlərdə diffuziyası baş verir. Bu diffuziya prosesində keçid müstəvisindən həm sağda, həm də solda L_D -

diffuziya uzunluğundan böyük olmayan məsafədə yerləşən elektron və deşiklər iş-

tirak 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 yarımkəçirici 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 böyükdə 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:

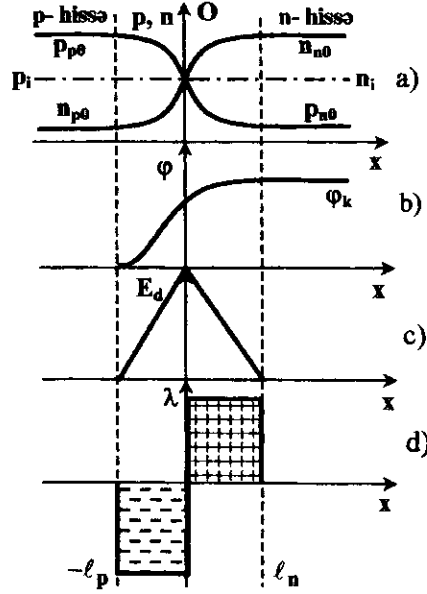
$$j_D = j_{Dp} + j_{Dn} = j_E = j_{Ep} + j_{En}; \quad j_T = j_D + j_E = 0 \quad (2.1)$$

olur. Burada j_D, j_{Dp}, j_{Dn} - tam, elektron və deşik diffuziya cərəyanlarının, j_E, j_{Ep}, j_{En} - tam, elektron və deşik dreyf cərəyanlarının, j_T - isə 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 fərqinə 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 yarımkeçiricilərin $p-n$ keçidin bağlayıcı təbəqəsindən kənarında qalan hissələrinin enerji diaqramı dəyişmir və **$p-n$ keçidli sistemin ballast hissəsi** adlanır. $p-n$ keçidli sistemin ballast hissələrində yarımkeçiricinin elektroneytrallığı saxlanılır və E_{σ} 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 yarımkeçirici 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 yarımkeçiricilər arasındakı kontakt potensiallar fərqinə 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 fizikasından məlumdur ki:

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

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:

$$\ell_p \leq x < 0 \text{ oblastında } E_K(x) = -\frac{eN_A}{\epsilon\epsilon_0}(\ell_p + x);$$

$$0 < x \leq \ell_n \text{ oblastında } E_K(x) = -\frac{eN_A}{\epsilon\epsilon_0}(\ell_n - x);$$

$$x = 0 \text{ qiymətində isə } E_K(\max) = \frac{eN_A\ell_p}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{eN_D\ell_n}{\epsilon\epsilon_0}$$

ifadələrini yazmaq olar.

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

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

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

$$\ell_{p-n} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\varphi_{K0}}{e} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \right)} \quad (2.7)$$

ifadəsini yazmaq olar.

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

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

49554 /

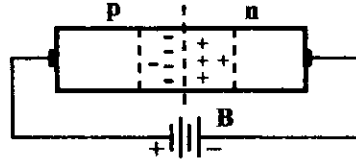
§ 2.3. p - n keçidə xarici elektrik sahəsinin təsiri

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**) **istiqlamətdəki** 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 kənar 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 $\phi_k = \phi_{k0} - U_x$ 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.

İnjeksiya 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) konsentrasiyalarıdır.

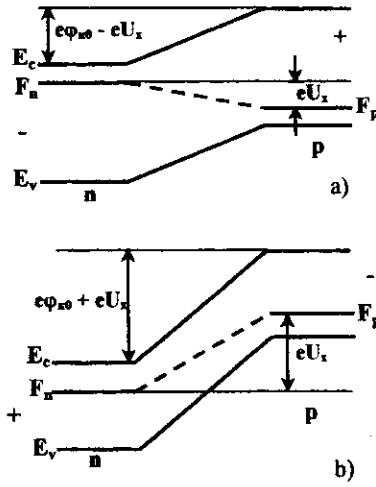
δ -kəmiyyətinin qiymətindən asılı olaraq aşağı ($\delta \ll 1$), orta ($\delta \approx 1$) və yüksək ($\delta > 1$) injeksiya səviyyələri halları mümkündür.

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 yükdaşıyıcıların (elektronların və deşiklərin) dreyfi hesabına yaranan sıfırdan fərqli (j_T^{∂}) cərəyan axar. Keçidin eni isə:

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

olar.

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



konsentrasiyasının gradienti U_x - xarici gərginlikdən asılı olaraq dəyişmir. 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-ampər xarakteristikası

$p-n$ keçiddən axan cərəyanın keçidə tətbiq olunan xarici U_x gərginliyindən asılılığının, daha doğrusu ideal $p-n$ keçidin volt-ampər xarakteristikasının analitik şəkli (ifadəsi) ilk dəfə hələ keçən (XX) əsrin əllinci illərində Şokli tərəfindən müəyyən-ləşdirilmişdir. 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 oblastındaki aşqar atomlarının hamısı ionlaşıb;

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-1 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-

şiklörin 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 gerginlikdən asılı olmayıb, yalnız p - n keçidin hazırlandığı yarımkəçirici material, keçidin ölçüləri və temperatur ilə təyin olunur. Ona görə də p - n keçidin VAX-ı 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):

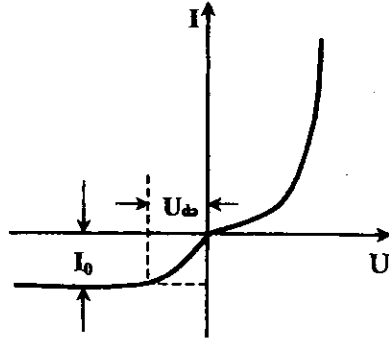
$$I_a = -I_0 \quad (2.20 a)$$

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 ki kimi əksinə gərginliyin sıfırdan U_{da} – qiymətinə qədər artması ilə qeyri-əsas sərbəst yükdaşıyıcıların daha çox hissəsinin cərəyanə 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

belə $p-n$ keçidlərdə $N_A \neq N_D$ (yaxud $p_p \neq n_n; p_n \neq n_p$) olarsa, o, **qeyri-simmetrik kəskin $p-n$ keçid** adlanır. Qeyri-simmetrik, məsələn, $N_A \gg N_D$ halında kəskin $p-n$ keçidlərin eni

$$\ell_{p-n} \approx \ell_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\varphi_{k0}}{e} \cdot \frac{1}{N_D}} \quad (2.21)$$

ifadəsi ilə təyin olunur.

Kəskin $p-n$ keçidləri bir qayda olaraq **əritmə üsulu** ilə alırlar. Bu halda müəyyən tip keçiriciliyə malik yarımkəçiricinin $p-n$ keçid yaradılmalı olan yerində ona əks tip keçiricilik verən metal əridilir. Bu proses müvafiq texnologiya əsasında aparılır.

Praktikada demək olar ki, əksər hallarda ehtə $p-n$ keçidlərdən istifadə edilir ki, onlarda Δx - qalınlığı öz qiymətinə görə həcmi yüklər oblastının ℓ_{p-n} -eni ilə müqayisə edilə biləcək olur. Belə keçidlərə **tədrici $p-n$ keçidlər** deyilir.

Tədrici $p-n$ keçidləri adətən məxsusi keçiriciliyə malik yarımkəçirici kristala onun iki qarşılıqlı əks tərəfindən (şəkil 6, b) və ya bir tərəfindən (şəkil 6, c) əks tipli (donor və akseptor) aşqar atomları, yaxud da müəyyən tip keçiriciliyə malik yarımkəçirici kristala bir üzündən əks tip keçiricilik yaradan aşqar atomları diffuziya etdirməklə yaradırlar.

Simmetrik tədrici $p-n$ keçidlərin xarici gərginlik təsir etməyən haldakı ($U_x = 0$) eni:

$$\ell_{p-n} = \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_0}{e \left(\frac{dN_A}{dx} + \frac{dN_D}{dx} \right)} \varphi_{k0}} \quad (2.22)$$

ifadəsi ilə təyin olunur. Bu ifadədən göründüyü kimi, kəskin $p-n$ keçidlərdən fərqli olaraq, tədrici $p-n$ keçidlərin eni aşqar atomlarının konsentrasiyasından (N_A və N_D -dən) deyil, konsentrasiyanın baxılan sistem boyunca dəyişmə qradientindən (dN_A/dx və dN_D/dx -dən) asılıdır. Bu halda həm də asılılıq kvadrat kök yox, kub köklə ifadə olunur.

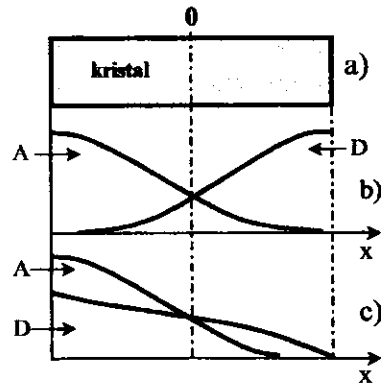
Müxtəlif dərəcədə aşqarlanmış, daha doğrusu, keçiricilik tipini təyin edən aşqar atomlarının konsentrasiyasının dəyişmə qradientləri müxtəlif

olan ($\frac{dN_A}{dx} \neq \frac{dN_D}{dx}$) ya-

rımkeçiricilərin əmələ gətirdiyi tədrici $p-n$ keçidlər isə **qeyri-simmetrik tədrici $p-n$ keçidlər** adlanır. Belə $p-n$ keçidləri əmələ gətirən p - və n - tip keçiricilikli həm əsas (p_p və n_n), həm də qeyri-əsas (n_p və p_n) yükdaşıyıcıların konsentrasiyalarının qradienti bir-birindən fərqlənir:

$$\frac{dn_n}{dx} \neq \frac{dp_p}{dx}; \frac{dn_p}{dx} \neq \frac{dp_n}{dx} \quad (2.23)$$

Həm kəskin, həm də tədrici $p-n$ keçidlərdə əgər p - və n -hissələrdəki əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyaları bir-



Şəkil 6. Kristala əks tərəfdən (b), eyni tərəfdən (c) əks xasiyyətli və bir tərəfdən əks tip keçiricilik verən aşqar atomlarının diffuziya edilməsi ilə $p-n$ keçidlərin alınmasının sxematik təsviri.

birindən bir tərtdən çox fərqlənərsə (məsələn, $p_p \gg 10n_n$), belə $p-n$ keçidlərə **bir tərəfli $p-n$ keçidlər** deyilir.

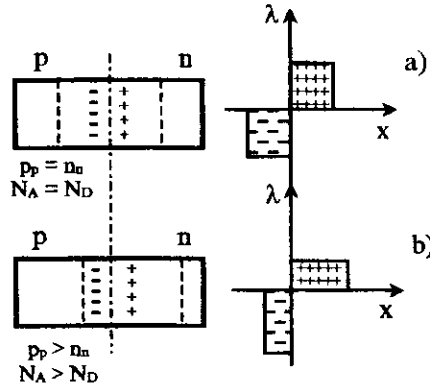
Qeyri-simmetrik $p-n$ keçidlərdə keçidin daxili elektrik sahəsi az aşqarlanmış yarımkəçirici hissəsinə daha çox nüfuz edir (şəkil 7, b). Məsələn, $N_A > N_D$ olarsa, onda $l_n > l_p$ və əksinə, $N_A < N_D$ olarsa $l_n < l_p$.

Qeyri-simmetrik təcrici $p-n$ keçidlərdə, məsələn, $N_A \gg N_D$ olduqda:

$$l_{p-n} \approx l_n \approx \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{dN_D}{dx} \varphi_{K0}} \quad (2.24)$$

Yarımkəçirici cihazlar əksər hallarda qeyri-simmetrik $p-n$ keçidlər əsasında hazırlanır. Bu halda əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının daha böyük olduğu hissə **emitter**, ikinci hissə isə **baza** adlanır.

$p-n$ keçidlər öz hündürlüyü ölçülərinə görə **nöqtəvi** və **müstəvi $p-n$ keçidlərə** ayrılır. Nöqtəvi $p-n$ keçidin eninə ölçüləri onun qalınlığı tərtibində, müstəvi $p-n$ keçidlərdə isə keçidin eninə ölçüləri, onun qalınlığından çox-çox böyük olur.



Şəkil 7. Simmetrik (a) və qeyri-simmetrik (b) $p-n$ keçidlərdə həcmi yüklərin paylanması sxematik təsviri

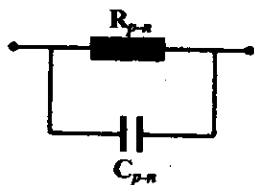
Yarımkəçirici cihazların hazırlanmasında eyni materialdan,

eyni keçiricilik tipinə malik, lakin müxtəlif dərəcədə aşqarlanmış yarımkəçiricilər, yaxud da aşqarlanmış və aşqarlanmamış (məxsusi keçiriciliyə malik) yarımkəçiricilərin kontaktında yaranan $p^+ - p$, $n^+ - n$ və $p - i$, $n - i$ tipli keçidlərdən də istifadə olunur. Burada «+» işarəsi daha çox aşqarlanmanı, «i»- isə məxsusi keçiriciliyi göstərir. Belə elektrik keçidlərində bağlayıcı təbəqə az aşqarlanmış və ya məxsusi keçiriciliyə malik yarımkəçirici hissəyə daha çox nüfuz edir.

§ 2.6. $p-n$ keçidin tutumları

Məlumdur ki, hər bir $p-n$ keçidin bağlayıcı təbəqəsində metallurji sərhəddin hər iki tərəfində hərəkətsiz (bağlı) ionlar hesabına yaranmış müsbət və mənfi həcmi yüklər, eləcə də bu hissələrin kənar sərhədində toplanmış mütəhərrik yüklər (elektron və deşiklər) vardır.

$p-n$ keçidin metallurji sərhədindən müxtəlif tərəflərdə işarəcə əks yüklərin olmasını keçidə paralel qoşulmuş müəyyən ekvivalent elektrik tutumunun mövcudluğu kimi təsəvvür etmək olar (şəkil 8). Bu tutum $p-n$ keçidin tutumu adlandırılır (C_{p-n}). Keçiddə



Şəkil 8. $p-n$ keçidin ekvivalent sxemi

və onun kənar sərhədlərində toplanmış olan həcmi yüklərin qiyməti keçidə tətbiq edilən xarici gərginlikdən asılı olaraq dəyişir. Çünki xarici gərginliyin dəyişməsi ilə həm bağlayıcı təbəqənin l_{p-n} - eni ($l_{p-n} \sim \sqrt{\varphi_{k0} \pm |U_x|}$), həm də keçidin kənar sərhədləri yaxınlığındakı injeksiya hesabına toplanmış qeyri-əsas yükdaşıyıcı

ların konsentrasiyası:

$$p_n = p_{n0} \cdot e^{\frac{eU}{kT}}; \quad n_p = n_{p0} \cdot e^{\frac{eU}{kT}} \quad (2.25)$$

ifadələrinə uyğun şəkildə dəyişir.

Ona görə də ümumi halda $p-n$ keçidin tutumu $C_{p-n} = f(U)$, yeni $p-n$ keçidə tətbiq olunan xarici gərginliyin funksiyasıdır.

Lakin bağlayıcı təbəqədə və onun hüdudlarından kənarında olan həcmi yüklərin qiyməti tətbiq edilən xarici gərginlikdən müxtəlif şəkildə asılı olduğundan, keçidin C_{p-n} - tutumunun iki komponentdən ibarət olduğu qəbul edilmişdir.

Bunlardan biri bağlayıcı təbəqədəki yüklərin dəyişməsinə xarakterizə edir və **çəpər tutumu** adlanır ($C_{çəp}$). Digəri isə injeksiya və ekstraksiya prosesləri hesabına keçidin sərhəddindəki yüklərin dəyişməsinə təsvir edir və **$p-n$ keçidin diffuziya tutumu** (C_{df}) adlanır.

Çəpər tutumunun ifadəsini müəyyənləşdirmək üçün sadə bir hala – qeyri-simmetrik ($N_A \gg N_D$) kəskin ($\Delta x < l_{p-n}$) $p-n$ keçidə baxaq. Belə keçidin eni keçidə xarici gərginlik tətbiq olunmadıqda ($U_x = 0$):

$$l_{p-n} \approx l_n \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{eN_D} \varphi_{K0}} \quad (2.26)$$

keçidə xarici gərginlik tətbiq olunduqda isə:

$$l_{p-n} \approx l_n \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_{K0} \pm |U_x|)}{eN_D}} = l_{p-n} \cdot \sqrt{\frac{\varphi_{K0} \pm |U_x|}{\varphi_{K0}}} \quad (2.27)$$

kimi təyin olunur. Çəpər tutumunu köynəklərində $Q_n \approx Q_p$ qədər elektrik yükü olan müstəvi kondensatorun tutumu kimi təsəvvür etdikdə

$$Q_n = eN_D S \ell_{p-n} \quad (2.28)$$

kimi yazmaq olar. Bu ifadədəki S - kəmiyyəti $p-n$ keçidin en kəsiyinin sahəsidir.

Q_n - yükü keçidə tətbiq olunan xarici gərginliklə mütənasib olmadığından (çünki $eN_D S$ - gərginlikdən asılı deyil, ℓ_{p-n} - isə gərginlikdən düz mütənasib yox, mürekkəb şəkildə asılıdır), yazmaq olar ki:

$$C_{\text{çəp}} = \frac{dQ}{dU} \quad (2.29)$$

Ona görə də $Q_n = eN_D S \ell_{p-n}$ ifadəsində ℓ_{p-n} - in ifadəsini nəzərə alıb, nəticəni gərginliyə görə differensialladıqda, çəpər tutumu üçün:

$$C_{\text{çəp}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\ell_{p-n}} \sqrt{\frac{\varphi_{K0}}{\varphi_{K0} + |U_x|}} \quad (2.30)$$

ifadəsi alınar. Buradan görüldüyü kimi, qeyri-simmetrik kəskin $p-n$ keçidin $C_{\text{çəp}}$ - çəpər tutumu xarici gərginliyin kvadrat

kökündən tərs mütənasib asılı olaraq dəyişir ($C_{\text{çəp}} \sim \frac{1}{\sqrt{U_x}}$).

Qeyd etmək lazımdır ki, $C_{\text{çəp}} = f(U_x)$ asılılığı keçid oblasında aşqar atomlarının konsentrasiyasının dəyişmə qanununun

dan daha güclü asılıdır. Keçid oblastında aşqar atomları konsentrasiyasının paylanması qanunu dəyişdikdə $C_{\text{çap}} = f(U_x)$ asılılığı da dərhal dəyişir. Məsələn, kəskin $p-n$ keçid üçün bu asılılıq $C_{\text{çap}} \sim \frac{1}{\sqrt{U_x}}$ şəklində olduğu halda, tədrici $p-n$ keçid

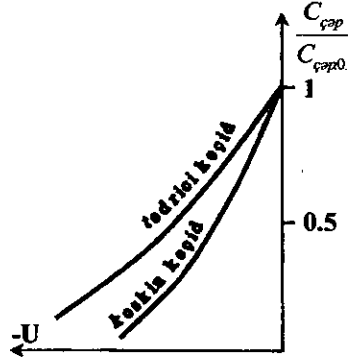
üçün $C_{\text{çap}} \sim \frac{1}{\sqrt[3]{U_x}}$ şəklinə düşür. Bu xüsusiyyətdən praktikada

$p-n$ keçidin kəskin və ya tədrici olmasını müəyyənləşdirmək üçün istifadə edilir.

$C_{\text{çap}} = f(U)$ asılılığına $p-n$ keçidin volt-farad xarakteristikası deyilir. Kəskin və tədrici $p-n$ keçidlər üçün

$\frac{C_{\text{çap}}}{C_{\text{çap}.0}} = f(U)$ asılılığı şəkil 9- da təsvir edildiyi kimi olur.

Burada $C_{\text{çap}}$ - hər hansı $U_x \neq 0$; $C_{\text{çap}.0}$ - isə $U_x = 0$ qiymətlərində $p-n$ keçidin çəpər tutumunun qiymətləridir. Şəkil 9- dan görüldüyü kimi, keçidin çəpər tutumu əksinə gərginliyin mütləq qiyməti azaldıqca artır və $U_x = 0$ halındakı qiymətinə yaxınlaşır. Xarici gərginliyin istiqaməti dəyişdikdə ($U_x > 0$ olduqda) ℓ_{p-n} - nin kiçilməsi (bağlayıcı təbəqənin eninin daralması) hesabına çəpər tutumu artır. Lakin bu halda injeksiyanın səviyyəsi də kəskin artır və nəticədə



Şəkil 9. Kəskin və tədrici $p-n$ keçid halında çəpər tutumunun əksinə gərginlikdən asılılığı (əksinə istiqamətdə qoşulmuş kəskin və tədrici $p-n$ keçidin volt-farad xarakteristikası)

diffuziya tutumu $p-n$ keçidin ümumi C_{p-n} - tutumunda daha güclü rol oynamağa başlayır.

Keçidə tətbiq olunan əksinə gərginliyin yalnız çox kiçik qiymətlərində (doyma halına çatana qədərki hissədə) əksinə istiqamətdə diffuziya tutumu müşahidə olunur və onun qiyməti çəpər tutumunun qiymətindən kiçik olur. Əksinə gərginliyin sonrakı artımında qeyri-əsas yükdaşıyıcıların paylanması qanunu praktiki olaraq dəyişməz qalır.

$p-n$ keçidin sərhədyanı oblastlarında həcmi yüklərin miqdarının ciddi şəkildə dəyişməsi yalnız sistemə düzünə istiqamətdə ($U_x > 0$) gərginlik tətbiq edildikdə baş verir. İnjeksiya səviyyəsi $\delta \geq 1$ olduqda bu yüklərin miqdarının dəyişməsi daha böyük olur.

Qeyri-əsas yükdaşıyıcıların yaratdığı ΔQ - yükünün baxılan qeyri-simmetrik kəskin $p-n$ keçid halında n - oblastdakı, yəni $x = (0 \div \omega_n)$ qalınlığındakı (burada ω_n - sistemin n - hissəsinin, yəni bazanın qalınlığıdır) artımını hesablayıb xarici gərginliyə görə differensialladıqda, $\omega_n > L_p$ halı üçün:

$$C_{df} \approx \frac{e}{kT} I \tau_p, \quad (2.31)$$

$\omega_n < L_p$ halı üçün isə:

$$C_{df} \approx \frac{e}{kT} I \frac{\omega_n^2}{2D_p}. \quad (2.32)$$

ifadələri alınar. Bu ifadələrdə e - elektronun yükü, k - Bolsman sabiti, I - keçiddən axan düzünə cərəyanın qiyməti, τ_p - qeyri-əsas yükdaşıyıcıların yaşama müddəti, D_p - isə qeyri-

əsas yükdaşıyıcıların diffuziya əmsalındır.

Bu ifadələrdən görüldüyü kimi, $p-n$ keçidin C_{df} - diffuziya tutumu keçiddən axan düzünə cərəyanla düz mütənasibdir. Düzünə cərəyanın kifayət qədər böyük qiymətlərində C_{df} - diffuziya tutumu $C_{çəp}$ - çəpər tutumundan bir neçə tərtib böyük ola bilər.

§ 2.7. $p-n$ keçidin deşilməsi

$p-n$ keçidə tətbiq olunan xarici gərginliyi heç də sonsuz artırmaq mümkün deyil. Hər iki istiqamətdə xarici gərginliyin çox böyük qiymətlərində $p-n$ keçidin xüsusiyyətlərinə güclü şəkildə təsir edə bilən müxtəlif proseslər baş verir. Düzünə istiqamətdə tətbiq olunan U_x - xarici gərginliyin hətta çox da böyük olmayan qiymətlərində $p-n$ keçiddən axan cərəyan çox-çox böyük qiymət alır, onun yaratdığı Coul istiliyi və bunun nəticəsində baş verən istilik prosesləri $p-n$ keçidi sıradan çıxarırlar.

Əks istiqamətdə baş verən proseslər isə daha maraqlı və mürəkkəbdir. Belə ki, əksinə gərginliyin çox böyük qiymətlərində $p-n$ keçiddən axan əksinə cərəyanın demək olar ki, sıçrayışla (kəskin) artması müşahidə olunur. Bu hadisəyə, yəni əksinə gərginliyin müəyyən böyük qiymətində əksinə cərəyanın kəskin artmasına **$p-n$ keçidin deşilməsi** deyilir.

Lakin $p-n$ keçidin deşilməsi hadisəsi öz-özlüyündə müxtəlif mexanizmlər üzrə baş verə bilər. Ümumiyyətlə isə, bu hadisə ya keçiddə **güclü elektrik sahəsi effektləri**, ya da böyük miqdarda Coul istiliyinin ayrılması nəticəsində baş verir.

$p-n$ keçidin əsas deşilmə mexanizmləri **sel, tunel və istilik**