

**ƏHMƏD ABDİNOV, VAQİF SƏFƏROV**

**ELEKTRON TEXNİKASININ  
MATERİALLARI VƏ  
NANOTEKNOLOGİYANIN  
ƏSASLARI**

*Ali məktəblər üçün dərslik*

*Azərbaycan Respublikası Təhsil  
Nazirliyinin 10.11.2008-ci il tarixli  
1226 №-li əmri ilə təsdiq edilmişdir.*

**«TƏHSİL»  
BAKİ – 2010**

Elmi redaktor:

**N.M.Mehdiyev,**  
*fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor*

Rəyçilər:

**A.H.Kazımcadə,**  
*fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor*

**Y.Q.Nurullayev,**  
*fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor*

621.3  
+ A14

273244

**Abdinov Ə.Ş., Səfərov V.H.**

A14 Elektron texnikasının materialları və nanotexnologiyanın əsasları (*ali məktəblər üçün dərslik*). Bakı, «Təhsil», 2010, 184 səh.

Dərslikdə elektron texnikasında istifadə edilən müxtəlif növ materialların fiziki xassələri, tətbiq sahələri və xüsusiyyətləri, eləcə də nanotexnologiya haqqında ən vacib məlumatlar verilmişdir. Kitab ali məktəblərin fizika, fiziki elektronika, elektron texnikası, radioelektronika, materialşünaslıq ixtisasları üzrə təhsil alan tələbələr (bakalavr və magistrlər) üçün nəzərdə tutulsa da, ondan ali və orta ixtisas təhsili məktəblərinin müəllimləri, elmi işçilər, aspirantlar, doktorantlar, mühəndis və laborantlar da faydalana bilər.

Dərslik 184 səhifə, 64 illüstrasiya və istinad olunan 20 adda ədəbiyyatın siyahısından ibarətdir.

A 2302030000 2010  
053



© «Təhsil», 2010

# M Ü N D Ə R İ C A T

GİRİŞ .....	5
-------------	---

## I F Ə S İ L . V A K U U M T E X N İ K A S I N I N M A T E R İ A L L A R I : M E T A L L A R V Ə Ə R İ N T İ L Ə R

§ 1.1. Vakuum texnikasında istifadə olunan materiallara qoyulan ümumi tələblər .....	7
§ 1.2. Elektrovakuum sistemlərində istifadə olunan metallar .....	8
§ 1.3. Çətin əriyən və qalvanik çıxışlar üçün istifadə olunan ərintilər .....	11
§ 1.4. Metalların şüşə və keramika ilə birləşməsi .....	12

## II F Ə S İ L . K E Ç İ R İ C İ M A T E R İ A L L A R

§ 2.1. Keçiricilər haqqında ümumi məlumat .....	14
§ 2.2. Metalların təsnifatı .....	16
§ 2.3. Metalların elektrik və istilik keçiriciliyi .....	18
§ 2.4. Metalların elektrik xassələri .....	21
§ 2.5. Metal ərintilərinin elektrik xassələri .....	24
§ 2.6. İfratkeçiricilik .....	25
§ 2.7. İfratkeçirici materiallar .....	29
§ 2.8. İfratkeçiricilərin tətbiqi .....	30
§ 2.9. Əlvan metallar .....	31
§ 2.10. Qeyri-metal keçirici materiallar .....	34

## III F Ə S İ L . D İ E L E K T R İ K L Ə R

§ 3.1. Dielektrlərin polyarlaşması .....	36
§ 3.2. Dielektrlərin elektrik keçiriciliyinin əsas növləri .....	40
§ 3.3. Qazların elektrik keçiriciliyi .....	41
§ 3.4. Maye dielektrlərin elektrik keçiriciliyi .....	43
§ 3.5. Bərk dielektrlərin elektrik keçiriciliyi .....	45
§ 3.6. Dielektrlərin elektrik möhkəmliyi və dəşilməsi .....	46
§ 3.7. Dielektrik itkisi .....	50
§ 3.8. Dielektrik materialların təsnifatı .....	52
§ 3.9. Passiv dielektrlər .....	54
§ 3.10. Kompozisiyalı tozlu plastmaslar və laylı plastiklər .....	55
§ 3.11. Elektroizolyasiya üçün istifadə olunan kompaundlar .....	57
§ 3.12. Qeyri-üzvi şüşələr .....	58
§ 3.13. Aktiv dielektrlər .....	63
§ 3.14. Elektretlər .....	76

## IV FƏSİL. YARIMKEÇİRİCİLƏR

§ 4.1. Ümumi məlumat .....	79
§ 4.2. Məxsusi və aşqar yarımkeçiricilər .....	81
§ 4.3. Sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının temperaturdan asılılığı .....	84
§ 4.4. Yarımkeçiricilərdə sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü .....	86
§ 4.5. Tarazlıqda olmayan sərbəst yükdaşıyıcılar və onların rekombinasiyası .....	87
§ 4.6. Yarımkeçiricilərdə optik udulma .....	89
§ 4.7. Fotokeçiricilik .....	94
§ 4.8. Lüminessensiya .....	96
§ 4.9. Termoelektrik hadisələri .....	97
§ 4.10. Holl effekti .....	98
§ 4.11. Güclü elektrik sahəsində yarımkeçiricilərin elektrik keçiriciliyi .....	100
§ 4.12. Qann effekti .....	101
§ 4.13. Yarımkeçirici materialların təsnifatı .....	104
§ 4.14. Germanium və onun tətbiq sahələri .....	107
§ 4.15. Silisium və onun tətbiq sahələri .....	109
§ 4.16. Karbidlər və onların tətbiq sahələri .....	112
§ 4.17. A <sup>III</sup> B <sup>V</sup> birləşmələri tipli yarımkeçiricilər .....	114
§ 4.18. Oksid yarımkeçiricilər .....	117
§ 4.19. Şüşəvari yarımkeçiricilər .....	119
§ 4.20. Üzvi yarımkeçiricilər .....	120
§ 4.21. Bərk üzvi yarımkeçiricilərin təsnifatı .....	122
§ 4.22. Yarımkeçirici materialların alınması .....	124
§ 4.23. Yarımkeçirici strukturların hazırlanması .....	126

## V FƏSİL. NANOMATERİALLAR

§ 5.1. Nanomaterialların təsnifatı .....	130
§ 5.2. Kvant çuxuru, kvant sapı və kvant nöqtəsi .....	131
§ 5.3. Nanoborucuqlar .....	138
§ 5.4. Nanoborucuqların elektrik və mexaniki xassələri .....	140
§ 5.5. Nanoborucuqların tətbiq sahələri .....	143
§ 5.6. Mexaniki möhkəmləndirmə .....	148
§ 5.7. Həcmi nanoquruluşlu materiallar .....	149
§ 5.8. Optik şüşələrdə metallik nanoklasterlər .....	151
§ 5.9. Məsaməli silisium .....	153
§ 5.10. Nanoquruluşlu kristal materiallar .....	155

## VI FƏSİL. MAQNİT MATERİALLARI

§ 6.1. Maddənin maqnitlənməsini xarakterizə edən parametrlər .....	157
§ 6.2. Maddələrin maqnit xassələri .....	158
§ 6.3. Maqnit materialların təsnifatı .....	167
§ 6.4. Böyük və hədsiz böyük maqnit müqaviməti .....	170
ƏDƏBİYYAT .....	182



*Azərbaycan Respublikasında elektron texnikası materiallarının alınması və tədqiqi sahəsində çox dəyərli işlər görmüş, bu sahədə dünya miqyasında tanınan elmi məktəb yaratmış, elmi və elmi-pedaqoji kadrların hazırlanmasına böyük əmək sərf etmiş görkəmli alim, gözəl müəllim, ləyaqətli insan, maraqlı şəxsiyyət və heç vaxt həmkarlarının, şagirdlərinin yaddaşından silinməyən, bizim isə müəllimimiz, dostumuz və həmkarımız olan fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor Qüdrət Əli oğlu Axundovun nurlu xatirəsinə həsr edirik.*

*Müəlliflər*

## GİRİŞ

Müasir texniki tərəqqinin başlıca vəzifələrindən biri də məişət və istehsalatda tətbiq olunan müxtəlif təyinatlı cihaz və qurğuların təbii proseslərin gedişinə mənfi təsir göstərmədən işləməsini təmin etməkdir. Bu cihaz və qurğuların qoyulan tələbdən yayınması təbiətdə idarə olunmayan global proseslərin baş verməsinə səbəb olur. Belə proseslərə misal olaraq, müxtəlif cihaz və qurğuların işləməsi prosesində atmosferə müxtəlif qazlar buraxılması nəticəsində Yer kürəsində hər il orta temperatur göstəricisinin yüksəlməsini, atmosferdə canlı orqanizmlər üçün çox təhlükəli olan ozon dəliklərinin yaranması nəticəsində ionlaşdırma qabiliyyəti yüksək olan şüaların maneəsiz yer ətrafına çata bilməsi təhlükəsini göstərmək olar. Belə qurğularla təbiət proseslərinin öz axınına uyğun inkişafı arasında sıx əlaqə yaratmaq üçün ekoloji cəhətdən zərərsiz qurğu və cihazların yaradılması müasir elektron texnikasının əsas problemlərindəndir. Bu problemlərin həlli isə ilk növbədə müxtəlif təyinatlı mürəkkəb proseslərin idarə olunmasını yüksək dəqiqliklə həyata keçirə bilən, ölçüləri və enerji sərfi kiçik, əməliyyatı yerinə yetirmə müddəti isə çox-çox kiçik olan müasir elektron cihaz və qurğularının hazırlanması ilə bağlıdır. İstənilən şəraitdə işləyə bilən belə cihaz və qurğuların hazırlana bilməsi isə ilk növbədə onların düzəldilməsində istifadə olunan materialların fiziki xassələrindən asılıdır.

Bu baxımdan elektron texnikasında istifadə olunan materialların təsnifatını hər hansı xarici təsirlə əlaqələndirmək başlıca amillərdən biridir.

Elektron texnikasında istifadə olunan materialların təsnifatını elektrik və maqnit sahələrinin, işıqın, radiasiyanın, deformasiyanın hər birinin ayrı-ayrılıqda, eləcə də müəyyən bir qrupunun birlikdə həmin materiallara göstərdikləri təsirə görə aparmaq olar. Mövcud maddələri maqnit sahəsinin təsirinə həssaslığına görə güclü və zəif maqnetiklərə, elektrik sahəsinin təsirinə göstərdiyi reaksiyaya görə isə keçiricilər, yarımkeçiricilər və dielektriklərə, işıq təsirinə həssaslığına görə fotokeçiricilərə və qeyri-fotohəssas materiallara, radiasiyanın təsirinə həssaslığına görə radioaktiv həssas və radioaktiv dayanıqlı, deformasiyaya həssaslığına görə tenzohəssas və tenzodayanıqlı materiallara ayırırlar.

Tətbiq sahələrindən asılı olaraq bu qruplara daxil olan materiallar bir sıra alt qrup əmələ gətirirlər. Belə alt qruplara maqnit, lüminofor, kvant elektronikasi və vakuum texnikası, optoelektronika və s. üçün materiallar daxildir.

Əsas qrupa daxil olan keçirici materiallar, onlardakı sərbəst yükdaşıyıcıları hesabına yaxşı elektrik keçiriciliyinə malikdirlər. Keçirici materiallar elektron (metallar və yarımkeçiricilər), ion (elektrolitlər) və qarışıq elektron-ion (plazma) keçiriciliyinə malik olurlar. Metalların xüsusi elektrik müqaviməti  $10^{-5}$  Om-m-dən kiçik olur. Yarımkeçiricilərin fiziki xassələri, o cümlədən elektrik keçiriciliyi onun tərkibindəki aşqarın miqdarı və kimyəvi təbiəti ilə yanaşı, həm də xarici təsirlərdən kəskin asılı olur. Bu materialların (yarımkeçiricilərin) xüsusi müqaviməti, bir qayda olaraq  $10^{-6}$ - $10^9$  Om-m aralığında dəyişir. Dielektriklər xarici elektrik sahəsində polyarlaşmaları və daxillərində elektrostatik sahənin yaranması ilə xarakterizə olunur. Dielektrik materiallar üçün xüsusi müqavimətin qiyməti  $10^9$  Om-m-dən böyük olur. Kimyəvi Elementlərin Dövri Sisteminə daxil olan 110 kimyəvi elementdən 25-i qeyri metal, 12-si isə yarımkeçirici xüsusiyyətinə malikdir. Sistemin yerdə qalan elementləri isə elektrik keçiriciliyinə görə metaldır. Elementar maddələrdən əlavə, keçirici, yarımkeçirici və dielektrik xassələrinə malik minlərlə kimyəvi birləşmələr, ərintilər və yaxud kompozisiyalar (qarışıqlar) da var. Son zamanlar nanotexnologiyanın inkişafı çoxlu sayda nanomaterialların alınması, onların təsnifatı və tətbiq dairəsinin müəyyən olunmasını tələb edir.

# I FƏSİL

## VAKUUM TEXNİKASININ MATERIALLARI: METALLAR VƏ ƏRİNTİLƏR

### § 1. Vakuum texnikasında istifadə olunan materiallara qoyulan ümumi tələblər

Vakuum – latın sözü olub, boşluq deməkdir. Vakuumun fiziki xarakteristikası olaraq buradakı qaz molekullarının sərbəst yolunun orta uzunluğunun ( $\lambda$ ) onların yerləşdiyi vakuum kamerasının (qabın) divarları arasındakı məsafəyə və ya elektrovakuumun cihazlarında elektrodlar arasındakı məsafəyə ( $d$ ) olan nisbəti götürülür. Bu iki kəmiyyətin qiymətindən asılı olaraq baxılan həcmdəki təzyiğin  $1\text{ mm Hg}$ -dən böyük olduğu aşağı ( $\lambda d \ll 1$ );  $1 \div 10^{-3}\text{ mm Hg}$  tərtibində olduğu orta ( $\lambda d \approx 1$ );  $10^{-8}\text{ mm Hg}$ -dən kiçik olduğu – ifrat yüksək vakuum anlayışlarından istifadə olunur.

İfrat yüksək vakuum  $\lambda d$  nisbəti ilə deyil, vakuumda bərk cismin səthində monomolekulyar qaz layının yaranma müddəti ( $\tau$ ) ilə təyin olunur.  $10^{-6}\text{ mm Hg}$  təzyiqdə  $\tau=1$  san olur. Digər hallarda isə  $\tau = \frac{10^{-6}}{P}$  ifadəsi ilə təyin edilir. Qeyd etmək lazım-

dır ki, bu ifadə o halda özünü doğruldur ki, hər bir qaz molekulu bərk cismin səthi ilə toqquşduqdan sonra onun səthində qalmış olsun. Beləliklə, hər bir vakuum cihazının keyfiyyəti, ilk növbədə onun hansı materialdan hazırlanması ilə təyin olunur. Bu məsələni ətraflı nəzərdən keçirək.

Keçirici materiallar vakuum cihazlarında, bir qayda olaraq aşağı təzyiqlər və yuxarı temperaturalarda istifadə edilir. Bu şəraitdə işçi temperatur ərimə temperaturu ( $T_{er}$ ) ilə deyil, materialın doymuş buxarının ( $P_d$ ) təzyiqi ilə məhdudlaşır. Verilmiş temperaturda ( $T$ ) vakuumda metalın buxarlanma intensivliyi

(I) böyük olduqca  $P_d$  də bir o qədər yüksək olur. Bu iki kəmiyyət arasında

$$P_d = k \frac{I\sqrt{T}}{M}$$

şəklində əlaqə var. Burada  $k$  –vahidlərin seçilməsindən asılı olan əmsal,  $M$ -maddənin molekulyar kütləsidir.

Metal və ərintilər buxarlanaraq vakuum cihazlarının izo-ləedici soyuq hissələrində çökür və keçirici lay yaradır. Bunun nəticəsində cihazın elementlərinin ölçüləri və elektrodlar arasındakı məsafə dəyişir. Bu da ümumilikdə cihazın parametrlərinin pisləşməsinə səbəb olur. Buna görə də vakuumba istifadə edilən metalın işçi temperaturda doymuş buxarının təzyiqi və onunla mütənasib olan buxarlanma intensivliyi kiçik olmalıdır.

Vakuum materiallarının başlıca parametrləri sırasında xətti genişlənmənin temperatur əmsalı ilə yanaşı mexaniki xassəsini xarakterizə edən sürüşmə hüdudunu da ( $G$ ) göstərmək olar.  $G$  – yüksək temperaturlarda metalda “axıcılıq” başlanmasının göstəricisidir. Həmin proses nəticəsində torların və katod spirallarının çökməsi baş verir. Metal və ərintilər qazlara qarşı kimyəvi baxımdan dayanıqlı olmalıdır. Çünki cihazların ayrı-ayrı elementlərini hazırlayarkən onlarda qazların udulması sulfid oksidlərinin və digər aşqarların yaranmasına səbəb ola bilər. Materialların əsas xarakteristikalarına xüsusi müqavimət ( $\rho$ ), müqavimətin temperatur əmsalı  $\alpha$ , və çıxış işi ( $A_{\text{çix}}$ ) də aiddir.

## § 1.2. Elektrovakuum sistemlərində istifadə olunan metallar

**Nikel (Ni).** Ərimə temperaturu  $1452^{\circ}\text{C}$  olan Ni, gümüşü – ağ rəngli metaldır. Elektrovakuum əritmə üsulu ilə təmizlik dərəcəsi 99,99% olan nikel almaq mümkündür. Nikelin  $25-600^{\circ}\text{C}$  intervalında xətti genişlənmə əmsalı  $1,55 \cdot 10^{-5}$  dər<sup>-1</sup>, xüsusi müqaviməti  $\rho=0,0683 \cdot 10^{-6}$  Om·m, müqavimətin temperatur əmsalı isə  $6,8 \cdot 10^{-1}$  K<sup>-1</sup>-dir. Manqanlaşdırılmış nikeldən gücləndirici lampaların möhkəmlənmiş torları və dolaqlar (travers) hazırla-

nır. Elektron lampalarının anodlarını hazırlamaq üçün səthində 8-15 mkm qalınlıqlı alüminumlaşdırılmış təbəqə olan nikel lentlərindən istifadə olunur. Vakuumda nikel üçün normal işçi temperatur 800°C-dir.

**Dəmir (Fe).** Dəmirin ərimə temperaturu 1535°C olub, qazlardan çox çətinliklə təmizlənilir. Elektron texnikasında, əksər hallarda tərkibində 0,05% karbon olan poladdan istifadə edilir. Dəmir kimyəvi baxımdan dayanıqlı deyil. Bununla belə, civə ilə reaksiyaya girmir. Dəmirin xətti genişlənmə əmsalı  $1,4 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ , xüsusi müqaviməti  $\rho = 9,6 \cdot 10^{-8} Om \cdot m$ , müqavimətin temperatur əmsalı isə  $5,6 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ -dir.

Alüminiumlaşdırılmış dəmir 800°C-ə qədər qızdırıla bildiyindən anod və ekranların, az karbonlu polad isə - 500°C-ə qədər civəli düzləndiricilərin və iqnitronların hazırlanmasında istifadə olunur. Ərimə temperaturunun qiymətinə görə çətin əriyən metallar aşağıdakı ardıcılıqla düzülür: Ti (titan), Zr (sirkonium), Nb (niobium), Mo (molibden), Ta (tantal), Re (renium), W (volfram).

**Titanın (Ti)** ərimə temperaturu 1725°C, xətti genişlənmə əmsalı  $1,13 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ , çıxış işi isə  $A = 4,09 eV$  –dir.

Titan 500 °C-də qazları aktiv sürətdə uda bilir. Bu metalın xüsusi müqaviməti  $\rho = 0,42 \cdot 10^{-6} Om \cdot m$ , müqavimətin temperatur əmsalı isə  $5,5 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ -dir.

Titan məftildən düzəldilmiş spirallar, eləcə də titan örtüklü anod və torlar yüksək qaz uduculuğuna və istilik şüalanmasına malikdir.

**Sirkoniumun (Zr)** ərimə temperaturu 1845°C, xətti genişlənmə əmsalı  $8,4 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ , çıxış işi  $A = 3,8 eV$ , xüsusi müqaviməti  $\rho = 0,4 \cdot 10^{-6} Om \cdot m$ , müqavimətinin temperatur əmsalı isə  $4,6 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ -dir. Bu metal 700°C -də oksigen və azotu yaxşı udur, hidrogeni isə yalnız 800°C-dən yuxarı temperaturda udmağa başlayır.

**Niobiumun (Nb)** Xüsusi müqaviməti  $0,18 \cdot 10^{-6} Om \cdot m$ , çıxış işi 3,96 eV, müqavimətin temperatur əmsalı isə  $3 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ -ə

bərabərdir. Niobium yüksək plastikliyə malik olduğundan ondan nazik folqa və məfillərin, bir sıra lampalarda anod və ekranların, eləcə də güclü generator lampalarında katodların hazırlanmasında istifadə olunur. Bu materialların maksimal işçi temperaturu  $2100^{\circ}\text{C}$ -dir.

**Molibdenin (Mo)** ərimə temperaturu  $2622^{\circ}\text{C}$ , xətti genişlənmə əmsalı  $5,4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , çıxış işi  $4,27 \text{ eV}$ , xüsusi müqaviməti  $0,048 \cdot 10^{-6} \text{ Om}\cdot\text{m}$ , müqavimətinin temperatur əmsalı  $4,79 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ -dir. Gümüşü-ağ rəngə malik olan bu metalın yüksək temperaturda sərtliyə və möhkəmliyə malik olması ondan geniş miqyasda istifadə etməyə imkan verir. O, işçi temperaturu  $1000\text{-}1700^{\circ}\text{C}$  olan generator və gücləndirici lampaların anod və torlarının hazırlanmasında da istifadə edilir. Maqnetron və qazla doldurulmuş cihazlarda oturacaq lövhəsi və çətin əriyən şüşələrin üzərindəki qalvanik çıxışlar molibdendən hazırlanır. Molibdenin maksimal işçi temperaturu  $1700^{\circ}\text{C}$ -dir.

**Tantal (Ta)** öz fiziki və kimyəvi xassələrinə görə niobiuma oxşayır. Ərimə temperaturu  $3000^{\circ}\text{C}$  olan bu metalın xətti genişlənmə əmsalı  $8,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , xüsusi müqaviməti  $0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Om}\cdot\text{m}$ , müqavimətin temperatur əmsalı  $5,5 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , çıxış işi  $4,1 \text{ eV}$ -dir. Vakuumda çox kiçik buxarlanma intensivliyinə,  $1800^{\circ}\text{C}$  temperaturda isə yüksək qaz uduculuğuna malikdir. Bunun üçün də digər qazuduculardan istifadə etmədən tantandan generatorlarda, eləcə də lampalarda anod və torların hazırlanmasında istifadə olunur. Bu metaldan, həmçinin dolaylı yolla qızdırılmış katodların hazırlanmasında istifadə edilir.

**Reniumun (Re)** ərimə temperaturu  $3177^{\circ}\text{C}$ , xətti genişlənmə əmsalı  $0,68 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$ , xüsusi müqaviməti  $0,21 \cdot 10^{-6} \text{ Om}\cdot\text{m}$ , müqavimətinin temperatur əmsalı  $1,73 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , çıxış işi  $4,8 \text{ eV}$ -dir. Bununla yanaşı, yüksək möhkəmliyə, xüsusi elektrik müqavimətinə və buxarlanma intensivliyinə malik olan reniumdan, həm də birbaşa qızdırılan katodların və katod qızdırıcılarının hazırlanmasında istifadə edilir.

**Volfram (W)** ərimə temperaturu  $3395^{\circ}\text{C}$ , xətti genişlənmə əmsalı  $0,44 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$ , xüsusi müqaviməti  $0,055 \cdot 10^{-6} \text{ Om}\cdot\text{m}$ ,

müqavimətinin temperatur əmsalı  $4,8 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , çıxış işi 4,54 eV-dır. Maksimal işçi temperaturu  $2500^\circ\text{C}$  olan volfram çox kiçik buxarlanma intensivliyinə və xətti genişlənmə əmsalına malikdir. Ondan generatorların və yüksəkvoltlu düzləndiricilərin lampalarında bilavasitə qızdırılan katodların, həm də rentgen və maqnetron katodlarının hazırlanmasında istifadə edilir.

### § 1.3. Çətin əriyən və qalvanik çıxışlar üçün istifadə olunan ərintilər

Elektrovakuum cihazlarında § 2-də adları çəkilən metallarla yanaşı, onların əsasında hazırlanmış müxtəlif ərintilərdən də istifadə olunur. Bu ərintilər göstərilən materiallardan, daha da yüksək möhkəmliyə və xüsusi müqavimətə malik olması ilə fərqlənir. Bir sıra hallarda ərintilər daha yaxşı emal olunur. Məsələn, müəyyən tərkibli molibdenli ərinti kifayət qədər bərk və möhkəm olub, təmiz molibdendən kəskin fərqlənir. Molibdenin reniumla (35%) ərintisinin bərkliyi təmiz molibdenlə müqayisədə 3 dəfə böyük olub, öz keyfiyyətini  $1600^\circ\text{C}$ -ə qədər saxlayır və onu daha asanlıqla ştamplamaq olur. Molibdenin volframla (50%) ərintisi yüksək ərimə temperaturuna ( $2900^\circ\text{C}$ ) malik olub, daha böyük mexaniki möhkəmlik və xüsusi müqavimətlə ( $1,2 \cdot 10^{-7} \text{Om}\cdot\text{m}$ ) xarakterizə olunur. Belə ərintilərdən katodların qızdırıcılarını hazırlamaq üçün istifadə edilir. Mo-Fe-Ni ərintisi  $1400^\circ\text{C}$  ərimə temperaturuna malik olub, tərkibindəki metallarla müqayisədə daha böyük mexaniki möhkəmliyə malikdir. Bu ərintidən hazırlanmış məftildən elektrovakuum lampalarının torlarının və dolaqlarının (travers) düzəldilməsində istifadə olunur.

Elektrovakuum cihazlarında, bir qayda olaraq elə ərintilərdən istifadə edilir ki, onların xətti genişlənmə əmsalı şüşə və keramikanın işçi rejimdəki xətti genişlənmə əmsalına mümkün qədər yaxın olsun. Bundan əlavə, həmin ərintilər, həm də yüksək mexaniki möhkəmliyə, ərimə temperaturuna və kiçik xüsusi müqavimətə malik olmalıdır.

**Dəmir-nikel-xrom ərintisi** 42% Ni ,6% Gr, 52-47% Fe komponentlərindən ibarət olur. Onun ərimə temperaturu  $1400^{\circ}\text{C}$ , xətti genişlənmə əmsalı  $9,1 \cdot 10^{-6} \text{ dər}^{-1}$ , xüsusi müqaviməti isə  $9 \cdot 10^{-7} \text{ Om} \cdot \text{m}$ -ə bərabərdir. Bu ərinti maqnetiklərə aid olub kiçik Küri ( $\theta=260^{\circ}\text{C}$ ) temperaturuna malikdir.

**Kobaltlı (Ni 30%, Ge 8%, Co 25%, Fe 37%) ərinti** üçün Küri temperaturu  $380^{\circ}\text{C}$ -dir. Bu ərintidən tez əriyən şüşələrdə cərəyan çıxışlarının hazırlanmasında istifadə olunur. 29% Ni, 18% Co və 53% Fe-dan təşkil olunmuş ərinti kovar adlanır. Bu ərintidən şüşə və keramikalarda cərəyan çıxışlarının hazırlanmasında istifadə olunur.

Elektrovakuum cihazlarında istifadə edilən lehimlərə qoyulan bir sıra ümumi tələblərlə yanaşı, həm də onların ərimə temperaturu sorma zamanı baş verən qızma temperaturundan ən azı  $100^{\circ}\text{C}$  yüksək olmalıdır. Qızma temperaturunda ( $500 \div 700^{\circ}\text{C}$ ) buxarın təzyiqi  $10^{-7} \text{ mm Hg}$ -dən böyük olmamalıdır. Adətən elektrovakuum cihazlarında orta ( $500 \div 700^{\circ}\text{C}$ ), yüksək ( $1150 \div 1850^{\circ}\text{C}$ ) ərimə temperaturuna malik olan və çətin əriyən ( $t_{\text{er}} > 1850^{\circ}\text{C}$ ) lehimdən istifadə olunur. Oksid və flyusun qalığı vakuum aralığını çirkləndirdiyindən elektrovakuum texnikasında lehimlənmələr qaz (arqon) mühitində və ya  $10^{-3} \text{ mm Hg}$ -dən aşağı olmayan vakuumda flyüssus aparılır.

#### **§ 1.4. Metalların şüşə və keramika ilə birləşməsi**

Vakuum texnikasında metal və şüşə hissələri arasında rabitə, bu iki materialın aralığında oksid təbəqəsinin həll olması hesabına yaradılır. Bu zaman həmin hissələrin arasında keçid zonası əmələ gəlir və burada kəsilməz olaraq həll olan oksidin konsentrasiyası dəyişir. İstifadə edilən metal və şüşənin xətti genişlənmə əmsalları bir-birinə  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ -yə qədər yaxın olmalıdır.

Kovar və borsilikatlı şüşənin birləşməsi  $1000-1080^{\circ}\text{C}$ -də baş verir. Kovarın tərkibindən asılı olaraq molibdenli və volframli şüşələrdən istifadə olunur. Bu zaman istifadə edilən lehi-



min tərkibi 96%-sirkonium, 3%-volfram və 1% titandan ibarət götürülür. Bu ərinti yaxşı işlənir, uzadılmaya və ştamplanmaya imkan verir.

Elektrovakuum cihazlarının düzəldilməsində keramika ilə metalların birləşməsində tərkibində 75-85%  $AlO_3$  olan gil-torpaq keramikadan istifadə edilir. Son zamanlar bu məqsədlə beriliumlu keramikadan da istifadə olunur. İstifadə edilən ərintinin xətti genişlənmə əmsalı keramikanınkindən böyük olan halda elə konstruksiya seçilir ki, baxılan detalın keramika hissəsini əhatə etsin. Ümumiyyətlə, çalışılır ki, hər iki materialın xətti genişlənmə əmsalı uzlaşsın. Birləşmənin lehimlənməsi iki mərhələdə aparılır. Birinci mərhələdə keramikanın səthi əvvəlcə tərkibində 80% molibden və 20% manqan olan toz qarışığı ilə örtülür, sonra isə 3:1 nisbətində qarışdırılmış azot-hidrogen atmosferində 1300-1600°C-ə qədər qızdırılır.

İkinci mərhələdə hidrogen və ya azot-hidrogen mühitində mis-gümüş, mis-qızıl və nikel-qızıl tərkibli lehim materialından istifadə etməklə lehimləmə əməliyyatı həyata keçirilir. Bu zaman lehimləmə üçün misdən, dəmir-nikel və ya dəmir-nikel-kobalt ərintilərindən hazırlanmış detallardan istifadə edilir.

## II FƏSİL

### KEÇİRİCİ MATERIALLAR

#### § 2.1. Keçiricilər haqqında ümumi məlumat

Elektrik cərəyanını keçirən materiallar bərk, maye və xüsusi şəraitdə qaz halında ola bilər. Keçirici bərk cisimlərə metallar, metal ərintiləri və karbonun bəzi modifikasiyaları aiddir.

Metal-istiliyi və elektrik cərəyanını yaxşı keçirən, xüsusi parlaqlığa, plastikliyə və kristal quruluşuna malik bərk cisimdir. Kristal cisimlərin anizotropiya xassəsi metallara xas deyil. Ərimiş metal soyuduqda onun həcmində çoxlu sayda elementar kristalciqlar əmələ gələrək, kristallitlərə çevrilir. Bunlar isə öz növbəsində müxtəlif istiqamətdə böyüyərək bir-biri ilə birləşir və düzgün olmayan quruluşa çevrilir. Kristallitlər öz xassələrinə görə izotrop cisimlərə daha yaxın olur. Metalların yüksək elektrik və istilik keçiriciliyinə malik olmasına səbəb, onlarda atomlara aid olmayan çoxlu sayda sərbəst elektronların mövcudluğudur. Elektrik sahəsi olmadıqda metallarda bu elektronların bütün istiqamətlərdəki istilik hərəkəti eyni ehtimalla malikdir. Xarici elektrik sahəsinin təsiri altında elektronların hərəkətində nizamlı hərəkət (dreyf hərəkəti) üstünlük təşkil etməyə başlayır. Bu istiqamətdəki elektronların sürəti çox da böyük olmur ki, bunun da səbəbi qəfəsin düyünlərindəki ionlardan və müxtəlif defektlərdən sərbəst elektronların səpilməsidir. Səpilmənin dərəcəsi qəfəsdə olan defektlərin artması ilə çoxalır. Məsəl üçün, misdə kiçik miqdarda marqans və ya silisiumun olması onun elektrik keçiriciliyini kəskin azaldır. Metal və ərintilərin elektrik keçiriciliyinin azalmasına ikinci səbəb, onların pərçimlənməyə (sıxlaşmağa) məruz qalmasıdır. Bərk halda dartılmış naqıl, yumşaq halda düzəldilmiş naqilə nisbətən daha kiçik keçiriciliyə malikdir. Metalın bərkiməsi zamanı kristallaşma prosesi baş verir ki, bu da keçiriciliyin artmasına səbəb olur.

Kristal qəfəsin bu prosesdə özünün düzgün formasını alması keçiriciliyin əvvəlki qiymətinə çatmasına səbəb olur.

Bəzi hallarda kiçik keçiriciliyə malik olan materialların alınması lazım gəlir. Bu məqsədlə metal ərintilərindən istifadə edilir. Belə metal ərintilər bərk məhlul şəklində mövcud olur. Bu tip ərintilərin alınma mexanizmi aşağıdakı kimidir. İki müxtəlif materialdan olan metal əridilərək qarışdırıldıqda onlardan (komponentlərdən) birinin atomları kristal qəfəsdə ikinci komponentin atomlarını qismən əvəz edir. Bu zaman alınmış məhlul əvəz edilmiş məhlul adlanır.

Komponentlərindən birinin atomunun ikinci komponentin kristal qəfəsinin düyün nöqtələrindəki atomlar arasında yerləşməsi nəticəsində alınmış ərinti isə daxil edilmiş bərk məhlul adlanır.

Birinci və ikinci komponentin atomlarının ölçüləri, elektron örtüyünün quruluşu və ya hər iki komponentin eyni tip qəfəs quruluşuna malik olması, ərintinin komponentləri arasında müxtəlif çəki nisbətində kəsilməz (müntəzəm) əvəz edilmiş bərk məhlul almağa imkan verir.

Daxil edilmiş bərk məhlul alınır ki, bir komponentin atomunun ölçüsü digər komponentin atomunun ölçüsündən 15÷20% kiçik olduqda alınır. Ərintilərin elektrik keçiriciliyi onların komponentlərinin elektrik keçiriciliyindən kiçik olur. Məsələn, 6:4 nisbətində alınmış mis-nikel ərintisinin elektrik keçiriciliyi təmiz misinkindən 30 dəfə, nikelinkindən isə 7 dəfə kiçikdir. Ərintilərin elektrik müqavimətinin temperatur əmsalı çox da böyük olmur. Metallarda sərbəst elektronların konsentrasiyası temperaturdan asılı deyil. Onların yüyürüklüyü və uyğun olaraq materialın elektrik keçiriciliyi temperaturun yüksəlməsi ilə kiçilir. Bu, temperaturun yüksəlməsi ilə sərbəst elektronların səpilməsinin güclənməsi hesabına baş verir.

Bərk məhlulların qəfəs quruluşundakı pozuntular o qədər böyük olur ki, temperaturun yüksəlməsi ona az təsir göstərir. Bu səbəbdən də həmin materiallarda müqavimətin temperatur

əmsalı kiçik olur. Adətən metal və ərintilərin keyfiyyət xarakteristikası olaraq elektrik keçiriciliyi deyil, xüsusi müqavimət götürülür. Bu kəmiyyət  $\text{Om}\cdot\text{mm}^2/\text{m}$  və ya  $\text{Om}\cdot\text{m}$ -lə ölçülür.

Maye keçiricilərə ərimiş metallar və müxtəlif elektrolitlər aiddir. Cıvə (ərimə temperaturu mənfi  $35^{\circ}\text{C}$ -dir) istisna olmaqla, metalların ərimə temperaturu yüksəkdir. Buna görə də normal şəraitdə keçirici maye metala cıvəni misal göstərmək olar. Qalliumun ərimə temperaturu  $29,8^{\circ}\text{C}$ -dir.

Bərk və maye metalların keçiriciliyi sərbəst elektronların hərəkəti ilə müəyyən olunduğundan, onlar elektron keçiriciliyinə malik keçiricilər və ya birinci cins keçiricilər adlanır.

Elektrolitlərə və ya ikinci cins keçiricilərə turşuların, qələvilərin, duzların sulu məhlulları və həmçinin ionlu birləşmələrin ərintiləri daxildir. Bu cins keçiricilərdən cərəyan keçərkən elektrik yükü təkcə sərbəst elektronlar hesabına deyil, həm də ionlarla daşınır. Bu səbəbdən də cərəyan axan elektrolitlərin tərkibi dəyişir və elektrodların üzərində maddə toplanması baş verir. Bütün qaz və buxarlar, o cümlədən metalların buxarı elektrik sahəsinin kiçik intensivliklərində keçirici deyil. Lakin gərginliyin müəyyən bir qiymətdən böyük qiymətlərində zərbələrlə, istilik hesabına və fotoionlaşmanın təsiri nəticəsində qaz elektrik cərəyanını keçirən mühitə çevrilə bilər. Bu zaman o, qarışıq elektron və ion keçiriciliyinə malik olur. Güclü ionlaşmış qazın vahid həcmində olan elektron və mənfi yüklü ionların sayı müsbət yüklü ionların sayına bərabər olduqda yaranmış keçirici mühit **plazma** adlanır.

## § 2.2. Metalların təsnifatı

Hal-hazırda metalların keçirici material kimi ümumi qəbul edilmiş (qanunauyğun) bir təsnifatı mövcud deyil. Buna baxmayaraq, onları tərkibinə (təmiz metallar və ərintilər), elektrik keçiriciliyinin qiymətinə, Dövri Sistemdəki yerinə, elektron örtüklərinin quruluşuna və s. görə qruplaşdırmaq olar.

273344

Adətən keçiriciliyinin qiymətinə görə metallar “yaxşı” və “pis” keçiricilər qrupuna ayrılır. Yüksək plastikliyə malik olan metallar “yaxşı” keçiricilərə aid edilir. Bu qrupa qızıl, gümüş, alüminium, mis kimi bir çox metalları daxil etmək olar. “Pis” keçiricilər qrupuna Kimyəvi Elementlərin Dövri Sistemində beşinci qrupunda yerləşən elementləri aid etmək olar. Məsələn, bismut, sürmə, mərgümüş və s. Həmin metallar çox kövrək olmaqla bərabər, həm də cərəyanı pis keçirir. Bunlar, bəzən yarımmetallar adlanır.

Kimyəvi Elementlərin Dövri Sistemində tutduqları yerə görə qələvi (Sistemdə birinci A - yarımqrupuna daxil olan natrium və digər elementlər), əlvan (birinci B - qrupuna daxil olan birvalentli mis, gümüş, qızıl), qələvitorpaq (Sistemdə ikinci yarımqrupuna daxil olan kalsium, stronsium, barium, radium), çoxvalentli, (ikinci qrupa, üçüncü A - və dördüncü A - yarımqrupuna daxil olan elementlər), eləcə də aktinidlər və nadir torpaq elementləri kimi metal qrupları var.

Hər bir qrupun daxilində metalların elektrik keçiriciliyi bir-birinə yaxın olub, digər qruplardakından kəskin fərqlənir. Məsələn, əlvan metallar (mis, gümüş, qızıl) kiçik müqavimətə malik olduğu halda, nadir torpaq elementləri qrupundan olan metallar (qadolinium və digərləri) böyük müqavimətə malikdir.

Kvant mexanikasının müddəalarına əsasən, Kimyəvi Elementlərin Dövri Sistemində elementlərin sıra nömrəsi artdıqca ardıcıl olaraq onların elektron örtüklərinin elektronlarla dolma prosesi gedir. Ancaq sıra nömrəsinin müəyyən qiymətindən sonra qonşu iki örtüyün enerjisi eyni olduğundan əvvəlcə növbəti örtük deyil, bundan sonra gələn örtük dolur. Hansı elementdə belə proses gedirsə, həmin kimyəvi element keçid elementi adlanır. Bu elementlərin hamısı metal olub, Kimyəvi Elementlərin Dövri Sistemində bir neçə sıra təşkil edir (skandiumdan-nikelə, itterbiyuma-palladiuma, manqandan-platinə). Digər metallar, normal metallar adlanır. Müasir fizika normal metalların xassələrini keçid metallarına nisbətən daha yaxşı izah edə bilər.

Dövlət Universiteti  
ƏLƏN KİTABXANA

Bu deyilənlərdən əlavə, metalları onların tətbiq sahələrindən asılı olaraq da, qruplara ayırmaq olar:

1. Elektrik dövrlərində istifadə olunan yüksək keçiriciliyə malik metallar;

2. Yüksək keçiriciliyə malik metallar əsasında hazırlanmış ərintilər;

3. Rezistorların, qızdırıcı elementlərin və termocütlərin hazırlanmasında istifadə olunan metallar;

4. Fotokatodların düzəldilməsində istifadə olunan metallar;

5. Elektrovakuum və qazla doldurulmuş cihazlarda istifadə olunan metal və ərintilər;

6. Elektrik dövrəsini açıb-bağlayan və ya dövrdə cərəyanın istiqamətini dəyişdirən açarların hazırlanmasında istifadə olunan metallar;

7. Lehim, toxunma və birləşmə yerlərində istifadə olunan metallar;

8. Müxtəlif xüsusi məqsədlər üçün istifadə olunan metallar.

### § 2.3. Metalların elektrik və istilik keçiriciliyi

Bərk cisim fizikasında potensiallar və ya temperaturlar fərqi nəticəsində yüklü zərrəciklər və enerji selinin yaranması hadisəsinə kinetik hadisələr deyilir. Bu zaman yaranan selin qiyməti onu törədən potensiallar və ya temperaturlar fərqi ilə mütənasibdir. Asılılığın mütənasiblik əmsalı isə keçiricinin həndəsi ölçülərindən və materialından asılı olur. Həndəsi ölçülərin qiyməti vahidə bərabər olduqda mütənasiblik əmsalı yalnız materialın xassələri ilə təyin edilməklə, onun fundamental fiziki xarakteristikası olur. Bu fiziki xarakteristika kinetik əmsal adlanır. Dəyişən sahədə yaranan cərəyan həndəsi ölçülər və kinetik əmsalla yanaşı, həm də sahənin dəyişmə tezliyindən, naqilin formasından və sxemin elementlərinin bir-birinə nəzərən yerləşmə vəziyyətindən asılıdır. Məsələn, naqilin dəyişən

cərəyana uyğun müqavimətinin cərəyanın dəyişmə tezliyindən asılılığı nəticəsində cərəyan naqilin en kəsiyinin mərkəzindən kənarlarına doğru sıxılır. Kinetik hadisələrə misal olaraq elektrikkeçirmə, istilikkeçirmə, termoelektrik-, qalvanomaqnit- və termomaqnit hadisələrini göstərmək olar. Bu kinetik hadisələr sırasındakı ən mühümləri elektrik və istilik keçiriciliyidir. Bu hadisələr kəmiyyətcə Om

$$j = \sigma E \quad (2.1)$$

və Furye

$$W = \alpha \Delta T \quad (2.2)$$

qanunları ilə ifadə olunur. Bu ifadələrdəki  $j$ -cərəyan sıxlığı,  $W$ - istilik selinin sıxlığı,  $\Delta T$  – naqilin vahid uzunluğuna düşən

temperaturlar fərqi,  $\sigma = \frac{n \tau e^2}{2 m_0}$  - metalların klassik elektron nə-

zəriyyəsinə əsasən hesablanmış xüsusi elektrik keçiriciliyi,  $n$ - elektronların konsentrasiyası,  $\tau$ -onların sərbəst uçuş müddəti,  $e$  – elektronların elektrik yükü,  $m_0$  – elektronların kütləsi,

$\alpha = \frac{3 n \tau k^2}{2 m_0}$  isə xüsusi istilik keçiriciliyidir. Empirik yolla alın-

mış Videman–Frans qanununa görə elektrik keçiriciliyi ilə istilikkeçirmə arasında xarakteristik bir asılılıq mövcuddur. Həmin asılılığa görə  $\alpha/\sigma$  nisbəti temperaturla düz mütənasib olub, bütün metallar üçün təqribən eyni qiymətə malikdir. Bu nisbətin mütləq temperatura nisbəti ilə təyin olunan mütənasiblik əmsalı Lorents ədədi ( $L$ ) adlanır və bütün metallar üçün eyni qiymətə malikdir:

$$L = 3 \left( \frac{k}{e} \right)^2 = 2,23 \cdot 10^{-8} \frac{V^2}{K^2} . \quad (2.3)$$

Sərbəst elektronlara Fermi-Dirak statistikasını tətbiq etdikdə Lorens ədədi üçün daha dəqiq qiymət alınır:

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} \frac{V^2}{K^2} \quad (2.4)$$

Bu nəzəri qiymət təcrübədən metallar üçün otaq temperaturunda təyin edilmiş təcrübi qiymətlə daha yaxındır.

Klassik elektron nəzəriyyəsi metallar üçün bir sıra məsələləri düzgün izah etsə də, elektron qazının kiçik istilik tutumuna malik olmasını izah edə bilmir. Bərk cismə harmonik rəqs edən ossilyatorlar sistemi kimi baxdıqda molyar istilik tutumunun qiymətini  $3R$ -ə bərabər götürmək olar. Yüksək temperaturalarda özünü doğruldan bu nəticə fizikada Dyulonq-Pti qanunu kimi məlumdur.

Lakin metallarda enerjinin udulması prosesində təkə rəqs edən atomların deyil, sərbəst elektronların iştirakını da nəzərə almaq lazımdır. Bu baxımdan metalların istilik tutumu sərbəst elektronları olmayan dielektrlərdən böyük olmalıdır. Müxtəlif metallardakı sərbəst elektronların konsentrasiyanın eyni olduğunu və hər bir elektronu ideal qaz atomu kimi qəbul etməklə onun orta istilik enerjisini  $\frac{3}{2} KT$ -yə, istilik tutumunu

isə  $\frac{3}{2} K$ -ə bərabər götürdükdə metalın molyar istilik tutumu

$$C_v = C_{qef} + C_e = 3R + \frac{3}{2} KN_0 = 3R + \frac{3}{2} R = \frac{9}{2} R \quad (2.5)$$

olar.

Burada  $C_{qef}$ -qəfəsin,  $C_e$ -elektron qazının istilik tutumları,  $K$ -Bolsman sabiti,  $N_0$ -sərbəst elektronların sayı,  $R$ -universal qaz sabitidir. Lakin məlum olduğu kimi, yüksək temperaturlarda metalların istilik tutumu dielektrlərin istilik tutumundan fərqlənmiş, yəni metal qızdırıldıqda elektron qazı istilik udmur. Bu nəticə klassik elektron nəzəriyyəsinin müddəalarına ziddir. Bu çatışmazlıq rus alimi Y.İ.Frenkel və alman alimi A.Zommerfeld tərəfindən işlənmiş metalların kvant nəzəriyyəsi əsasında aradan götürülmüşdür. Həmin nəzəriyyəyə görə, metalların xüsusi elektrik keçiriciliyi:



$$\sigma = \frac{e^2 n \bar{l}}{m_n^* V_f} \quad (2.6)$$

Burada  $V_f$  - enerjisi fermi enerjisinə bərabər olan elektronların istilik sürəti,  $m_n^*$  - elektronların effektiv kütləsi,  $e$ -elektronun yükü,  $n$  – sərbəst elektronların konsentrasiyası,  $\bar{l}$  - elektronun sərbəst yolunun orta uzunluğudur.

Elektronların  $m_n^*$  – effektiv kütləsini və  $V_f$  – istilik sürətini onların  $n$  konsentrasiyası ilə ifadə etsək

$$\sigma = \frac{e^2 n^{2/3} \bar{l}}{h} \left( \frac{8\pi}{3} \right)^{1/3} \quad (2.7)$$

olar. Burada  $h$ -Plank sabiti,  $\bar{l}$ -elektronun sərbəst yolunun orta uzunluğudur.

Təmiz metallarda sərbəst elektronların konsentrasiyası müxtəlif materiallar üçün çox az fərqlənir və temperaturdan asılı olaraq dəyişmir. Buna görə də metallarda elektrik keçiriciliyi, elektronların sərbəst yolunun orta uzunluğu ilə müəyyən olunur. Sonuncu isə öz növbəsində atomların kimyəvi təbiətindən və kristal qəfəsin tipindən asılıdır. Metallarda elektrik keçiriciliyinin temperaturdan asılılığı elektronların hərəkətinin dalğa təbiəti və de-Broyl dalğasının uzunluğu ilə təyin olunan elektron dalğalarının kristal qəfəsdə müxtəlif defektlərdən səpilməsi ilə izah olunur.

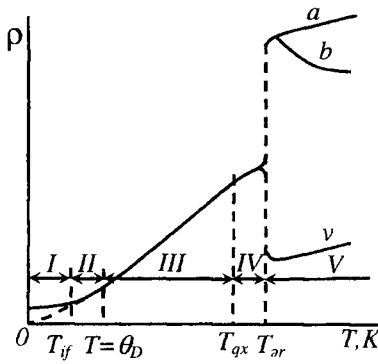
## § 2.4. Metalların elektrik xassələri

Praktikada keçiriciləri xarakterizə etmək üçün

$$\rho = \frac{l}{\sigma} \quad (2.8)$$

xüsusi müqavimət anlayışından istifadə olunur. Müxtəlif metal naqillərin müqaviməti

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.9)$$



Şəkil 2.1

ifadəsi ilə təyin olunur. Burada  $l$ -naqilin uzunluğu,  $S$ -en kəsiyinin sahəsidir. Geniş temperatur intervalında xüsusi müqavimətin temperaturundan asılılığının xarakterini müəyyən etmək həm nəzəri, həm də praktiki əhəmiyyət kəsb edir. Metalların xüsusi müqavimətinin temperaturdan asılılığının qrafiki şəkil 2.1-də göstərilmişdir. Bu şəkildə təsvir olunmuş asılılığın bir neçə Kelvin dərəcədən geniş olmayan I oblastında bir sıra metallar ifrat keçiricilik halında olur. Qrafikdən görüldüyü kimi,  $T_{if}$  temperaturunda xüsusi müqavimət sıçrayışla sıfıra düşür. Düzgün quruluşa malik olan təmiz metallarda temperatur  $0^0$  K-ə yaxınlaşdıqca müqavimət sıfıra (qırıq xətt) yaxınlaşır və bu zaman elektronların sərbəst yolunun orta uzunluğunun qiyməti sonsuzluğa yaxınlaşır. Adi temperaturda metalda elektronların sərbəst yolunun orta uzunluğu atomlar arasındakı məsafədən yüz dəfələrlə böyük olur. II oblastda xüsusi müqavimətin kəskin artması müşahidə olunur. Bu zaman  $\rho \sim T^n$  asılılığında  $n$ -nin qiyməti 5-ə qədər arta bilər. Temperatur Debay temperaturuna ( $\theta$ ) bərabər olduqda isə  $n \approx 1$ . Asılılığın III oblastı xəttidir və  $0$ , ərimə temperaturuna qədər davam edə bilər. Ferromaqnit metal-

lar bu qaydadan kənarda qalır. Çünki həmin metallarda elektronların əlavə səpilməsi meydana gəlir. Bəzi metallarda  $T_{qx}$  - temperaturunda xəttikdən kənara çıxmalar müşahidə olunur.

Əksər metallar bərk haldan maye halına keçdikdə onların xüsusi müqavimətinin 1,5-2 dəfə böyüməsi, bismut və qallium kimi mürəkkəb kristal quruluşlu metallarda isə əksinə xüsusi müqavimətin kiçilməsi müşahidə olunur. Təcrübi yolla müəyyən edilərək ki, metal əridikdə onun həcmi artırsa xüsusi müqaviməti sıçrayışla böyüyür. Əksinə, əriyəndə metalın həcmi kiçilirsə - onun xüsusi müqavimətinin kiçilməsi müşahidə olunur. Ərimə zamanı nə sərbəst elektronların konsentrasiyası, nə də onların arasındakı qarşılıqlı təsirin xarakteri dəyişmir. Bu halda xüsusi müqavimətin dəyişməsinə səbəb atomların nizamlı düzülüşünün pozulmasıdır. Ga və Bi-da müşahidə olunan anomalıya isə ərimə zamanı sıxılmanın artması ilə bağlıdır. Bu da öz növbəsində atomların istilik rəqslərinin amplitudununun kiçilməsinə səbəb olur.

Temperaturun 1 K dəyişməsi zamanı xüsusi müqavimətin nisbi dəyişməsinə xüsusi müqavimətin temperatur əmsalı deyilir:

$$\alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad (2.10)$$

Burada  $\alpha_{\rho}$  - müsbət işarəli olub, verilmiş nöqtə ətrafında temperaturun yüksəlməsi ilə xüsusi müqavimətin artmasına uyğun gəlir.  $\alpha_{\rho}$  - əmsalı temperaturdan da asılıdır.  $\rho(T)$  asılılığının xətti oblastında:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_{\rho} (T - T_0)] \quad (2.11)$$

Otaq temperaturunda metalların əksəriyyəti üçün  $\alpha_{\rho} = 0,004K^{-1}$ . Ferromaqnit metallar üçün  $\alpha_{\rho}$  -bu qiymətdən bir qədər böyükdür. Elektron dalğasının metallarda səpilməsində təkə düyün nöqtələrinin rəqsi deyil, eləcə də onların statistik defekt quruluşu da rol oynayır. Statistik defektlərdən səpilmə temperaturdan asılı deyil. Buna görə də, temperatur müt-

ləq sifıra yaxınlaşdıqca real metalların müqaviməti  $\rho_{qal}$  – qalıq müqaviməti adlanan müəyyən sabit qiymətə yaxınlaşır. Buradan da, xüsusi müqavimətin additivliyinə uyğun olaraq

$$\rho = \rho_1 + \rho_{qal} \quad (2.12)$$

Mattisen qaydası alınır.

Bu qayda belə ifadə olunur: metalların tam xüsusi müqaviməti, kristal qəfəsin düyün nöqtələrində yerləşən atomların rəqslərindən səpilən elektronlarla əlaqədardır;  $\rho_1$  -xüsusi müqavimət,  $\rho_{qal}$  - isə quruluşun statistik defektlərindən səpilən elektronlarla əlaqəli müqavimətdir. İfrat keçiriciliyə malik metallar bu qaydadan kənardadır.

## § 2.5. Metal ərintilərinin elektrik xassələri

Elektron texnikasında metal ərintilərindən geniş istifadə olunur. Eyni kristal quruluşa malik olan metallar müxtəlif nisbətə qarışdırıldıqda kəsilməz bərk məhlul əmələ gətirir.

Kristal qəfəsin düyünlərində müxtəlif növ atomların statistik paylanması periodik potensial sahədə hiss oluna bilən fluktuasiya yaradır. Bu isə öz növbəsində elektronların güclü səpilməsinə gətirir. Metallar kimi, ərintilərin də xüsusi müqavimətini iki toplananın cəmi şəklində göstərmək olar:

$$\rho_{ar} = \rho_1 + \rho_{qal} . \quad (2.13)$$

Burada  $\rho_1$  – elektronların qəfəsin istilik rəqslərindən,  $\rho_{qal}$  - isə ərintinin quruluşunun qeyri-bircinsliklərindən səpilməsi ilə bağlı müqavimətdir. Bərk məhlulların xarakterik xüsusiyyəti  $\rho_{qal} \gg \rho_1$  olmasıdır.

Bir çox iki komponentli ərintilər üçün xüsusi müqavimətin tərkibdən asılılığı parabolik xarakter daşıyır:

$$\rho_{qal} = CX_a X_b = CX_b(1 - X_b) . \quad (2.14)$$

Burada C-ərintinin təbiətindən asılı olan sabit kəmiyyət,  $X_a$  və  $X_b$  – isə ərintiyə daxil olan komponentlərə uyğun atomların nisbi miqdarıdır. Bu münasibət Nordheymlə qanunu adlanır.  $X_a=X_b=0,5$  olduqda qalıq müqavimət özünün maksimal qiymətini alır.

Nordheymlə qanunu xüsusi müqavimətin dəyişməsinə o zaman düzgün xarakterizə edir ki, komponentlərdən heç biri keçid və nadir torpaq elementlərinə aid olmasın.

Ərintidə komponentlərdən birinin miqdarı çox az olarsa, ona aşqar kimi baxmaq mümkündür. Bu halda  $(1-X_b) \approx 1$  qəbul edilir və (2.14) ifadəsi

$$\rho_{qal} = CX_b \quad (2.15)$$

xətti asılılığa çevrilir.

## § 2.6. İfratkeçiricilik

Bir sıra metal və ərintilərdə mütləq sifirə yaxın temperaturalarda xüsusi müqavimətin kəskin azalması müşahidə olunur. Bu hadisə ifratkeçiricilik adlanır. İfratkeçiricilik halına keçidin baş verdiyi temperatura keçidin böhran temperaturu deyilir. Əksər hallarda bu kəmiyyət  $T_{if}$  – ifratkeçiricilik temperaturu kimi işarə olunur. İfratkeçiricilik hadisəsi ilk dəfə holland alimi Kammerlinq-Onnes tərəfindən civədə ( $T_{if}=4,2$  K) aşkar edilmişdir.

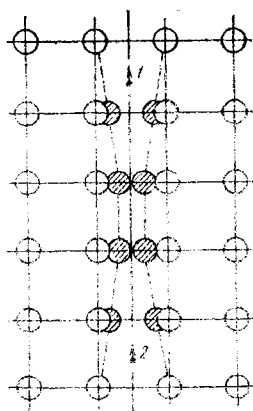
Əgər ifratkeçirici həlqədə dəyişən maqnit sahəsinin köməyi ilə cərəyan yaratmış olsaq, bu cərəyan uzun müddət sönməyəcəkdir. İfratkeçiricilik halında materialların xüsusi müqaviməti təqribən  $10^{-25}$  Om-m tərtibində olur ki, bu da misin otaq temperaturundakı xüsusi müqavimətdən  $10^{17}$  dəfə kiçikdir.

İfratkeçiricilik hadisəsini yalnız kvant fizikası anlayışları əsasında başa düşmək olar.

Alınmış təcrübi nəticələri izah edən ifratkeçiriciliyin mikroskopik nəzəriyyəsi 1957-ci ildə Amerika alimləri Bardin, Kuper və Şriffer tərəfindən yaradılmışdır. Bu nəzəriyyə çox

vaxt qısaltdılmış şəkildə BKŞ nəzəriyyəsi adlandırılır. İfratkeçiriciliyi metaldakı elektronların bir-birini cəzb etməsi ilə izah etmək olar. Bu isə o zaman mümkündür ki, elektronlar müsbət yüklü ionlar mühitində yerləşsin. Bunlara uyğun sahə elektronları arasındakı kulon itələmə qüvvəsini azaldır və Fermi səviyyəsinə yaxın yerləşən və elektrik keçiriciliyində iştirak edən elektronlar bir-birini cəzb edə bilər.

Əgər belə cazibə mövcuddursa, impulsları və spinləri əks olan elektronlar cüt şəklində əlaqə yaradır və bu cütə Kuper cütü deyilir. Kuper cütlərinin yaranmasında başlıca rol qəfəsin istilik rəqslərinin (fononların) elektronlarla qarşılıqlı təsiri oynayır. Bərk cisimlərdə elektron fononu uda və ya yarada bilər. Fərz edək ki, bir elektron qəfəslə qarşılıqlı təsirdə olub, onu həyəcanlanmış vəziyyətə keçirir və öz impulsunu dəyişir. Digər elektron isə qəfəslə qarşılıqlı təsirdə olaraq onu normal hala keçirir və o da öz impulsunu dəyişir. Nəticədə qəfəsin halı dəyişmir və elektronlar fonon mübadiləsində olur. Fonon mübadiləsi nəticəsində elektronlar arasında cazibə qüvvəsi kulon itələmə qüvvəsindən böyük olur. Elektronların qəfəs vasitəsilə fonon mübadiləsini sxematik olaraq şəkil 2.2-dəki kimi təsvir etmək olar.



**Şəkil 2.2**

İfratkeçirici metallarda elektron cütünün əmələ gəlmə sxemi

Elektron müsbət ionların arasında hərəkət etdiyi zaman qəfəsi polyarlaşdırır, elektrostatik sahənin köməyi ilə ionları özünə cəzb edir. Bu səbəbdən elektronun hərəkət trayektoriyası boyunca ionların sıxlığı artır. Birinci elektronun arxasınca hərəkət edən ikinci elektron müsbət ionlar sıxlığının artması hesabına cəzb oluna bilər. Nəticədə, dolayı yolla qəfəslə qarşılıqlı təsir nəticəsində 1-ci və 2-ci elektron arasında cazibə qüvvəsi yaranır. 2-ci elektron 1-ci elektronla Kuper cütü yaradır. Cəzibə qüvvəsi böyük olmadığından elektronlar fəzada zəif lokallaşmış olur. Kuper cütünün effektiv diametri  $10^{-7}$  m olub, minlərlə elementar özəyi əhatə edir. Bu cütlər parçalanır və yəni-dən əmələ gəlir. Ümumilikdə bütün elektron cütləri elektron kondensatı (mayesi) əmələ gətirir ki, onların da enerjisi, sərbəst elektronların enerjisindən kiçik olur. Bu səbəbdən də ifratkeçiricinin enerji spektrində eni  $2\Delta$ -ya bərabər olan yarıq əmələ gəlir. Bu yarıqda enerji səviyyələri mövcud olmur. Cütlənmiş elektronlar spektral yarığın dibində yerləşir. Təqribi hesablamalar göstərir ki, bu cür elektronların sayı ümumi elektronların  $10^{-4}$  hissəsini təşkil edir. Enerji yarığının eni temperaturdan asılıdır və mütləq sıfırda maksimal qiymətə malikdir,  $T=T_{ik}$ -də isə tamamilə itir.

BKŞ nəzəriyyəsinə görə yarığın eni ilə keçidin böhran temperaturu arasında

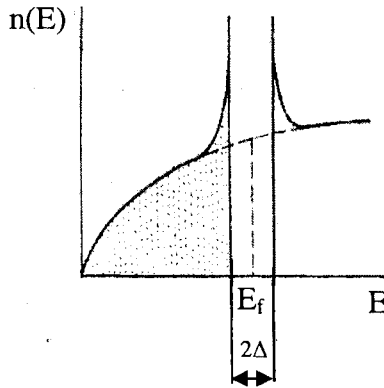
$$2\Delta_{0K} = 3,52 kT_{ik} \quad (2.16)$$

şəklində əlaqə var.

Bir çox ifrat keçiricilər üçün bu enin qiyməti  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  eV aralığında yerləşir.

Metalların elektrik müqaviməti elektronların qəfəsin istilik rəqslərindən və aşqarlardan səpilməsi ilə əlaqədardır. Enerji yarığı mövcud olduğundan əsas haldan həyacanlanmış hala keçmək üçün əlavə enerji lazımdır. Aşağı temperaturda elektron həmin enerjini qəfəsdən ala bilmir. Bu zaman rəqslərin istilik enerjisi yarığın enindən kiçik olur. Buna görə də, cütlənmiş elektronlar qəfəsin quruluşundakı defektlərdən səpilmir.

Kuper cütlərinin əsas xüsusiyyətləri ondan ibarətdir ki, onların impulsları eyni olub, bir-birindən asılı olaraq dəyişir. Cütlərin hərəkətini xarakterizə edən elektron dalğası eyni dalğa uzunluğuna və fazaya malik olur. Elektron cütlərinin hamısının hərəkətinə bir dalğa kimi baxmaq olar. Bu dalğa qəfəsdə səpilmir və quruluş defektlərindən yan keçir. Elektron cütünün özünü belə aparması elektron kondensatının yüksək mütəhərrikiyə malik olmasını göstərir. Cütlər yığılı daim dəyişdiyindən cüt əmələgətirən elektronlar da daim dəyişir. Mütləq sıfır dərəcədə cüt şəklində birləşmiş elektronlar Fermi səviyyəsinə yaxın yerləşir. Temperatur yüksəldikcə bəzi cütlərin parçalanması baş verir.



**Şəkil 2.3.**  
İfratkeçiricilik halında metalda elektronların enerjiyə görə paylanması

Bu isə öz növbəsində yarığın eninin kiçilməsinə səbəb olur.  $T=T_{ik}$  olduqda cütlərin hamısı parçalanır, yarığın eni sıfıra bərabər olur və ifrat keçiricilik aradan qalxır.



## § 2.7. İfratkeçirici materiallar

İndiki məlumatlara görə ifratkeçiricilik xassəsinə 26 metal malikdir. Bunlardan əksəriyyətinin böhran temperaturu 4,2 K olduğundan, onlar 1-ci növ ifratkeçiricilər adlanır. Elə bu səbəbdən də metalların əksəriyyəti ifratkeçirici materiallar kimi elektrotexnikada istifadə olunmur. Bu metallardan əlavə, daha 13 kimyəvi element yüksək təzyiqlə altında ifratkeçirici xüsusiyyətinə malik olur. Bunlara, həmçinin silisium, germanium, selen, tellur, sürmə kimi yarımkəçiricilər də aiddir. Qeyd etmək lazımdır ki, normal şəraitdə yüksək keçiriciliyə malik metallar ifratkeçiricilik xassəsinə malik deyil. Belə metallara qızıl, mis, gümüş aiddir. Həmin materialların xüsusi müqavimətinin kiçik olmasına səbəb sərbəst elektronların qəfəslə qarşılıqlı təsirinin zəif olmasıdır. Belə zəif qarşılıqlı təsir mütləq sıfır temperaturda elektronlar arasındakı cazibənin Kulon qarşılıqlı itələmə qüvvəsindən kiçik olduğunu göstərir. Bu da onların ifratkeçiricilik halına keçməsinə mane olur.

Təmiz ifratkeçirici metallarla yanaşı, ifrat keçiricilik xassəsinə malik çoxlu sayda intermetal birləşmələr və ərintilər də mövcuddur. Həmin birləşmə və ərintiləri də nəzərə alsaq, hal-hazırda 2000-ə yaxın ifratkeçirici material mövcuddur. Belə materialların ifratkeçiricilik halına keçməsi üçün maye heliumdan deyil, daha ucuz başa gələn maye hidrogendən istifadə etmək olar.

İntermetallar və ərintilər II növ ifratkeçiricidir. Lakin ifratkeçiriciləri I və II növ kimi qruplara ayırmaq heç də mütləq deyil. Çünki hər bir I növ ifratkeçirici materialın kristal qəfəsində kifayət qədər defektlər yaratmaqla, onu II növ ifratkeçirici materiala çevirmək olar. Məsələn, təmiz qalayda ( $T_{ik}=3,7K$ ) qeyri-bircins mexaniki deformasiya yaratmış olsaq, onun böhran temperaturu 9K-ə qədər, maqnit sahənin böhran gərginliyi isə 70 dəfəyə qədər artmış olur. Ferromaqnit və antiferromaqnit metallarda ifratkeçiricilik müşahidə olunmur. Yarımkəçiricilərdə və dielektriklərdə adi şəraitdə ifratkeçiriciliyin müşahi-

də olunmamasına səbəb, həmin materiallarda sərbəst elektronların konsentrasiyasının kiçik olmasıdır.

Bununla belə, yüksək dielektrik nüfuzluğuna malik olan materiallarda elektronlar arasındakı Kulon dəfətmə qüvvəsinin kiçilməsi onlarda ifratkeçiriciliyin müşahidə olunmasına imkan yaradır. Buna seqnetoelektriklər qrupuna daxil olan ( $\text{SnTiO}_3$ ) – titanat stronsiumu misal göstərmək olar.  $\text{GeTe}$ ,  $\text{SnTe}$ ,  $\text{CuS}$  və digər yarımkeçiricilərə çoxlu miqdarda aşqar daxil etməklə onları ifratkeçirici hala gətirmək mümkündür. Bundan əlavə, xüsusi texnologiya ilə alınmış saxsı materiallar maye azotda (77 K-də) ifrat keçirici halına keçir. Saxsı materialın və maye azotun alınma texnologiyası sadə olmaqla yanaşı, həm də çox ucuz başa gəlir.

## § 2.8. İfratkeçiriciliklərin tətbiqi

İfratkeçiricilərin ən başlıca tətbiq sahəsi ifrat güclü maqnit sahələrinin alınmasında istifadəsidir. Bu materiallardan hazırlanmış solenoiddən intensivliyi  $10^7 \frac{A}{M}$  olan güclü maqnit sahəsinin alınmasında istifadə edilir. İfratkeçirici materiallarda yaradılan cərəyan əlavə enerji sərf olunmadan uzun müddət davam edir. İfratkeçirici solenoid elementar zərrəciklərin sürətləndirilməsində istifadə olunan sinxrofazatron və digər sürətləndiricilərin ölçülərinin kiçildilməsinə imkan verir. İfratkeçiricilərin tətbiqi hesabına elektrotexnikada polad içlikləri aradan götürmək mümkündür ki, bu da istifadə olunan elektromaqnitlərin kütlələrinin 5-7 dəfə azaldılmasına imkan verir. İfratkeçiricilər əsasında transformatorların hazırlanması isə həmin qurğuların gücünün 10-100 MVt-a qədər artmasını təmin edir. Səbit, eləcə də dəyişən cərəyanlar üçün xətlərin hazırlanması da perspektivli məsələlərdəndir və bu məsələnin həllində də ifratkeçiricilərdən istifadə oluna bilər.

Plazma toplarının və bərk cisimli lazerlərin həyəcənlaşdırılmasında da ifratkeçirici materiallardan düzəldilmiş sargılardan istifadə olunur.

Kiçik elektrik müqavimətinə və böyük keyfiyyət əmsalına malik olması ifratkeçiricilərin radiotexnikada rezonatorların, maqnit sahəsində itələmə xüsusiyyətinə malik olması isə - yüksək sürətli dəmiryol nəqliyyatının hazırlanmasında istifadəsinə imkan yaradır.

## § 2.9. Əlvan metallar

Elektron texnikasında kimyəvi cəhətdən dayanıqlı olan əlvan metallar kimi əsasən qızıl, gümüş, platin və palladiumdan istifadə edilir. Bu metallar təbiətdə külçə şəklində və ya bəzi filizlərin tərkibində tapılır. Onların yüksək təmizlik dərəcəsini təmin etmək üçün kimyəvi və elektrolitik çökdürmə üsullarından istifadə edilir.

Bu üsullarla təmizlik dərəcəsi 99,998% olan qızıl (Au), 99,998% olan platin (Pt), 99,999% olan gümüş (Ag) və 99,94% olan palladium (Pd) alınır.

**Qızıl (Au)** sarı rəngli parlaq metal olub, yüksək plastikliyə malikdir. Dartılma zamanı bərklik hüdudu 150 MPa, qırılmaya uyğun nisbi uzanması 40% təşkil edir. Qızılın ərimə temperaturu  $1063^{\circ}\text{C}$ , xüsusi müqaviməti  $2,25 \cdot 10^{-4}\text{ Om}\cdot\text{m}$ , çıxış işi 4,3 eV-dur. O, diamaqnit xassəsinə malikdir, ifratkeçiricilik xassəsinə isə malik deyil.

Nazik qızıl təbəqəsini katod tozlanması, vakuumba termik buxarlanma və kondensasiya üsulları ilə almaq mümkündür. Belə təbəqələr yüksək keçiriciliyə malik olmaqla yanaşı, həm də üzərinə düşən işıq şüasını çox az udur. Bu səbəbdən də nazik qızıl təbəqəsindən neytral optik filtrlərin, yarımkəçirici fotorezistor və fotoelementlər üçün yarı şəffaf elektrodların, mikrosxemlərdə keçirici sahə və əlaqələndiricilərin yaradılma-

sında istifadə olunur. Dielektriklərlə adgeziyası pis olduğundan, qızıl nazik təbəqə şəklində xrom altlığı üzərinə çəkilir. Qızılın alüminiumla kontaktında bir sıra intermetal birləşmələr əmələ gəlir. Belə birləşmələr böyük xüsusi müqavimətə malik olmaqla yanaşı, həm də kövrəkdir.

Bu səbəbdən də elektron texnikasında qızılın alüminiumla kontaktından istifadə edilmir.

**Gümüş (Ag)** ağ rəngli parlaq metal olub, normal şəraitdə oksidləşməyə qarşı davamlıdır. Onun xüsusi müqaviməti  $2,65 \cdot 10^{-8}$  Om·m, ərimə temperaturu isə  $660^{\circ}$  C-dir.

Gümüş məftilin dartılmada möhkəmlik həddüdü 200 MPa, qırılmaya uyğun nisbi uzanması isə 50% -dir.

Müxtəlif elektron qurğularında gümüşdən cərəyan kontaktlarının hazırlanmasında istifadə olunur. Xüsusi istilik tutumunun kiçik, istilik və elektrik keçiriciliyinin böyük qiymətə malik olması, başqa metallardan fərqli olaraq, kontakt nöqtəsindən istiliyin kənara tez ötürülməsinə imkan yaradır. Gümüşdən, həmçinin slyudalı kondensatorların istehsalında dielektriklərin üzərində kontaktlar (elektrodlar) yaratmaq üçün də istifadə etmək mümkündür. Bu məqsədlə vakuumba buxarlanma və yandırma üsullarından istifadə olunur. Yüksək keçiriciliyi təmin etmək üçün dalğa ötürücülərin daxili səthi də gümüşlə örtülür.

Xarici mühitin temperaturu və nəmliyi yüksək olduqda gümüş atomları dielektriklərin həcmində daxil olur. Bu xüsusiyyət onun çatışmayan cəhətlərindəndir. Gümüş, həmçinin digər əlvan metallara nisbətən kimyəvi təsirlərə daha güclü məruz qalır. Kükürlü mühitdə olduqda gümüşün üzərində, elektrik cərəyanı keçirməyən qara rəngli AgS örtüyü əmələ gəlir. Bu səbəbdən də gümüşün tərkibində rezin, ebonit və kükürd olan materiallarla təmasda olması qeyri-məqbuldur.

**Platin (Pt)** ağ rəngli metal olub, oksigenlə praktiki olaraq birləşmə yaratmır. O, kimyəvi təsirlərə qarşı olduqca davamlıdır. Platin çox asanlıqla texniki aşılır. Buna görə də ondan

çox nazik məftil və lent hazırlamaq mümkündür. Gümüşdən fərqli olaraq, platin atmosferdə kükürlə birləşmə yaratmır və bu səbəbdən ondan keçid kontaktlarının (qalvanik kontaktların) yaradılmasında istifadə edilir. O, hidrogeni həll etmir və qızdırılmış halda oksigeni özündən buraxır. Platini hidrogen mühitində qızdırdıqda o, öz xassələrini itirmir, karbonlu mühitdə qızdırıldıqda isə kövrəkləşir.

Platinin ərimə temperaturu  $1770^{\circ}\text{C}$ , xüsusi müqaviməti  $9,81 \cdot 10^{-8}\text{Om}\cdot\text{m}$ , çıxış işi  $5,23\text{ eV}$ -dir.

Platindən  $1600^{\circ}\text{C}$  temperaturda işləyə bilən termocütlərin hazırlanmasında istifadə olunur. Ondan  $0,001\text{ mm}$  diametrində nazik məftil hazırlamaq mümkündür. Belə məftillərdən çox həssas elektrometrik cihazlarda istifadə edilir. Platinin bərkliyi az olduğundan ondan təmiz halda kontaktların yaradılmasında istifadə olunmur. Lakin onun bəzi ərintiləri bu məqsədlə yararlıdır. Platinin ən çox istifadə olunan ərintisi platin-iridiumdur. Bu ərinti oksidləşmir, yüksək bərkliyə malikdir, çox sayda qoşulmağa məruz qala bilər, lakin baha olduğundan, ondan yalnız kontaktın çox yüksək davamlılığı tələb edildiyi hallarda istifadə olunur.

**Palladium (Pt)** platinlə müqayisədə çox ucuz başa gəldiyindən və xassələrinə görə ona çox yaxın olduğundan elektron texnikasında platinin əvəzləyicisi kimi istifadə olunur. Bu metalın elektrovakuum cihazlarında istifadə olunması hidrogeni intensiv udması ilə əlaqədardır.

Hidrogen  $150\div 300^{\circ}\text{C}$ -də  $0,015\div 0,1\text{MPa}$  təzyiqdə palladiuma diffuziya edir və vakuumda palladiumu  $350\text{-}500^{\circ}\text{C}$  qızdırdıqda ondan ayrılır. Palladium öz həcmindən  $850$  dəfə böyük həcmli hidrogeni uda bilər. Ondan ayrılan hidrogen bir sıra qaz boşalma lampalarının doldurulmasında istifadə olunur. Palladiumun mis və gümüşlə ərintiləri bir çox cərəyan kontaktlarının yaradılmasında istifadə olunur. Bu metalın dartılmada möhkəmlik hədudu  $200\text{ MPa}$  -a, qırılmada nisbi uzanması isə  $40\%$  -ə bərabərdir.

Palladiumun ərimə temperaturu  $1500^{\circ}\text{C}$ , xüsusi müqaviməti  $10,8 \cdot 10^{-8}\text{Om}\cdot\text{m}$ , çıxış işi isə  $4,8\text{ eV}$ -dur.

## § 2.10. Qeyri-metal keçirici materiallar

Elektron texnikasında metal və metal ərintiləri ilə yanaşı, karbonun keçirici modifikasiyalarından, oksidlərindən və müxtəlif kompozisiya materiallarından da rezistor, kontakt və cərəyan keçirən elementlərin hazırlanmasında istifadə edilir.

**Karbonlu materiallar.** Təmiz karbonun allotropik forması olan qrafitdən elektron texnikasında geniş istifadə olunur. Qrafit kiçik xüsusi müqavimətə malik olmaqla yanaşı, yaxşı istilik keçiriciliyinə, kimyəvi təsirə davamlığa, yüksək temperatura dözümlüyə və asan mexaniki işlənmək xüsusiyyətlərinə malikdir. Praktiki məqsədlə təbii qrafit, antrosit və pirolitik karbondan istifadə olunur.

Təbii qrafit ərimə temperaturu  $3900^{\circ}\text{C}$  olan böyük ölçülü kristal materialdır. Yüksək temperaturda oksigen mühitində oksidləşir. Qaz halında  $\text{CO}$  və  $\text{CO}_2$  oksidlərinə parçalanır.

**Pirolitik karbon.** Pirolitik karbon vakuumda və ya qaz mühitində karbohidrogenin termik parçalanması yolu ilə alınır. Buna bəzən piroliz üsulu da deyilir. Sıx quruluşa malik pirolitik karbon almaq üçün pirolizin temperaturu  $900^{\circ}\text{C}$ -dən aşağı olmamalıdır. Pirolitik karbon təbəqəsindən xətti rezistorların alınmasında istifadə olunur.

Müxtəlif karbonlu məhsulların emalı zamanı karbonlu xammal toz şəklinə saldıqdan sonra onu əlaqələndirici maddələrlə qarışdırıb xüsusi formalarda bişirirlər. Bundan sonra o, kifayət qədər yüksək möhkəmliyə malik olur və asanlıqla mexaniki işləmə bilir.

Qrafitdən yarımkeçiricilərin texnologiyasında çox istifadə olunur. Bu materialdan müxtəlif qızdırıcılar, ekranlar, tiqellər, kassetlər və s. düzəldilir.

Vakuum və qoruyucu qaz mühitində qrafitdən düzəldilmiş əşyaları  $2500^{\circ}\text{C}$  qədər temperaturalarda istifadə etmək olur.

**Kompozisiyalı keçirici materiallar.** Əlaqələndirici dielektriklərlə keçirici aşqarın mexaniki qarşılıqlı kompozisiya-

lı keçirici material deyilir. Tərkibini və tərkibindəki komponentlərin paylanma xarakterini dəyişməklə kompozisiyalı keçirici bu materialların elektrik xassələrini çox geniş intervalda dəyişmək olur. Kompozisiyalı keçirici materialların başlıca xüsusiyyəti onların keçiriciliyinin cərəyanın tezliyindən asılı olması və uzun müddət gərginliyin təsiri altında yerləşdikdə belə keçiriciliyinin azalmasıdır.

Kompozisiyalı materiallarda keçirici komponent olaraq metallardan, qrafitdən, qurumdan (hisdən), bəzi oksidlərdən və karbidlərdən istifadə olunur. Bu kompozisiyalı materiallarda əlaqələndirici maddə kimi, müxtəlif sintetik qətranlardan (epoksid, fenol-formaldehid və s.), keçirici aşqar olaraq isə - toz şəklində salınmış metallardan (gümüş, nikel, palladium) istifadə edilir. Müxtəlif kombinasiyalı keçirici materiallar arasında kontaktol və kermet xüsusi yer tutur. Kontaktol kiçik özüllüyə malik pasta şəklində olan cərəyan keçiriciliyinə malik kompozisiyalı polimer materialdır.

Kontaktollardan metalların və metalla yarımkeçirici arasındakı kontaktların, dielektriklərdə elektrodların yaradılmasında, eləcə də cihazların ekranlaşdırılmasında, dielektrik lövhələr üzərində keçirici kommunikasiyalar yaratmaqda və müxtəlif elektron sənayesi məmulatlarında istifadə olunur. Metal və dielektrik arasında qeyri-üzvi əlaqələndiricilərin köməyi ilə yaranan kompozisiyaya kermet deyilir. Onlardan nazik lövhəli rezistorların hazırlanmasında istifadə olunur.

## III FƏSİL

### DİELEKTRİKLƏR

#### § 3.1. Dielektriklərin polyarlaşması

Xarici elektrik sahəsinin təsiri altında polyarlaşma xüsusiyyətinə malik olub, daxilində elektrik sahəsinin mümkünlüyü və potensialın qeyri-bircins paylanması mövcud ola bilən maddələrə dielektrik deyilir.

Dielektriklərdə atom və molekulardakı elektrik yükləri arasındakı elastiki rabitə xarici elektrik sahəsinin təsiri ilə onların yerdəyişməsinə və nəticədə dielektriklərin polyarlaşmasına səbəb olur. Dielektrik materialların qadağan olunmuş zonasının eni bir qayda olaraq  $3\text{eV}$ -dən böyükdür.

Dielektriklərin əsas elektrik xassələri onların elektrik keçiriciliyi, dielektrik itkisi, elektrik möhkəmliyidir.

Bu xassələr dielektrikin quruluşundan və kimyəvi tərkibindən asılıdır.

Elektrik sahəsinin təsiri altında elektrik yüklərinin yerdəyişməsi və nizamlanması prosesinə elektrik polyarlaşması deyilir. Elektrik polyarlaşması zamanı maddənin halı, onun daxilində müəyyən həcmdə elektrik momentinin sıfırdan fərqlənməsi ilə xarakterizə olunur. Daxili elektrik sahəsinin intensivliyi ilə təyin olunan elektrik momentinə dielektriklərin molyar polyarlaşması deyilir. Bu kəmiyyət

$$P_M = \frac{4\pi}{3} N \alpha \quad (3.1)$$

şəklində ifadə olunur. Burada  $\alpha$  - molekulaların polyarlaşma əmsalı,  $N$  - Avogadro ədədidir. Dielektriklərdə polyarlaşmanın elektron, ion, ion relaksasiyası, dipol relaksasiyası, elektron relaksasiyası, elastiki dipol, nüvə yerdəyişməsi, eləcə də quruluş, spontan və qalıtq polyarlaşması kimi növləri var.



**Elektron polyarlaşması** atom və ionlarda elektron örtük-lərinin elastiki yerdəyişməsi və deformasiyası hesabına baş verir. Elektron polyarlaşmasında yerdəyişmə  $10^{-8}$  sm tərtibində olur.

Elektron polyarlaşmasını kəmiyyətə Klauzius – Mossoti tənliyi ilə qiymətləndirmək mümkündür. Bu tənliyə görə maddənin elektron polyarlaşması ilə dielektrik nüfuzluğu arasında

$$P = \frac{(\varepsilon - 1)M}{(\varepsilon + 2)d} = \frac{4\pi}{3} n_0 \alpha_e \frac{M}{d} = \frac{4\pi}{3} N \cdot \alpha_e \quad (3.2)$$

şəklində əlaqə mövcuddur. Burada  $\varepsilon$  - maddənin dielektrik nüfuzluğu;  $n_0$  - atom, molekul və ionların konsentrasiyası;  $\alpha_e$  - vahid həcmdəki elektron polyarlaşması;  $M$  - molekulyar çəki;  $d$  - materialın sıxlığıdır.

$\mathcal{E}$  - ölçüsüz skalyar kəmiyyətdir. Bu kəmiyyət dielektrikin kondensatorda tutum əmələgətirmə qabiliyyətini göstərir və elektrik yükünün sıxlığının verilmiş dielektrik mühitdəki, vakuumdakı sıxlığına olan nisbətində bərabərdir.

Elektron polyarlaşması ani olaraq yarandığı kimi, ani olaraq da yox olduğundan kondensatoru yükləmək üçün sərf olunan enerji kondensator boşaldıqda yenidən dövrəyə qayıdır. Elektron polyarlaşmasının baş vermə müddəti  $10^{-13}$  san-dır.

**İon polyarlaşması** elastiki rabitədə olan ionların yerdəyişməsi nəticəsində baş verir. Bu növ polyarlaşma ani olaraq ( $10^{-13}$  san ərzində) baş verir və geniş diapazonda (infraqırmızı oblasta qədər) tezlikdən asılı deyil. İon polyarlaşması

$$\alpha_i = \frac{2q^2}{\nu} \quad (3.3)$$

ifadəsi ilə təyin olunan  $\alpha_i$  - kəmiyyəti ilə xarakterizə olunur. Burada  $q$  - ionun yükü,  $\nu$  - isə ionlar arasındakı elastiki rabitə əmsəlidir.

İon rabitəli binar kristalların dielektrik nüfuzluğunu hesablamaq üçün Born düsturundan:

$$\varepsilon = n^2 + 4\pi \frac{q^2 dN^2}{\omega^2 M_1 M_2} \quad (3.4)$$

istifadə olunur. Burada  $n$ -materialın optik sındırma əmsalı;  $M_1$ ,  $M_2$ -onu təşkil edən komponentlərin atom kütləsi;  $\omega$  - dairəvi məxsusi tezlik;  $d$ - dielektrikin sıxlığıdır. İon rabitəli kristalların dielektrik nüfuzluğunun temperatur əmsalı müsbət kəmiyyətdir.

**İon-relaksasiya polyarlaşmasında** öz kristalları ilə zəif rabitədə olan ionlar istilik hərəkəti nəticəsində xarici elektrik sahəsinə daxil olaraq elastiki yerdəyişməyə nisbətən daha böyük məsafəyə sürüşə bilir.

Zəif rabitəli ionlar istilik hərəkəti nəticəsində xarici sahənin təsiri ilə yerdəyişərək həcmdə yüklərin paylanmasında asimetriya yaradır. Bu da vahid həcmdə sıfırdan fərqli yekun elektrik momentlərinin yaranmasına səbəb olur. Elektrik sahəsinin təsirini kəsdikdən sonra ion-relaksasiya polyarlaşması tədricən aradan qalxır. Yüksək tezliklərdə bu növ polyarlaşma baş vermir.

**Dipol-relaksasiya polyarlaşması** xarici elektrik sahəsində dielektriki təşkil edən dipolların (molekulların) dönməsi (yönəlməsi) və istiqamətli düzülüşü ilə əlaqədar olub, molekulların istilik hərəkətindən asılıdır. Xaotik istilik hərəkətində olan molekulların dipolları xarici sahə istiqamətində düzüm polyarlaşma effekti yaradır. Xarici elektrik sahəsinin təsiri kəsildikdə bu növ polyarlaşma molekulların istilik hərəkəti nəticəsində aradan qalxır.

Polyarlaşmanın yaranma və yox olma müddəti dipolların (molekulların) relaksasiya müddəti adlanır. Dipol-relaksasiya polyarlaşması

$$\alpha_{d-r} = \frac{\mu^2}{3kT} \quad (3.5)$$

ifadəsi ilə təyin edilən kəmiyyətlə xarakterizə olunur. Burada  $\mu$  - molekulun dipol momenti,  $k$  - Bolsman sabiti,  $T$ -mütləq temperaturdur.

Dipol – relaksasiya polyarlaşmasının başvermə müddəti  $10^{-10} \div 10^{-12}$  san aralığında dəyişir. Bu tip polyarlaşma temperaturun yüksəlməsi və özüllüyün kiçilməsi ilə əvvəlcə artaraq, müəyyən maksimum qiymətə çatır, sonra isə azalır. Müşahidə olunan azalma molekulların istilik hərəkətinin intensivliyinin böyüməsi ilə əlaqədardır. Bununla paralel olaraq dielektrik itkisi də öz maksimum qiymətinə nəzərən kəskin azalır.

Dipol–relaksasiya polyarlaşması xarici elektrik sahəsinin tezliyindən asılıdır və tezliyin azalması ilə asimtotik qaydada elektron polyarlaşmasına yaxınlaşır.

**Elektron-relaksasiya polyarlaşması** istilik enerjisi ilə həyəcanlaşdırılmış elektronların məhdud yerdəyişməsi ilə əlaqədardır. Bu polyarlaşma elektron keçiriciliyinə malik dielektrlərdə (məsələn niobium, kalsium və bariumla aşkarlanmış titan oksidində) özünü biruzə verir.

**Elastik-dipol polyarlaşması** bəzi kristallarda bir nöqtədə fiksə olunmuş dipol molekulların xarici elektrik sahəsinin təsiri altında çox kiçik olmayan bucaq altında dönməsi hesabına baş verir. Ona görə də bu tip polyarlaşmanın qiyməti böyük olmur.

**Nüvə yerdəyişməsi polyarlaşması** xarici elektrik sahəsinin təsiri altında atom və molekullarda nüvənin yerdəyişməsi nəticəsində yaranır. Bu tip polyarlaşma ani ( $10^{-13}$  san müddətində) olaraq baş verir. Elektron polyarlaşması kimi, xarici elektrik sahəsində nüvə yerdəyişmə polyarlaşması da elektrik sahəsinin tezliyindən və temperaturdan asılı deyil.

**Quruluş polyarlaşması** dielektrikin müxtəlif keçiriciliyə malik laylara malik olması və onda həcmi yüklərin yaranması ilə əlaqədardır. Belə polyarlaşma özünü yüksək gərginliklərdə və laylı quruluşlu bərk cisimlərdə göstərir. Belə materiallara getinaksi, tekstaliti və mikaniti misal gətirmək olar. Quruluş polyarlaşması çox yavaş sürətlə gedir.

**Spontan polyarlaşma** xarici elektrik sahəsi olmadıqda da baş verir və elektrik sahəsinin intensivliyindən qeyri-xətti asılı olur. O, temperaturdan asılıdır və müəyyən temperaturda

maksimum qiymət alır. Belə polyarlaşma kristal quruluşa malik dielektriklərə xasdır. Bu dielektriklərdə polyarlaşmış oblastlar (domenlər) mövcuddur və onların qiyməti Küri temperaturuna qədər temperaturdan kəskin asılıdır. Küri temperaturunda ən böyük polyarlaşma təmin olunur və dielektrik nüfuzluğu maksimum qiymətini alır. Yüksək temperaturalarda domenlərdə quruluş dəyişkənliyi baş verdiyindən spontan polyarlaşma aradan qalxır. Bu növ polyarlaşma kiçik sürətlə yaranır və buna görə də elektrik sahəsinin yüksək tezliklərində özünü biruzə vermir. Spontan polyarlaşma prosesi histerezis xassəsinə malikdir və seqnetoelektriklərə xas olan xüsusiyyətdir.

**Qalıq polyarlaşması** xarici elektrik sahənin təsiri kəsiləndikdən sonra dielektriklərdə qalan polyarlaşmadır. Bu xassə yalnız bəzi dielektriklərə xasdır. Sabit maqnitlər öz ətraflarında maqnit sahəsi yaratdığı kimi, həmin növ dielektriklər (elektretlər) də öz ətrafında elektrik sahəsi yaradır və bu sahənin divergenziyası sıfıra bərabər deyil. Elektretlərdən cərəyan mənbəyi kimi istifadə oluna bilər. Bu materiallarda elektrik polyarlaşması aylar və illər ərzində saxlanılır.

### **§ 3.2. Dielektriklərin elektrik keçiriciliyinin əsas növləri**

Dielektriklərin elektrik keçiriciliyinin elektron, ion və milyon keçiriciliyi kimi üç növü var.

**Elektron keçiriciliyi** dielektriklərdə xarici elektrik sahəsinin təsiri altında elektronların yerdəyişməsi ilə əlaqədardır. Belə keçiricilik bir sıra metal oksidlərində, metalların kükürlə birləşmələrində müşahidə olunur. Dielektriklərdəki elektron keçiriciliyi zamanı maddə daşınması hadisəsi baş vermir.

**İon keçiriciliyi** dielektrikdə ionların hərəkəti ilə əlaqədar olan keçiricilikdir. Bu tip keçiricilik bir sıra duzların ərintilərində və məhlullarında, turşularda, qələvilərdə müşahidə olu-

nur. Dielektriklərdə ion keçiriciliyinin mexanizmi molekulların elektrik dissosiasiyası və parçalanması nəticəsində kation (+) və anionların əmələ gəlməsi ilə bağlıdır.

İon keçiriciliyi zamanı maddənin təşkil olunduğu molekulların parçalanaraq ionlara ayrılması (dissosiasiyası), sonradan isə onların elektrodlar üzərində toplanaraq yeni kimyəvi maddənin əmələ gəlməsi (maddə daşınması hadisəsi) baş verir. Bu zaman daşınan maddənin miqdarı dielektrikdən keçən ionların (elektrik yükünün) miqdarı ilə mütənəşib olub, elektroliz hadisəsi haqqında Faradey qanununa tabedir. Ümumi keçiricilik isə kation və anion keçiriciliyinin cəminə bərabərdir.

**Molion elektrik keçiriciliyi** maddədə (dielektrikdə) yüklü kolloid zərrəciklərinin, daha doğrusu molionların hərəkəti nəticəsində baş verən elektrik keçiriciliyidir. Belə keçiricilik kolloid sistemləri olan boyaqlarda, laklarda, emallarda, suspenziyalarda və emulsiyalarda müşahidə olunur. Molion keçiricilik zamanı elektrik dissosiasiyası və maddələrin elektrodlarda toplanması baş vermir. Molionların elektrik sahəsinin təsiri altında hərəkətinə elektroforez deyilir. Molion keçiriciliyə maddənin özüllüyü güclü təsir göstərir.

### § 3.3. Qazların elektrik keçiriciliyi

Zəif intensivlikli elektrik sahəsində qazlar kiçik elektrik keçiriciliyinə malik olur. Bu zaman qazdakı sərbəst ion və elektronların konsentrasiyası  $10^{-2}m^{-3}$ -ə bərabər, cərəyanın sıxlığı isə  $10^{-19} \frac{A}{sm^2}$  tərtibində olur. Qazların elektrik keçiriciliyi bir sıra xarici və daxili amillərin təsirindən asılıdır. Qaz molekullarını ionlaşdıran xarici amillərə misal olaraq qısa dalğalı ionlaşdırıcıları (kosmik, radioaktiv və rentgen şüalarını) göstərmək olar. Bundan əlavə, istilik mənbələri də qaz molekullarının ionlaşmasında mühüm rol oynayır. İonlaşmaya təsir göstərən daxili amil xarici elektrik sahəsinin təsiri hesabına baş verən zərbə ionlaşmasıdır.

Xarici amillərin (ionlaşdırıcının) təsiri ilə yaranan keçiricilik zəif elektrik sahəsində baş versə də, qeyri-müstəqil keçiricilikdir. Çünki ionlaşdırıcının təsiri kəsilmə kimi, bu keçiricilik də yox olur. Güclü elektrik sahəsində baş verən keçiricilik isə zərbə ionlaşması ilə əlaqədar olub, müstəqil xarakter daşıyan keçiricilikdir. Bu halda keçiriciliyi yaradan ionlar, sürətlənmiş sərbəst elektronların neytral qaz molekulları ilə toqquşması nəticəsində yaranır. Müəyyən müddətdən sonra ionlaşdırıcının təsiri altında yaranan ionlaşma prosesi rekombinasiya ilə tarazlaşır. Nəticədə, mühitdə dinamik tarazlıq əmələ gəlir.

Rekombinasiya olunan ionların konsentrasiyası:

$$n_1 = \nu n_0^2 \quad (3.6)$$

Burada  $n_0$  - ilkin ionların konsentrasiyası,  $\nu$  - isə rekombinasiya əmsəlidir. Hava üçün  $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{sm}^3}{\text{san}}$ .

İonlaşma zamanı ionların konsentrasiyası  $n_2$  - olarsa ionlaşma və rekombinasiya prosesləri tarazlaşdığı halda

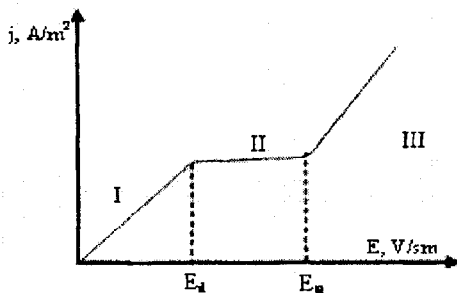
$$n_2 = n_1 = \nu n_0^2 \quad (3.7)$$

və

$$j = n_0 q (\vartheta_+ + \vartheta_-) = n_0 q (\mu_+ + \mu_-) E \quad (3.8)$$

cərəyan sıxlığı çox kiçik olur.

Burada  $\vartheta_+$  və  $\vartheta_-$  - uyğun olaraq müsbət və mənfi ionların sürəti;  $\mu_+$  və  $\mu_-$  isə onların yüyürüklüyüdür.

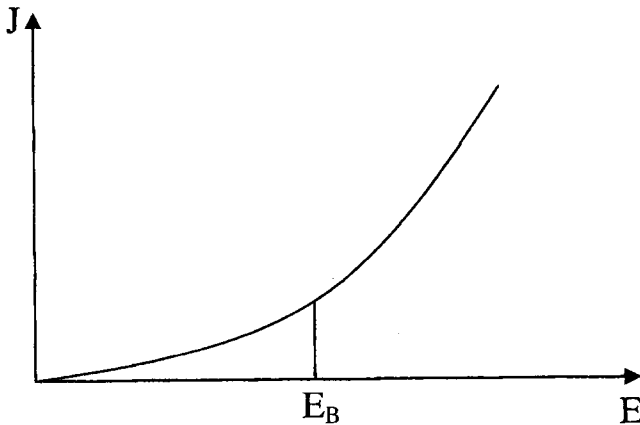


Şəkil 3.1

Əgər baş verən rekombinasiya prosesi ionlaşmaya nisbətən zəif olarsa, əmələ gələn ionların  $n_i = \frac{i}{q}$  konsentrasiyası ilə müqayisədə  $n_2 = \nu n_0^2$  nəzərə alınmaya bilər. Buna görə də zəif elektrik sahələrində cərəyanın sıxlığı elektrik sahəsinin intensivliyi ilə mütənasib olub, Om qanununa tabedir (şəkil 3.1-də I oblast). Yüksək intensivlikli elektrik sahələrində zərbələrlə ionlaşmanın baş verdiyi nöqtəyə qədər cərəyanın sıxlığı xarici elektrik sahələrindən asılı olmur (şəkil 3.1-də II oblast). Bu oblast doyma oblastı adlanır. Daha yüksək intensivlikli elektrik sahələrində (şəkil 3.1.-də III oblast) cərəyanın sıxlığı elektrik sahəsinin intensivliyinin böyüməsi ilə kəskin artır. Bu oblastlar (II və III) arasındakı nöqtə zərbələrlə ionlaşmanın başlanmasına uyğun gəlir.

### § 3.4. Maye dielektriklərin elektrik keçiriciliyi

Maye dielektriklərin elektrik keçiriciliyi məxsusi və aşqar mənşəli ola bilər. Məxsusi keçiricilik molekulların dissosiasiyası nəticəsində yaranan ionların yerdəyişməsi ilə əlaqədardır. Molionların yerdəyişməsi isə aşqar keçiriciliyi yaradır.



Şəkil 3.2

Təmiz qeyri-polyar mayelərin elektrik keçiriciliyi neft yağlarında, poliizobutelin mayelərdə və üzvi silisiumda çox kiçik olub, polyar və dissosiasiya olunan aşqarların miqdarının artması ilə böyüyür. Polyar mayelərin elektrik keçiriciliyi maye molekullarının dissosiasiyası və tərkibindəki aşqarlarla təyin olunur. Bu tip mayelərin elektrik keçiriciliyi, qeyri-polyar mayelərin elektrik keçiriciliyindən böyük olur. Suspenziya və emulsiyalarda molion keçiriciliyi əsas amil olduğundan, kolloid sistemlərdə elektrokinetik potensialı nəzərə almaq lazımdır. Kolloid sistemlərin elektrokinetik potensialı ayrılmış fazaların dielektrik nüfuzluğunun ( $\epsilon_F$ ), mühitin dielektrik nüfuzluğuna ( $\epsilon_m$ ) olan nisbətinə bərabərdir:

$$K = \frac{\epsilon_F}{\epsilon_m}.$$

Maye dielektriklərin xüsusi elektrik keçiriciliyinin temperaturundan asılılığı eksponensial xarakter daşıyır:

$$\sigma = A e^{-\frac{\alpha}{T}}. \quad (3.9)$$

Burada A-mayeni xarakterizə edən əmsal,  $\alpha = \frac{W}{K}$  isə - aktivləşmə enerjisinin Bolsman sabitinə olan nisbətində bərabər olan kəmiyyətdir. Mayelərin elektrik keçiriciliyi onların  $\eta$  - özüllüyündən

$$\sigma = \frac{n_0 q^2}{l \eta} \quad (3.10)$$

şəklində asılıdır. Burada  $l$  - qonşu zərrəciklər arasındakı məsafədir.

Mayelərdə cərəyanın sıxlığının elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılığı şəkil 3.2-də göstərildiyi kimidir. Bu qrafikdən görünür ki, mayelərdə də qazlarda olduğu kimi, volt-ampere xarakteristikasında doyma oblastı yoxdur. Yüksək dərəcədə təmizlənmiş qeyri-polyar mayelərin volt-ampere xarakteristikasında çox da geniş olmayan doyma oblastı müşahidə olunur.

$E \geq 10^4 + 10^5 \frac{V}{sm}$  qiymətlərində isə ionlaşma prosesi baş verir.



### § 3.5. Bərk dielektriklərin elektrik keçiriciliyi

Bərk dielektriklərdə elektrik keçiriciliyi həm maddənin öz ionlarının, həm də tərkibindəki aşqar ionlarının hesabına baş verə bilər.

Maye dielektriklərdə olduğu kimi, bərk dielektriklərdə də ion keçiriciliyində elektrik yükü ilə yanaşı, maddə də daşınır. Bu halda aşağı temperaturlarda elektrik keçiriciliyi materialın özünün zəif rabitədə olan ionlarının və aşqar ionlarının hesabına yaranır. Yüksək temperaturlarda isə keçiricilikdə kristal qəfəsin bütün ionları iştirak edir. Bərk dielektriklərdə elektrik keçiriciliyinin mexanizmi yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi ilə təyin olunur və maye dielektriklərdə olduğu kimi, xüsusi elektrik keçiriciliyi:

$$\sigma = nq \mu . \quad (3.11)$$

Bərk cisimlərdə elektronların yüyürüklüyü ionların yüyürüklüyündən bir neçə tərtib böyük olur. Məsələn, titan üç oksiddə

(TiO<sub>3</sub>) elektronların yüyürüklüyü  $1 \frac{sm^2}{V \cdot san}$  olduğu halda, alumi-

nium-oksiddə ionların yüyürüklüyü  $10^{-12} \frac{cm^2}{V \cdot san}$  – dir.

İon qəfəsli kristal dielektriklərdə elektrik keçiriciliyi ionların valentliyi ilə müəyyən olunur. Məsələn, birvalentli ion maddələrinin keçiriciliyi çoxvalentli maqnezium-oksiddən böyük olur.

Kristalların baş oxu üzrə elektrik keçiriciliyi, həmin oxla perpendikulyar istiqamətdəki keçiriciliyin qiymətindən böyük olur. Kvarsda həmin nisbət 1000-ə çatır. Bu xassə dielektrik kristalın anizotropiyası ilə izah olunur.

Amorf dielektriklərdə cərəyanın sıxlığı ilə onu yaradan xarici elektrik sahəsinin intensivliyi arasındakı mütənəsbilik intensivliyin  $10^4 \div 10^5 \frac{V}{sm}$  qiymətlərinə qədər davam edir. Sahə-

nin intensivliyi bu limit qiymətlərindən böyük olduqda,  $\sigma$  ilə  $E$  arasındakı asılılıq

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta E} \quad (3.12)$$

qanuna tabe olur. Burada  $E$ -elektrik sahəsinin intensivliyi;  $\sigma_0$  – zəif elektrik sahəsində xüsusi elektrik keçiriciliyi;  $\beta$  – isə materialı xarakterizə edən əmsəlidir. Bərk cisimlərdə həcmdəki xüsusi müqavimətin temperaturdan asılılığı

$$\rho = B e^{\frac{b}{T}} \text{ və ya } \rho = \rho_0 e^{-\alpha T} \quad (3.13)$$

şəklində ifadə olunur.

Bu ifadələrdə  $B$ - və  $b$ - materiala xas olan əmsallar,  $\alpha$  – müqavimətin temperatur əmsalı,  $\rho_0$  - isə  $0^\circ\text{C}$ -dəki xüsusi müqavimətdir.

Bərk dielektriklər üçün  $b$ -nin qiyməti 10000-22000 aralığında dəyişir.

### § 3.6. Dielektriklərin elektrik möhkəmliyi və deşilməsi

Dielektrikə tətbiq olunmuş xarici elektrik sahəsinin elə bir qiyməti var ki, həmin qiymətdə dielektrikdə yüksək elektrik keçiriciliyinə malik keçirici kanal yaranır. Bu hadisəyə dielektrikin elektrik deşilməsi deyilir. Dielektrikin elektrik deşilməsinin və ya elektrik möhkəmliyinin pozulması zamanı o, elektroizolyator xassəsini itirir. Materialın elektrik deşilməsinə uyğun gələn konkret bir müqavimətin olduğunu söyləmək olmaz.

Kiçik gərginliklərdə dielektriklərin müqaviməti gərginlikdən asılı olmur. Yüksək gərginlikdə gərginliyin artması ilə cərəyan sıxlığı artır, müqavimət isə eksponensial qanunla azalır. Dielektrikin deşilməsi zamanı cərəyan şiddəti artır, dielektrikdəki gərginlik düşküsü isə kiçilir.

Cərəyanın kəskin artması, gərginliyin isə kiçilməsi dielektrikin deşilməsinə dəlalət edir. Bu zaman qazlarda boşalma

baş verir, maye dielektrlərdə isə – qaynama və qaz ayrılması müşahidə olunur. Bərk dielektrikdə cərəyan şiddətinin artması deşilmə yerində yanmaya, deşiyin əmələgəlməsinə və yüksək keçiriciliyə malik qurumun (hisin) yaranmasına səbəb olur.

Deşilmənin baş verdiyi gərginliyə deşilmə gərginliyi, elektrik sahəsinin uyğun intensivliyinə isə – deşilmə intensivliyi deyilir. Deşilmə intensivliyi materialın elektrik möhkəmliyinin göstəricisidir. Deşilmə intensivliyi deşilmə yerində gərginliyin qalınlığa olan nisbəti ilə təyin olunur.

Deşilmə intensivliyinin qiymətinə elektrodun forması və bununla əlaqədar olan sahənin bircinsliyi, gərginliyin təsir etmə müddəti, cərəyanın növü (elektron, ion), elektrik sahəsinin dəyişmə tezliyi, temperatur, təzyiq, dielektrikin növü təsir göstərə bilər.

Gərginliyin təsiretmə müddətinə görə dörd rejim mövcuddur: gərginliyin 1 kV-a qədər bərabər sürətlə cəld çatdığı rejim; gərginliyin hər pillədə 1-10 dəqiqə dayanmaqla “pilləvari” artdığı rejim;  $10^{10}$ - $10^{11}$  Hs tezlik intervalında yüksək tezlikli gərginlik rejimi; impuls gərginliyi rejimi.

Deşilmə prosesi dielektrikin aqreqat halından asılıdır.

Bərk dielektrikə tətbiq olunan elektrik sahəsinin intensivliyini müəyyən kritik qiymətə qədər artırıqda cərəyanın kəskin artması, yüksək voltlu polyarlaşma, zərbə ionlaşması, dielektrik itkisi və dielektrikin qızması ilə əlaqədar olan ionlaşma prosesi baş verir. Güclü sahədə Om qanunu pozulur. Cərəyanın sıxlığı gərginlikdən asılı olaraq eksponensial qanunla artır, gərginlik düşür, cərəyan isə artır. Bərk dielektrikdən çox güclü cərəyan axdıqda o əriyir və cərəyanın keçdiyi yerdə kanal yaranır.

Dielektrlərin deşilməsinin iki forması mövcuddur: istilik və elektrik deşilməsi.

İstilik deşilməsi halında ətraf mühitin temperaturunun yüksəlməsi, tətbiq olunan gərginliyin davam etmə müddətinin böyüməsi, tezliyin artması və materialın qalınlığının böyüməsi deşilmə intensivliyini kiçildir. Qeyd etmək lazımdır ki, dielek-

trikin istilik deşilməsi istiliyin kənara ötürülməsi zəif olduğu yerdə baş verir.

Elektrik deşilməsinin də bir sıra xarakterik xüsusiyyətləri var. Gərginliyin deşilməyə yaxın qiymətlərində Om qanunu pozulur və cərəyan gərginlikdən:

$$I = I_0 e^{AU}, \quad (3.14)$$

yaxud da

$$I = I_0 e^{B\sqrt{U}} \quad (3.15)$$

şəklində asılı olur. (3.14) və (3.15) ifadələri uyğun olaraq Pul və Frenkel düsturları adlanır. Dielektrikə tətbiq olunan elektrik sahəsinin müəyyən qiymətindən başlayaraq materialdan axan cərəyan sıçrayışla dəyişir (artır). Bu, dielektrikin dağılmasına səbəb olur.

Bərk dielektriklərin deşilmə intensivliyinin qiyməti dar intervalda ( $10^6$ - $10^7 \frac{V}{sm}$ ) yerləşir. Deşilmə gərginliyi müəyyən intervalda ( $10^4$  - $10^5$  sm-ə qədər) nümunənin qalınlığından, sürəkliyi  $10^{-7}$ ÷ $10^{-6}$  san olan impulslarda və qeyri-bircins sahədə isə - temperaturdan asılı olmur. Elektrik deşilməsində deşilmə gərginliyinin qiyməti temperaturdan zəif asılı olur. Qeyri-bircins sahələrdə deşilmə, adətən elektrodların kənarlarında, (sahənin intensivliyinin böyük olduğu yerdə) müşahidə olunur.

Dielektriklərin deşilmə nəzəriyyəsi V.A.Fok, A.F.Valter və N.N.Semenov tərəfindən yaradılmış və eksperimental nəticələrlə müqayisə edilmişdir. Bu nəzəriyyəyə görə istilik deşilməsinin əsas səbəbi dielektrik itkisinin ( $\delta$ ) temperaturdan asılılığıdır:

$$tg \delta = tg \delta_0 e^{\alpha(T-T_0)} \quad (3.16)$$

Bu zaman keçiricilik:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\alpha(T-T_0)} \quad (3.17)$$

Fərz edək ki, dielektrik materialdan qalınlığı 2h olan lövhə hazırlanmışdır. Sadəlik üçün deyək ki, elektrod və lövhənin ölçüsü sonsuz böyükdür, elektrik sahəsi bircinsdir və elektrik itkisi zamanı yaranan istilik seli elektrodların səthinə perpendikulyar yönəlib. İstilik tarazlığı şəraitində ayrılan istilik dielektrikin sətindən gedir. Sabit gərginlikdə bunu

$$\chi(t_d - t_0) = 0,2 E^2 \gamma h, \quad (3.18)$$

dəyişən gərginlikdə isə

$$P_r \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = \chi S (t_d - t_0) \quad (3.19)$$

şəklində ifadə etmək olar. (3.18) və (3.19) ifadələrində U-dielektrikə tətbiq olunan xarici gərginlik,  $P_r$ -reaktiv güc,  $\omega$  - elektrik sahəsinin bucaq tezliyi, C – elektrodlar arasındakı tutum,  $\chi$  - istilikvermə əmsalı  $\left(\frac{Vt}{sm^2}\right)$ , S-dielektriklərin sahəsi,  $t_d$  - dielektrikin temperaturu,  $t_0$  -ətraf mühitin temperaturudur. Dielektrik üçün ümumi halda istilik tarazlığı şərtini

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + \sigma(\operatorname{grad} \varphi)^2 = 0 \quad (3.20)$$

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \varphi) = 0 \quad (3.21)$$

kimi yazmaq olar. Burada  $\varphi$  - potensial,  $\lambda$  - dielektriklərin istilikvermə əmsalı,  $\sigma$  - xüsusi elektrik keçiriciliyidir.

Əgər dielektrik istilik tarazlığı halında olarsa, deşilmə baş verməz. Bu zaman işçi gərginlik

$$U_{is} = \sqrt{\frac{\chi S (t_d - t_0)}{\omega C \operatorname{tg} \delta_b}} \quad (3.22)$$

şəklində ifadə olunur. (3.22) ifadəsindəki  $\operatorname{tg} \delta_b$  - böhran temperaturuna uyğun gələn dielektrik itkisidir. Bu ifadə Fok-Semenov düsturu adlanır. Onu praktiki istifadə üçün

$$U_{pr. eff} = 7.8 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{\lambda}{f \epsilon \alpha \operatorname{tg} \delta}} \varphi(C) \quad (3.23)$$

şəklində yazmaq olar. Burada  $\alpha$  - əmsalı  $\operatorname{tg} \delta$  -nin temperatur əmsalı,  $f$  - tezlik,  $\varphi(C)$  - funksiya,

$$C = \frac{\lambda_1 \sigma h}{2 \lambda (\lambda_1 + \sigma d)}, \quad (3.24)$$

$\lambda_1$  - elektrodların istilikkeçirmə əmsalı,  $d$  - elektrodların qalınlığıdır.

### § 3.7. Dielektrik itkisi

Elektrik cərəyanının gücünün izolyatorda və ya dielektrikdə elektrik sahəsinin enerjisinə və ya istiliyə çevrilməsinə dielektrik itkisi deyilir. Dielektrik itkisi müxtəlif səbəblərdən: sızma, dielektrikdəki boşluqlarda qazların ionlaşması, əvvəlki xarici sahənin yarım periodda yaratdığı daxili sahəni ləğv etməsi nəticəsində baş verə bilər.

Tam elektrik itkisi:

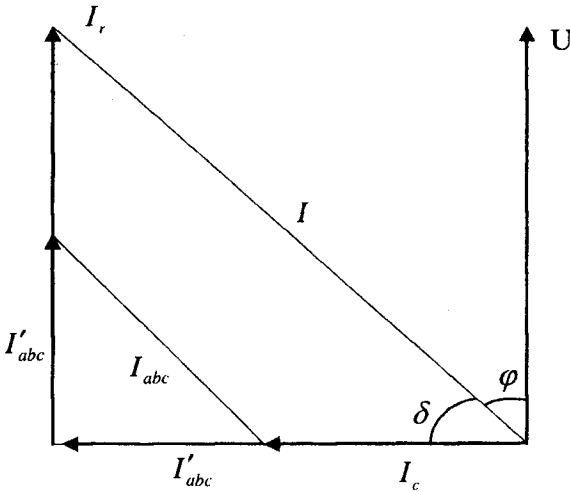
$$P = UI_a = I_r U \operatorname{tg} \delta. \quad (3.25)$$

Əgər burada  $I_r = U \omega C$  - olduğunu nəzərə alsaq ( $C$ -tutum,  $\omega$ -dairəvi tezlikdir):

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta; \operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{I}{Q}. \quad (3.26)$$

Sonuncu ifadədə  $I_a$ - aktiv cərəyan,  $I_r$ - reaktiv cərəyan;  $Q$ - isə keyfiyyət əmsalıdır. Şəkil 3.3-dən görüldüyü kimi,  $U$ -gərginlik vektorunu  $90^\circ$  qabaqlayan  $I_c$ - tutum cərəyanı ilə yanaşı,  $U$  ilə eyni fazada olan  $I_r$ - cərəyanı, eləcə də  $U$  gərginlik vektoru ilə  $90^\circ$ -dən kiçik bucaq əmələ gətirən əlavə  $I_{abs}$  (absorbsiya) cərə-

yanı da var. Keçiriciliklə əlaqədar itki  $f$  - tezlikdən asılı olmasa da,  $tg \delta$  - tezlikdən asılı olaraq azalır:



Şəkil 3.3

$$tg \delta = \frac{1.8 \cdot 10^{12}}{\epsilon f \rho} . \quad (3.27)$$

Burada  $\epsilon$  - materialın dielektrik nüfuzluğu,  $\rho$  - isə xüsusi müqavimətdir.

Bu itki temperaturun yüksəlməsi ilə

$$P_T = Ae^{-\frac{b}{T}} \text{ və yaxud } P_i = P_0 e^{\alpha t} . \quad (3.28)$$

şəklində artır,  $tg \delta$  isə həmin qanunla azalır. Burada  $b$  – verilmiş materiala aid əmsal,  $\alpha$  - itkinin temperatur əmsalıdır.

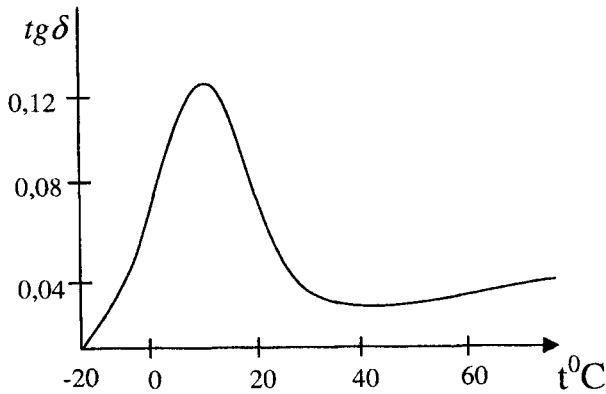
İonlaşma ilə əlaqədar itki, tərkibində qaz olan məsaməli və laylı dielektriklərə xasdır və onu başlanğıc ionlaşma cərəyanına uyğun gərginlikdən böyük və qeyri-bircins sahələrdə müşahidə etmək olar. Bu zaman itki

$$P_a = Af (U - U_0)^3 \quad (3.29)$$

şəklində ifadə olunur. Burada  $A$  –sabit əmsal;  $f$ -elektrik sahəsinin dəyişmə tezliyi;  $U$ -tətbiq olunan,  $U_0$ - isə ionlaşmanın başlanmasına uyğun gələn gərginlikdir.

(3.29) ifadəsi  $U > U_0$  qiymətlərində doğrudur. Dipol-releksasiya polyarlaşması və keçiriciliklə əlaqədar itkinin ( $tg\delta$ ) temperaturundan asılılığı şəkil 3.4 təsvir olunmuşdur.

Bu halda temperaturun yüksəlməsi ilə  $tg\delta$ -in əvvəlcə artaraq özünün maksimal qiymətini alması maddənin özüllüyünün azalması və molekuların dipollarının sahənin təsiri altında fırlanmasının böyüməsi ilə bağlıdır. Nisbətən yüksək temperaturlarda, temperaturun yüksəlməsi ilə itkinin azalması isə (şəkil 3.4) dipolların dönməsinə sərf olunan enerjinin və dielektrikin özüllüyünün kiçilməsi ilə əlaqədardır.



Şəkil 3.4

### § 3.8. Dielektrik materialların təsnifatı

Müxtəlif elektron qurğu və cihazlarında yerinə yetirdikləri funksiyadan asılı olaraq, dielektriklər elektroizolyator materiallarına (passiv dielektriklər) və idarə olunan materiallara (aktiv dielektriklərə) ayrılır.



Elektroizolyator materialları elektrik qurğularında müxtəlif potensiallar altında olan cərəyandaşıyıcı hissələrdə elektrik izolyasiyası yaratmaq üçün istifadə olunur. Passiv dielektriklərdən kondensatorlarda istifadə edilməsi, ilk növbədə tələb olunan tutumun alınmasına imkan verir. Digər tərəfdən bu, tutuma xarici amillərdən asılılıq xarakteri verir. Bir sıra hallarda kondensator sabit və dəyişən cərəyanı ayırmaq və həmçinin faza bucaq sürüşməsi yaratmaq üçün istifadə edilir.

Elektron texnikasında elektroizolyator və kondensator materialları kimi slyuda, keramika, şüşə, polistirool və digər materiallardan istifadə olunur. Lakin elektroizolyasiya və kondensator materiallarına qoyulan şərtlər bir-birindən fərqlidir. Belə ki, əgər elektroizolyator materiallarının nisbi dielektrik nüfuzluğunun kiçik, xüsusi müqavimətinin isə böyük olması tələb olunursa, kondensatorlarda istifadə edilən dielektriklərin nisbi dielektrik nüfuzluğunun böyük,  $tg\delta$  dielektrik itkisinin isə kiçik olması tələb edilir.

Aktiv dielektriklər elə materiallara deyilir ki, onların xassələrini xarici enerji təsirləri vasitəsilə idarə etmək və bu təsirdən istifadə etməklə elektronikanın funksional elementlərini yaratmaq mümkün olsun. Aktiv dielektriklər elektrik və optik siqnalların generasiyasına, gücləndirilməsinə, modulyasiyasına imkan verməklə yanaşı, həm də informasiyanın yaddaşda saxlanılmasında və çevrilməsində istifadə olunur.

Aktiv dielektrik materiallara seqneto-, pyezo- və piroelektriklər, elektretlər, kvant elektronikasının materialları, eləcə də qeyri-xətti optik xassəyə malik olan dielektrik kristallar daxildir. Aktiv dielektrik xassəsinə təkcə bərk cisimlər deyil, həmçinin maye və qaz maddələr, kimyəvi tərkibinə görə isə üzvi və qeyri-üzvi materiallar malik ola bilər. Onlar quruluşuna və xassələrinə görə kristal, amorf, polyar və qeyri-polyar dielektrik qruplarına ayrılır.

Tətbiq sahələrindən asılı olaraq passiv və aktiv dielektriklərə qoyulan tələblər müxtəlif olur. Passiv dielektriklərdən xari-

ci təsirlər zamanı öz xassələrinin dəyişməməsi tələb olunduğu halda, aktiv dielektriklər üçün belə təsirlər zamanı xassələrini kəskin dəyişməsi əsas şərtidir.

### § 3.9. Passiv dielektriklər

Passiv dielektrik materiallar qrupuna xətti polimerlər, kompozisiyalı tozlu palstmaslar və laylı plastiklər, elektroizolyasiya kompaundları, qeyri-üzvi şüşələr, sitallar və saxsı aiddir.

Elektroizolyasiya materiallarının hazırlanmasında üzvi maddələrdən, o cümlədən polimerlərdən, daha doğrusu quruluş baxımından təkrarlanan monomerlərdən ibarət olan yüksək molekullu birləşmələrdən istifadə edilir. Fəza quruluşundan asılı olaraq polimerlər xətti və həcmi olmaqla iki qrupa ayrılır. Zəncirvari ardıcıl təkrar olunan qruplardan ibarət olan makromolekullar xəttidir və bu halda molekulun uzunluğunun onun en kəsiyinə nisbəti  $10^3$  tərtibində olur. Məsələn, polistrol molekulu-nun uzunluğu  $1,5 \cdot 10^{-6}$  m, eni isə  $1,5 \cdot 10^{-9}$  m tərtibindədir.

Xətti polimerlər elastiki olub, əyilə bilər, eləcə də orta temperaturlarda yumşalır və əriyir. Məhz bu səbəbdən də xətti polimerlər termoelastik material adlanır. Molekullararası qarşılıqlı təsirin kiçik olması nəticəsində bu polimerlər həlledicilərdə şişir və həll olaraq özüllü maye əmələ gətirir. Bu da, öz növbəsində onlardan nazik təbəqələrin və liflərin hazırlanmasına imkan verir. Dipol momentinə malik olmayan polimerlər qeyri-polyar polimerlər adlanır. Bu qrupa daxil olan və elektron texnikasında geniş istifadə tapmış polimerlərə polietilen, polistirol və polietraforetilen misal ola bilər. Həmin materialların əsas xassələri cədvəl 3.1-də göstərilmişdir.

Kiçik itkiyə malik olduqlarından, qeyri-polyar polimerlərdən yüksək və ifratyüksək tezliklərdə, elektron texnikasında; polietiləndən televiziya və radiotezliklərdə kabellərin izolyasiyasında; polistirol və polietraforetilen nazik təbəqələrindən isə böyük tutuma və müqavimətə malik termostabil yüksək tezlikli

kondensatorların izolyasiyasında istifadə olunur. Belə təbəqələrin əhəmiyyətli xüsusiyyətlərindən biri də onların elektrik möhkəmliyinin 200-250 MV/m tərtibində olmasıdır.

*Cədvəl 3.1*

Xassələr	Polietilen	Polistirol	Polietraftoretillen (ftoroplast)
Həcmdəki xüsusi müqavimət (Om·m)	$10^{14} \div 10^{15}$	$10^{14} \div 10^{16}$	$10^{14} \div 10^{15}$
Nisbi dielektrik nüfuzluğu	2,3-2,4	2,5-2,6	1,9-2,2
$10^6$ Hs –də dielektrik itkisi ( $tg \delta$ )	0,0002-0,0005	0,0002-0,0004	0,0002-0,0003
Elektrik möhkəmliyi (MV/m)	40-150	20-110	40-250
İstiyə davamlığı ( $^{\circ}C$ )	105-130	75-80	300

Polietilen kimyəvi baxımdan dayanıqlı olduğundan, ondan yarımkeçiricilərin texnologiyasında köməkçi material kimi də istifadə edilir.

### **§ 3.10. Kompozisiyalı tozlu plastmaslar və laylı plastiklər**

İsti presləmə və ya təzyiç altında tökmə üsulu ilə müxtəlif kompozisiyalı tozlu plastmas məmulatları hazırlanır. Belə plastmasların hazırlanmasında əlaqələndirici maddələrdən və aşqarlardan istifadə olunur. Əlaqələndirici material olaraq həcmli və xətti polimerlərdən, aşqar qismində isə - ağac unu, pambıq tullantısı, kvars tozu, azbest və ya şüşə liflərindən istifadə edilir.

Alınmış kütləyə müxtəlif rənglər vermək üçün boya materiallarından, texnoloji keyfiyyətini yüksəltmək üçün isə - plastifikatorlardan istifadə edilir.

Aşqarlar plastmanın mexaniki xarakteristikasının, keyfiyyətinin və elektrik xassələrinin yaxşılaşdırılmasına imkan verir.

Kompozisiyalı plastmaların növlərindən biri də laylı quruluşa malik olan plastik lövhələrdir. Bu halda doldurucu material kimi vərəq formasına malik olan lifli materiallardan istifadə edilir. Laylı plastiklərə misal olaraq getinaksı və tekstoliti göstərmək olar.

Getinaks, fenol-formaldehidi və digər qətran maddələri hopdurulmuş kağız laylarını isti presləmə üsulu ilə alınır. İstehsalat məqsədləri üçün möhkəm və istiyədavamlı formaldehid qətranın sulu suspenziyası hopdurulmuş kağızlardan istifadə olunur. Belə vərəqlər paket şəklində yığılaraq,  $160^{\circ}\text{C}$ -də hidravlik presin köməyi ilə 10-12 MPa təzyiqdə sıxılır. Presləmə zamanı qətran yumşalır və vərəqlərdəki liflərarası boşluqları dolduraraq bərkiiyir. Nəticədə laylı quruluşa malik monolit material əmələ gəlir.

Getinaksın laylı quruluşa malik olması onun fiziki parametrlərinin anizotropiya xassəsini yaradır. Belə ki, bu materialda uzununa (laylar istiqamətindəki) həcmi müqavimət eninə müqavimətdən 50-100 dəfə kiçik olur. Uzununa elektrik möhkəmliyi isə - eninə (laylara perpendikulyar) istiqamətindəkindən 5÷8 dəfə kiçik olur.

Lifli quruluşlu əsas və hopdurulmuş maddə polyar dielektrik xüsusiyyətinə malik olduğundan, getinaks güclü polyar dielektriklər qrupuna mənsubdur. Laylara perpendikulyar istiqamətdə onun elektrik möhkəmliyi 30 MV/m, dielektrik nüfuzluğu  $\varepsilon = 6\div 7$  tərtibində,  $10^6$  Hz tezlikdə dielektrik itkisi isə 0,04÷0,08 aralığında olur. Radioqurgularda aşağı tezliklərdə işləyə bilən sxemlərin hazırlanmasında folqalaşdırılmış getinaxlardan istifadə edilir. Hal-hazırda elektron texnikasının tələblərini ödəyən 10-dan çox müxtəlif növ getinaks istehsal olunur.

Radiosxemlərin hazırlanmasında bir və ya hər iki üzünə nazik mis təbəqə ilə örtülmüş getinaksdan istifadə olunur. Bu zaman əvvəlcə getinaksın səthinə çökdürülmüş mis təbəqə üzərində lazım olan sxem çəkilir və həmin sxemin üzəri kimyəvi davamlı lakla örtülür. Sonra isə kimyəvi aşılama yolu ilə nazik mis təbəqəsinin digər (lakla örtülməmiş) hissələri getinaksın səthindən kənarlaşdırılır və lazım olan sxemin mis təbəqə ilə çəkilmiş tam əksi əldə olunur.

Tekstolit də getinaks kimi plastiki materialdır. Onun hazırlanmasında qətranla hopdurulmuş pambıq-kağız parçalardan istifadə edilir.

### **§ 3.11. Elektroizolyasiya üçün istifadə olunan kompaundlar**

Qətran, bitium, efir, selluloza və digər maddələrin qarışığından ibarət olan materiala kompaund deyilir. Əvvəlcə bu qarışıq qızdırılaraq maye halına, sonra isə soyutma yolu ilə bərk fazaya keçirilir. Belə kompaundlar termokompaundlar adlanır.

Yüksək temperaturun təsirinə həssas olan elementlərdən hazırlanmış qurğularda istifadə edilmə məqsədindən asılı olaraq, hopdurulmuş və tökülmüş kompaundlardan istifadə olunur. Tökülmüş kompaundlar ayrı-ayrı detallarda mövcud olan böyük aralıqları, eləcə də müxtəlif detalların arasındakı boşluqları doldurmaq, nəmlənmədən izolə etmək, deşilmənin qarşısını almaq və mexaniki möhkəmliyin keyfiyyətini yüksəltmək üçün tətbiq edilir.

Termoplastik və termoreaktiv kompaundlar da mövcuddur. Termoplastik kompaundlar qızdırıldıqda əriyir, soyudulduqda isə - bərkiyir. Bunlara misal olaraq bitium kompaundunu göstərmək olar.

Termoreaktiv kompaundlar kimyəvi reaksiya zamanı maye halında alınır və sonradan bərkiyir. Bu kompaundlar təkrar olaraq bərk haldan maye halına keçmir. Detal və cihazları belə

termoreaktiv kompaundla izolə etdikdə, sonradan onları təmir etmək mümkün olmur.

Elektro- və radiocihazların (transformatorların, drosellərin, kondensatorların və s.) izolə edilməsində, eləcə də yarımkeçirici cihazların və inteqral mikrosxemlərin hermetikləndirilməsində kompaundlardan geniş istifadə olunur.

Bir sıra epoksid kompaundlar optik spektrin yaxın infraqırmızı oblastlarında bircins və şəffafdır. Bu səbəbdən də onlardan şüanın işıq mənbələrindən (məsələn, işıq diodlarından) kənara çıxarılması üçün əlaqələndirici kimi istifadə edilir.

### § 3.12. Qeyri-üzvi şüşələr

Şüşə qeyri-üzvi kvaziamorf bərk maddədir. Kimyəvi tərkiblərinə görə şüşələr elementar, halkogenid və oksid şüşələrə ayrılır. Dielektrik xüsusiyyətinə yalnız oksid şüşələr malikdir. Şüşə əmələgətirən oksidlər qrupuna  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  daxildir. Elektron texnikasında daha çox istifadə edilən şüşə  $\text{SiO}_2$  əsasında yaradılmış silikat şüşələridir. Şüşələrə müəyyən fiziki xassələr vermək üçün, bir qayda olaraq onların tərkibinə müxtəlif metalların oksidləri daxil edilir.

Şüşə hazırlamaq üçün xammal olaraq kvras tozu ( $\text{SiO}_2$ ), soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), potaş ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), əhəng ( $\text{CaCO}_3$ ), dolamit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), natrium sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), sülügən ( $\text{Ph}_3\text{O}_4$ ), çöl şpatı ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O}$ ) və s. götürülür.

Texniki tətbiqinə görə şüşələrin elektrovakuum şüşələri, izolyator şüşələri, rəngli şüşələr, lazer şüşələri, işıq ötürücülərdə istifadə olunan şüşələr kimi müxtəlif növləri var.

**Elektrovakuum şüşələrinin** tətbiq sahəsinin təyinedici parametri, onların xətti genişlənməsinin temperatur əmsalıdır. Bu parametr həmin şüşələrin elektrodalara və cihazların metal özüllərinə (gövdələrinə) lehimlənməsində başlıca rol oynayır. Bu məqsədlə istifadə edilən şüşənin xətti genişlənmə əmsalı

( $\alpha_1$ ) lehimləndiyi metalın xətti genişlənmə əmsalı ( $\alpha_2$ ) ilə eyni olmalıdır. Əks təqdirdə, temperatur dəyişdikdə qurğunun şüşədən ibarət olan hissəsində çatlar əmələ gələ bilər. Bundan əlavə, yüksək tezlikli cihazlarda çox kiçik dielektrik itkisinə malik olan şüşələrdən istifadə olunur. Elektrovakuum şüşələri xətti genişlənmə əmsalının qiymətinə görə müxtəlif növlərə ayrılır və markalanır. Metallarda xətti genişlənmə əmsalı ərimə temperaturu ilə sıx bağlı olduğundan şüşələrə çətin əriyən metalları və ərintiləri birləşdirmək olur.

Bu baxımdan elektrovakuum şüşələri aşağıdakı növlərə ayrılır:

Platin şüşələr	( $a_1 = (85 \div 92) * 10^{-7} K^{-1}$ );
Molibden şüşələr	( $a_1 = (46 \div 52) * 10^{-7} K^{-1}$ );
Volfram şüşələr	( $a_1 = (35 \div 42) * 10^{-7} K^{-1}$ ).

Kimyəvi tərkiblərinə görə isə - şüşələr bor-silikat ( $B_2O_3+SiO_2$ ) və alüminium-silikat ( $Al_2O_3+SiO_2$ ) şüşələrə ayrılır. Bu şüşələrə qələvi oksidləri əlavə edilir. Platin, molibden və volfram şüşələr anlayışları, həmin şüşələrin tərkibi ilə deyil, xətti genişlənmə əmsallarının altındakı metalın xətti genişlənmə əmsalına yaxın olması ilə bağlı anlayışlardır. Tərkibindəki qələvi oksidlərinin miqdarı artdıqca şüşələrin xətti genişlənmə əmsalı böyüyür. Elektrovakuum şüşələrinin markalanması zamanı C - hərifindən sonra  $\alpha$  - nın qiyməti və hazırlanma seriyası göstərilir. Məsələn, C89-5 markalı şüşənin xətti genişlənmə əmsalı  $\alpha=89 \cdot 10^{-7} K^{-1}$ , seriyası 5-dir.

**İzolyator kimi istifadə olunan şüşələr** tez metallaşır və onlardan müxtəlif cihazların (məsələn, diodların, tranzistorların və kondensatorların) metal çıxışlarını hermetikləşdirmək üçün istifadə olunur.

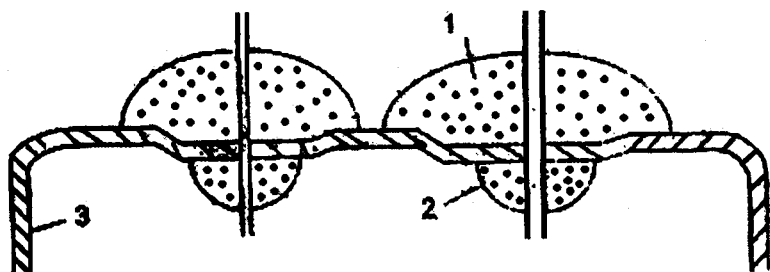
Şəkil 3.5-də gümüş örtüklə (2) örtülmüş şüşə izolyator (1) göstərilmişdir. O, hermetikləşdirilmiş kondensatorun metal örtüyü (3) ilə birləşdirilmişdir.

Diod və tranzistorların metal çıxışları cihazın gövdəsindən kapilyardan hazırlanmış şüşə muncuqlar vasitəsi ilə (1)

izolə edilir. Belə keçid izolyatorlarının düzəldilməsində qələvi-silikat şüşələrdən istifadə olunur.

Adi silikat şüşələr optik spektrin görünən oblastında şəffafdır. Belə şüşələrə daxil edilən aşqarlar şüşəyə müxtəlif rənglər verir. Məsələn, CaO – göy, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – yaşıl, MnO<sub>2</sub> – bənövşəyi, UO<sub>2</sub> – sarı.

Bu xüsusiyyətdən rəngli şüşələr, işıq filtrləri, minalı şüşələrin hazırlanmasında istifadə olunur.



Şəkil 3.5

Şüşələrdən bərk cisim lazerlərində işçi (aktiv) maddə kimi də istifadə olunur. Belə ki, şəffaf matrisada müxtəlif kimyəvi elementlərin müntəzəm paylanmış aktivləşdirici ionları generasiya mərkəzi rolunu oynaya bilər. Şüşələrdə aktivləşdirici aşqarların həllolma dərəcəsi qeyri-məhduddur. Praktikada neodim ionu (Nd<sup>3+</sup>) ilə aktivləşdirilmiş baritdən (BaO-K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>) daha çox istifadə olunur. Lazerlərdə istifadə edilən şüşələrin kristallardan başlıca fərqi, xüsusi alınma texnologiyasına malik olması, optik bircinsliyi və xassələrinin izotropluğuudur. Güclü lazer şüaları almaq üçün bu növ şüşələrdən böyük ölçülü silindrik formalı aktiv (işçi) elementlər düzəldilir.

Lakin aktivləşdirilmiş şüşələrdə spektral xətlər enliləşdiyindən, cihazın çıxışında şüanın tam monoxromatikləşməsi çətinləşir. Bu deyilənlərdən başqa, şüşələr kristallara nisbətən daha kiçik istilikkeçirməyə malikdir. Bu da belə lazerlərin kəsilməz işçi rejimdə işləməsinə əngəl yaradır, çünki işçi element



həddən artıq qızır. Buna görə də şüşələr əsasında lazerlərdən başlıca olaraq, böyük gücə malik impuls şüalanması almaq üçün istifadə edilir.

Ərimiş şüşə kütləsindən xüsusi kiçik yarıqdan keçirməklə və sonradan sürətlə fırlanan diyircəyə sarımaqla yüksək elastikliyə və mexaniki möhkəmliyə malik nazik liflər almaq mümkündür. Diametri 4-7 mkm olan belə liflər çox yüksək elastikliyə malik olduqlarından, xüsusi texnologiya əsasında onlardan parçalar, həmin parçalardan isə borular hazırlanır. Lifli şüşələrdən hazırlanmış izolyator istiliyə dözümlüyü, yüksək mexaniki möhkəmliyi, nəmçəkməkliyi və elektrik izolyasiya xassəsinə malik olması ilə fərqlənir. Belə materialların alınmasında qələvili alüminium-silikatdan, qələvisiz və azqələvili alüminium-bor silikatdan istifadə olunur.

Nazik tel şəklində olan şüşələrdən işıq şüasını mənbədən qəbul edərək ötürmək, eləcə də lifli ötürücülər hazırlamaq üçün istifadə edilir. Ayrı-ayrı şüşə liflər işığı ötürməyən izoləedici örtüklə əhatə olunaraq təcrid edilməklə dəstə şəklində bir yerdə toplanıb işıq ötürücü kabel təşkil edə bilər. İnformasiyanın belə şüşəli liflər vasitəsilə ötürülməsi, digər ötürülmə hallarından kəskin fərqlənir. Bu isə öz növbəsində həmin kabelləri optoelektronikanın əsas elementlərindən biri edir. Lifli optikanın linzalı optikadan başlıca fərqi, onun daha yığcam və dayanıqlı olmasıdır. Belə işıq ötürücülərinin vasitəsilə təsviri məsafəyə əyilən yollarla (trayektoriya ilə) da ötürmək olur. Belə ötürmənin gizliliyi və küyə qarşı davamlılığı onu əvəzolunmaz edir. Işıq şüası belə liflərin daxilində çoxlu sayda əks olunmaya məruz qalsa da, itkisiz istənilən nöqtəyə çatdırıla bilər.

**Saxsı dielektrik materiallar** müasir radiotexnikada çox geniş tətbiq tapıb və onlara böyük tələbat var. Bu növ dielektriklər yüksək dərəcədə istiliyə davamlı olmaqla yanaşı, həm də nəmliyi özündə saxlamaq qabiliyyətinə, yüksək elektrik xassələrinə və möhkəmliyə malikdir. Onlar yüksək enerjili şüalanmanın təsiri ilə öz xassələrini itirmir. Çox vaxt bu materiallar

keramik materiallar adlanır. Keramika sözü “keramos” yunan sözündən əmələ gəlib. Bu sözün mənası küvəc gili deməkdir. Əvvəllər tərkibində gil olan materiallar keramika adlandırılırdı. Hal-hazırda keramika təkcə tərkibində gil olan materiallar deyil, eləcə də xassələri keramikaya bənzər qeyri-üzvi materiallara da aid edilir. Həmin materiallardan müəyyən detallar düzəltəndə bir müddət yüksək temperaturda bişirmək (termik işləmək) lazımdır.

Keramik materiallar bir neçə fazadan ibarət ola bilsə də, onların əsas fazası şüşəvari kristal fazadır. Kristal fazanı müxtəlif kimyəvi birləşmələr və onların bərk məhlulları əmələ gətirir. Keramikanın əsas parametrləri və xüsusiyyətləri dielektrik nüfuzluğu, dielektrik itkisi, xətti genişlənmənin temperatur əmsalı, mexaniki möhkəmlik və bu parametrlərin kristal fazanın xüsusiyyətlərindən asılılığıdır. Şüşəvari faza nazik şüşə təbəqə olub, kristal faza ilə əlaqələnir.

Radiokeramikaların hazırlanmasında kristal əmələgətirə bilən əsas komponentlər olaraq minerallarla yanaşı, kvardan, gil torpaqdan, talkdan, müxtəlif metalların oksidlərindən, karbonatlardan da istifadə edilir.

Texniki tətbiqinə görə keramik materiallar quraşdırma və kondensator keramikalarına ayrılır. Quraşdırma keramikalardan dayaqların, keçidlərin, asılqanların, radioantenna izolyatorlarının, eləcə də lampaların panellərinin, lampadaxili izolyatorların, rezistorların, induktiv makaraların gövdələrinin və peçlərin özlünün hazırlanmasında istifadə olunur. Bundan əlavə, keramika əsasında istehsal olunan kondensatorlar bütün mövcud kondensatorların təqribən 50%-ni təşkil edir.

Keramikalar tətbiq sahəsi və elektrik xassələrinə görə aşağı və yüksək tezlik materialları olurlar.

Aşağı tezlik keramikalarına misal olaraq, farforu göstərmək olar. Onu hazırlayarkən xammal kimi xüsusi növ gildən, kvars tozundan, qələvi çöl şpatından istifadə edilir. Gil yüksək temperatura qədər qızdırılan zaman ona kristallaşma xüsusiyyəti

yəti verən suyu tərkibindən itirir. Çöl şpatının əriməsi nəticəsində kristal dənələrin aralığı şüşəvari faza ilə dolur. Belə şüşəvari fazanın aralığa dolması keramik farforun dielektrik itkisinin kəskin artmasına səbəb olur. Bu da ondan yüksək tezliklərdə istifadə etməyə imkan vermir. İzolyatorun tərkibinə barium oksidini əlavə etməklə aşağı və yüksək tezliklər diapazonunda işləyəbilən radiofarforların hazırlanması mümkündür. Radiofarforun xüsusi həcmi müqaviməti izolyator farforunkundan iki tərtibə qədər böyük olur. Radiofarforun daha təkmilləşdirilmiş variantı ultrafarfordur. Ultrafarfor yüksək tezlikli dielektrikdir. O, yüksək mexaniki möhkəmliyə və kiçik dielektrik itkisinə malikdir.

Tərkibində təqribən 95-99% torpaq-gil olan korunddan ibarət keramika alüminium oksidli keramika adlanır. Bu material 1600 °C-də çox kiçik dielektrik itkisinə malikdir. Alüminium oksidin xüsusi istilikkeçiriciliyi izolyasiya farforunkundan 10-20 dəfə böyükdür.

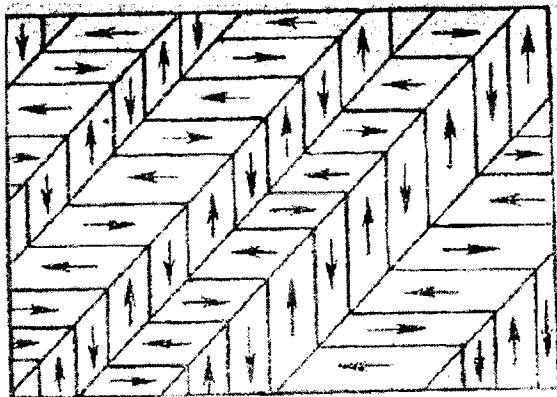
Kondensator keramikası orta ( $\epsilon=10 \div 230$ ) və yüksək ( $\epsilon>900$ ) dielektrik nüfuzluğuna malikdir. 1 MHz tezlikdə dielektrik itkisi 0,0006-dan böyük olmadığı halda, 1000 Hz tezlikdə 0,002-0,025 arasında dəyişir. Birinci halda keramika yüksək, ikinci halda isə - alçaq tezlikli dielektriklərə aid olur. Kondensator keramikası aşağı, kiçik və böyük gərginlikli yüksək tezlikli kondensatorların istehsalında istifadə olunur. Bu halların hamısında dielektrik nüfuzluğunun temperatur əmsalı kifayət qədər kiçik olmalıdır.

### § 3.13. Aktiv dielektriklər

**Seqnetoelektriklər** aktiv dielektriklər arasında özünün rəngarəng xassələrinə görə daha geniş tətbiq tapması ilə fərqlənir. Bu materialda domen adlanan spontan polyarlaşmış irimiqyaslı oblastlar mövcuddur və həmin domenlər xarici elektrik

sahəsinin təsiri altında öz xaosik yönəlmiş elektrik momentlərini nizamlı düzülüşlə əvəz edir.

Seqnetoelektrik monokristallarda domenlərin elektrik momentlərinin nisbətən istiqamətlənməsi kristal qəfəsin simmetriyasından asılıdır. Tetraqonal modifikasiyaya malik olan titanat bariumda ( $\text{BaTiO}_3$ ) spontan polyarlaşmanın altı istiqaməti mövcuddur.



Şəkil 3.6

Domenlərin elektrik sahələri bir-birinə paralel və antiparalel ola bilər. Bu tip seqnetoelektriklər üçün domen sxematik olaraq quruluşu şəkil 3.6-da göstərilmişdir.

Domenin sərhədlərində elektroneytrallığın ödənilməsi enerji baxımından ən ehtimallı hal sayılır. Bu isə o deməkdir ki, domenlərin sərhədinə proyeksiyalanmış polyarlaşma vektorlarının uzunluğu eyni olub,  $10^{-4}$ - $10^{-1}$  sm arasında qiymətlər alır.

Seqnetoelektriklərdə  $D$  – elektrik induksiya vektorunun  $E$ -elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılığında histerezis ilgəyinin müşahidə olunması domenlərin istiqamətlənməsi ilə bağlı enerji itkisinə səbəb olur ki, bu da əlavə dielektrik itki mexanizmi hesabınadır. Histerezis ilgəyinin sahəsi dielektrikdə bir perioddakı səpilmə ilə əlaqədar enerji itkisinin göstəricisidir.

Bu zaman dielektrik itkisi özünün ən böyük qiymətini ( $tg\delta = 0,1$ ) alır.

Polyarlaşmanın elektrik sahəsinin intensivliyindən qeyri-xətti asılılığı və histerezisin mövcudluğu dielektrik nüfuzluğunun və seqnetoelektrikli kondensatorun tutumun iş rejimindən asılı olması ilə əlaqədardır. Materialın dielektrik xassəsini müxtəlif işçi rejimlərdə xarakterizə etmək üçün statistik, reversiv və effektiv dielektrik nüfuzluğundan istifadə olunur.

**Statistik dielektrik nüfuzluğu** ( $\epsilon_{st}$ ) seqnetoelektriklərin histerezis əyrisinin əsas hissəsindən (şəkil 3.7-də OA hissəsi) təyin edilir və

$$\epsilon_{st} = \frac{D}{\epsilon_0 E} = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} \approx \frac{P}{\epsilon_0 E} \quad (3.30)$$

şəklində istifadə olunur.

Dəyişən elektrik sahəsində və eyni zamanda sabit elektrik sahəsinin təsiri altında seqnetoelektrikin polyarlaşmasını xarakterizə edən dielektrik nüfuzluğuna **reversiv dielektrik nüfuzluğu** deyilir.

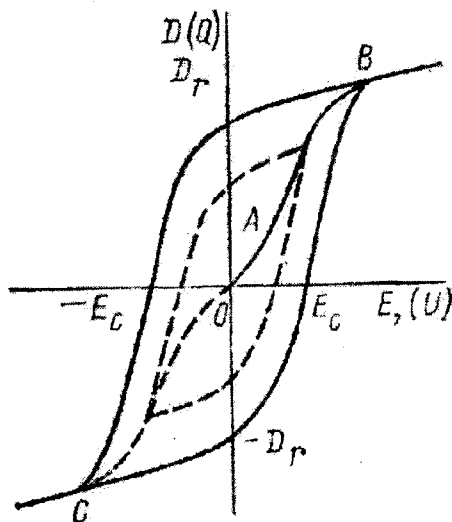
**Effektiv dielektrik nüfuzluğu** və eləcə də kondensatorun tutumu verilmiş  $U$  gərginliyində qeyri-xətti elementdən keçən sinusoidal olmayan cərəyanın  $I$  təsiredici qiyməti ilə müəyyən olunur:

$$\epsilon_{ef} \approx C_{ef} = \frac{I}{\omega U}. \quad (3.31)$$

Xarici elektrik sahəsi domenlərin elektrik momentlərinin istiqamətini dəyişdiyindən, güclü polyarlaşma effekti yaradır. Bu işə öz növbəsində, seqnetoelektriklərin dielektrik nüfuzluğunun çox böyük ( $\epsilon=10^5$ ) qiymət almasına səbəb olur.

Seqnetoelektriklərin domen quruluşu elektrik induksiyanın ( $D$ ) elektrik sahəsinin intensivliyindən ( $E$ ) qeyti-xətti asılılığına səbəb olur (şəkil 3.7)

Zəif elektrik sahələrində  $D$ -nin  $E$ -dən asılılığı (şəkil 3.7-dəki əyrinin OA hissəsi) təqribən xətti xarakter daşıyır. Bu hissədə domenlərin yerdəyişməsi dönən xarakterlidir. Həmin



Şəkil 3.7

əyrinin AB hissəsində domenlərin güclü sahədə düzülməsi (yönəlməsi) isə - dönməyən xarakterlidir. Sahənin bu  $(E)_l$  qiymətində domenlərin istiqamətlənməsi tamamilə başa çatır. Sahənin həmin qiymətinə uyğun gələn B-nöqtəsi birinci texniki doyma nöqtəsi adlanır. Kristalın bu halı domenli vəziyyətə uyğun gəlir. Əyrinin OAB hissəsi seqnetoelektriklərin polyarlaşmasının əsas əyrisi adlanır. Əgər sahənin bu qiymətini azaldaraq sifıra endirmiş olsaq, onda elektrik induksiya kiçilərək müəyyən  $D_q$  qalıq qiymətini alar. Xarici sahənin istiqamətini dəyişib sonra onun qiymətini artırıqda  $D$ -nin qiyməti kəskin şəkildə kiçilməyə başlayar və sahənin müəyyən  $E_k$  - qiymətində sifıra bərabər olar. Elektrik induksiyanın sifıra bərabər olduğu bu nöqtəyə uyğun gələn elektrik sahəsinin qiymətinə **koersitiv qüvvə** deyilir.

Seqnetoelektriklərin yuxarıda adı gedən əlamətdar xüsusiyyətləri müəyyən temperatur diapozonunda özünü göstərir. Həmin temperatur diapozonundan kənarında isə - domen quruluşu dağılır və seqnetoelektriklər **paraelektrik** halına keçir. Bu cür keçid **Küri temperaturunda** ( $T_{kür}$ ) baş verir. Həmin temperaturda spontan polyarlaşma itir və dielektrik nüfuzluğu özünün maksimal qiymətinə çatır, histerezisə uyğun itki yox olduğundan dielektrik itkisi kəskin azalır.

Hal-hazırda seqnetoelektrik xassəsinə malik çoxlu sayda kimyəvi birləşmələr və bu birləşmələrin əsasında hazırlanmış bərk məhlullar mövcuddur.

Seqnetoelektrik kristallar müxtəlif quruluş tipləri əmələ gətirir. Bu, ilk növbədə onlarda spontan polyarlaşmanın əmələgəlmə mexanizmlərinin müxtəlif olmasına dəlalət edir. Spontan polyarlaşma keçidinə uyğun Küri temperaturu bir neçə kelvin dərəcədən ( $Pb_2Nb_2O_7$ -də  $T_k=15K$ ) min kelvin dərəcəyə qədər ( $LiNbO_3$ -də  $T_k=1483K$ ) dəyişə bilər. Spontan polyarlaşmanın qiyməti isə  $10^{-5}$  Kl/m<sup>2</sup>-dan 3 Kl/m<sup>2</sup>-a qədər dəyişir.

Kimyəvi rəbitənin tipindən və fiziki xassələrindən asılı olaraq, seqnetoelektriklər iki qrupa – ion və dipol kristallarına ayrılır. İon seqnetoelektriklərinə titanat barium ( $BaTiO_3$ ), titanat qurğuşun ( $PbTiO_3$ ), niobat kalium ( $LiNbO_3$ ) və s. , dipol kristallarına isə - seqnet duzu ( $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ ), triqlisinsulfat ( $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$ ), nitrit natrium ( $NaNO_2$ ) və digərləri daxildir. İon və dipol seqnetoelektrik kristalları öz xassələrinə görə bir-birindən kəskin fərqlənir. İon kristalları suda həll olmur və yüksək mexaniki möhkəmliyə malikdir. Dipol seqnetoelektrik kristallar isə - suda asanlıqla həll olur və kiçik mexaniki möhkəmliyə malikdir. İon seqnetoelektrik kristallarının Küri temperaturu dipol kristallarıninkinə nisbətən yüksək olur.

Seqnetoelektrik materiallar başlıca olaraq böyük xüsusi elektiktutumlu, kiçikölçülü alçaqtezlikli kondensatorların, kifayət qədər böyük qeyri-xətti polyarlaşmaya malik dielektriklər gücləndiricilərin, modulyatorların, idarəolunan qurğuların, he-

sablama texnikası üçün yaddaş elementlərinin, lazer şüaları modulyatorları və çeviricilərinin, pyezoelektrik və piroelektrik çeviricilərinin hazırlanmasında istifadə edilir.

Seqnetokeramik materialların böyük dielektrik nüfuzluğuna,  $\varepsilon$ -nun temperaturdan, eləcə də  $\varepsilon$  və  $tg\delta$ -nin elektrik sahəsinin intensivliyindən zəif asılılığına, böyük həcmi və səthi müqavimətə, eləcə də yüksək elektrik möhkəmliyinə malik olması, onlardan kondensatorların hazırlanmasında istifadə etməyə imkan verir.

Histerezis ilgəyi düzbucaqlı formada olan seqnetoelektriklərdən elektron hesablama maşınlarında və yaddaş qurğularında da istifadə edilir.

Seqnetoelektrik kristalların qeyri-xətti optik xassələrə malik olması onlardan lazer şüalarının harmonikalarının generasiyasında, optik şüaların tezlik çeviricilərində istifadə etməyə imkan verir.

**Pyezoelektriklər** də aktiv dielektrik materialların maraqlı və praktiki baxımdan əhəmiyyətli bir qrupudur. Pyezoelektriklər mexaniki gərginliyin təsiri ilə polyarlaşmaq, elektrik sahəsinin təsiri altında isə - xətti ölçülərini dəyişmək xassəsinə malikdir. Bu hadisələr uyğun olaraq pyezoelektrik və əkspyezoelektrik effektlər adlanır.

Pyezoelektrik effekt ilk dəfə 1880-ci ildə Küri qardaşları tərəfindən kəşf edilmişdir. Pyezoelektrik effekti zamanı dielektrikin qarşı üzlərində əmələ gələn elektik yükü kristalın mexaniki gərilməsini yaradan qüvvə ilə düz mütənasib olur:

$$Q = d \cdot F \quad (3.32)$$

Burada  $Q$  – dielektrikin səthində yaranan elektrik yükü,  $d$  – pyezomodul,  $F$  – təsir edən mexaniki qüvvədir. (3.32) ifadəsinin hər iki tərəfini qüvvənin təsiri istiqamətindəki səthin ( $S$ ) sahəsinə böldükdə

$$\frac{Q}{S} = d \frac{F}{S} \quad (3.33)$$

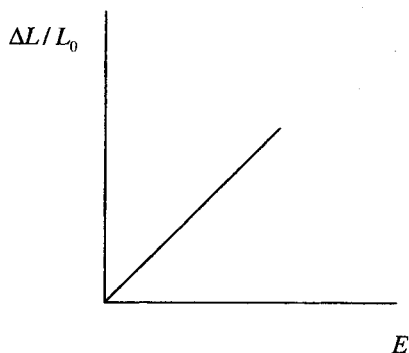


alınır. Burada  $\frac{Q}{S} = q_s$  vahid səthə düşən elektrik yükü (yükün səth sıxlığı),  $\frac{F}{S} = \sigma$  isə mexaniki gərginlikdir. (3.33) ifadəsini

$$q_s = d \cdot \sigma \quad (3.34)$$

şəklində də yazmaq olar. Sonuncu ifadədən görünür ki, pyezomodul ( $d$ ) ədədi qiymətcə dielektrikin səthində vahid təzyiqin təsiri altında yaranan yükə bərabərdir. Bu kəmiyyətin qiyməti təqribən  $10^{-16}$  Kl/N tərtibində olur.

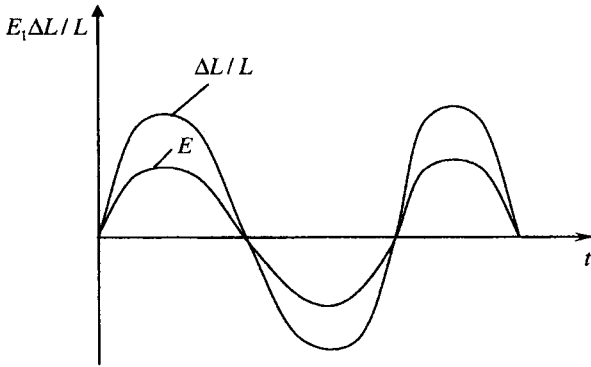
Pyezoelektrik effekti dönən prosesdir. Belə ki, elektrik sahəsinin  $E$  - intensivliyinin dəyişməsi  $\frac{\Delta l}{l_0}$  - nisbi deformasiyanın dəyişməsinə səbəb olur.  $\frac{\Delta l}{l_0}$  -nin  $E$ -dən asılılığı xətti xarakterə malikdir (şəkil 3.8).



Şəkil 3.8

Tərs pyezoelektrik effekt zamanı pyezoelektrikin nisbi deformasiyası ilə onu yaradan elektrik sahəsinin intensivliyi arasında

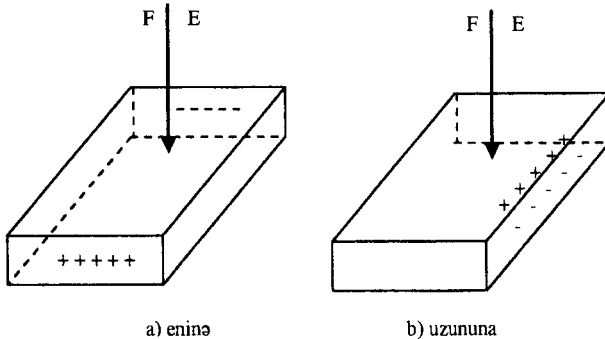
$$\frac{\Delta l}{l} = d \cdot E \quad (3.35)$$



Şəkil 3.9

şəklində asılılıq mövcuddur. Materialın pyezomodulunun qiyməti həm düzünə, həm də tərsinə pyzeoeffekt zamanı eyni qalır. Xarici elektrik sahəsinin istiqaməti dəyişdikdə nisbi deformasiyanın da işarəsi dəyişir (şəkil 3.9).

Pyezoelektrik effekt həm eninə, həm də uzununa ola bilər. Mexaniki gərginliyin və elektrik sahəsinin intensivliyinin təsiri istiqamətinə perpendikulyar istiqamətdə yükün və deformasiyanın yaranması prosesinə eninə (şəkil 3.10), paralel istiqamətdə yükün və deformasiyanın yaranması prosesinə isə - uzununa pyzeoeffekt deyilir.



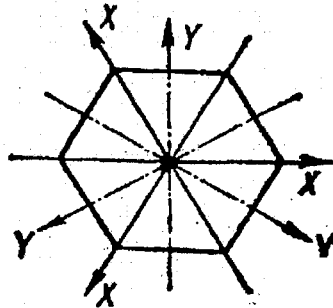
Şəkil 3.10

a) eninə, b) uzununa pyzeoeffektin sxematik təsviri

Pyezoeffekt hadisəsi heteropolyar kimyəvi rəbitəyə malik maddələrdə müşahidə olunur. Buna görə də pyezoelektrlərə ya ion, ya da güclü polyar dielektriklər aiddir. Dielektriklərin quruluşunda mərkəzi simmetriya olmadıqda pyezoeffekt müşahidə olunur. Əks halda deformasiya mənfi və müsbət yüklərin simmetrik yerdəyişməsinə səbəb olur. Bu isə öz növbəsində elektrik momentlərinin yaranmamasına gətirib çıxarır. Pyezoeffektlər yüksək xüsusi müqavimətə malik dielektrik materiallarda müşahidə oluna bilər.

Kifayət qədər yüksək xüsusi elektrik keçiriciliyinə malik dielektriklərdə pyezoelektrik polyarlaşıma sərbəst yük daşıyıcıları vasitəsilə kompensə olunur.

İndiyədək çoxlu sayda materiallarda, o cümlədən seqnetoelektriklərdə pyezoelektrik xüsusiyyəti müşahidə olunmuşdur. Bunların arasında praktiki tətbiqinə görə kvars monokristal xüsusi ilə seçilir. Pyezoxüsusiyyəti  $573^{\circ}\text{C}$ -də dayanıqlı olan  $\beta$ -kvarts da vardır. Daha yüksək temperaturlarda quruluşunun tipi dəyişdiyindən onun pyezoxüsusiyyəti itir. Təbii şəffaf kvarts kristal altı üzlü prizma formasına malik olduğundan, daxili simmetriyaya malikdir. Kvars kristalında düzbucaqlı koordinat sistemi əmələ gətirən üç əsas baş ox vardır (şəkil 3.11). X – oxu kristalın altıbucaqlı en kəsinin təpə nöqtələrindən keçir və elektrik oxu adlanır. Y – oxu altıbucaqlının tərəflərinə perpendikulyar olub mexaniki ox adlanır. X və Y oxlarının hər birinin sayı üçə bərabərdir. Kristalın təpəsindən keçən Z – oxu optik ox adlanır.



Şəkil 3.11.

Z oxuna perpendikulyar istiqamətdə kəsilmiş lövhələrdə pyzeoeffekt müşahidə olunmur. X oxuna perpendikulyar istiqamətdə kəsilmiş lövhələrdə isə maksimal yük ayrılır. Kvarsın pyzomodulunun qiyməti  $d_e=2,3 \cdot 10^{-12}$  K1/N.

Metal elektrodlara malik olan müstəvi paralel kvars lövhə pyzoelektrik rezonator, başqa sözlə, rezonans tezlikli rəqs konturu rolunu oynayır. Kvars rezonatorun əsas üstünlüyü onun  $tg\delta$  dielektrik itkisinin kiçik, mexaniki keyfiyyətinin isə - yüksək olmasıdır. Belə rezonatorlarda rəqslər yaratdıqda o uzun müddət davam edir (sönmür).

Kvars rezonatorlarının yüksək keyfiyyətə malik olması onlardan əla seçicilik qabiliyyətinə malik filtrlər kimi, eləcə də generatorların tezliklərini stabilləşdirmək və etalonlaşdırmaq üçün istifadə etməyə imkan verir. Belə pyzoelementlərə qoyulan başlıca şərt, temperaturdan asılı olaraq rezonans tezliyinin minimal dəyişməsidir. Bu tələbi yerinə yetirmək üçün lövhələr baş oxa nəzərən bucaq altında kəsilməlidir. Təbii kvars ilə yanaşı, hidrotermal üsulla süni kvars da almaq mümkündür.

Litium sulfatdan ( $Li_2SO_4 \cdot H_2O$ ), seqnet ( $LiTaO_3$ ) duzlarından, dihidrofosfat ammoniumdan, niobat  $LiNbO_3$  və tantalat litiumdan da pyzoelektrik kimi istifadə olunur.  $LiNbO_3$  və  $LiTaO_3$  seqnoelektriklərində pyzoelektrik xassəsi yaratmaq üçün onları Küri temperaturundan aşağı temperaturlarda güclü elektrik sahəsində bişirmə üsulu ilə monodomen halına keçirmək lazımdır.

Pyzoelektrik material kimi seqnoelektrik keramikadan geniş istifadə olunur. Polyarlaşmış seqnetokeramikadan pyzoelektrik çeviricilərin hazırlanmasında istifadə olunur və bunlar pyzokeramika adlanır.

Pyzokeramik materialları hazırlamaq üçün  $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ -in bərk məhlulundan da istifadə olunur. Belə pyzokeramikadan hidroakustikada, defektoskopiya, materialların mexaniki işlənməsində və güclü ultrasəs şüalanma mənbələrinin düzəldilməsində istifadə olunur. Pyzokeramik elementlərdən

həmçinin təzyiq, deformasiya, təcil və vibrasiya qeydedicilərinin düzəldilməsində də istifadə edilir. Pyezokeramika əsasında yüksək gərginlikləri əldə etmək üçün pyezotransformatorlar düzəldilir. Bunun üçün pyezokeramik lövhənin bir yarısı qalınlığa görə, digər yarısı isə lövhənin uzunluğuna görə polyarlaşdırılır. Belə transformatorlar 10-150kHz diapazonunda işləyə bilər. Yüksək tezliklərdə onların ölçüləri kiçik, aşağı tezliklərdə isə böyük olur. Pyezokeramik transformatorlar elektron-şüa bollarınının, qazboşalma lampalarının, Heyger sayğaclarının sxemlərində yüksəkvoltlu impulsların alınmasında istifadə olunur.

Əslən alman olan rus akademiki Frans Epinus turmalin kristalını qızdırarkən onun üzərində elektrik yüklərinin əmələ gəlməsini müşahidə etmişdir. Bu hadisə, yəni temperaturdan asılı olaraq dielektriklərin spontan polyarlaşması piroelektrik effekt, bu xassəyə malik dielektriklər (materiallar) isə - piroelektriklər adlandırılmışdır. Piroelektrik effekt kəmiyyətcə

$$-dP_{sp} = p \cdot dT \quad (3.36)$$

şəklində ifadə olunur. Burada  $P_{sp}$  - dielektrikin spontan polyarlaşması,  $p$  - isə piroelektrik əmsəlidir.

Spontan polyarlaşmanın ( $P_{sp}$ ) dəyişməsi nəticəsində dielektrikin səthində sərbəst elektrik yüklərinin əmələ gəlməsi qapalı dövrdə cərəyanın yaranmasına səbəb olur. Həmin cərəyan:

$$i = -S \cdot \frac{dP_{sp}}{dt} = S \cdot \bar{P} \frac{dT}{dt} \quad (3.37)$$

Burada  $S$ -piroelektrikin səthinin sahəsi,  $\frac{dP_{sp}}{dt}$  - spontan polyarlaşmanın,  $\frac{dT}{dt}$  - isə temperaturun dəyişmə sürətidir.

Temperaturdan asılı olaraq spontan polyarlaşmanın dəyişməsi iki səbəbdən- elementar dipol momentlərinin nizamlı düzülüşünün və baş verən deformasiyanın dielektrikin xətti ölçülərini və pyezoelektrik polyarlaşmasını dəyişməsi hesabına baş

verir. Piroelektrik əmsalı ( $\bar{P}$ ) hər iki amili nəzərə alır. Piroelektrik materialların keyfiyyəti

$$R = \frac{\bar{P}}{\epsilon c} \quad (3.38)$$

şəklində təyin olunan gətirilmiş fiziki kəmiyyətlə xarakterizə edilir. Burada  $\epsilon$  – dielektrik nüfuzluğu,  $c$ -isə xüsusi istilik tutumudur.  $R$ -in qiyməti böyük olduqca piroelektrik effekti də güclü olur.

Turmalin ( $\text{Li}_2\text{SO}_4$ ) və seqnetoelektrik materialların hamısı piroelektrik xassəsinə malikdir. Turmalin tipli xətti dielektriklərdə spontan polyarlaşmanın istiqaməti seqnetoelektriklərdən fərqli olaraq, elektrik sahəsinin təsiri ilə dəyişmir.

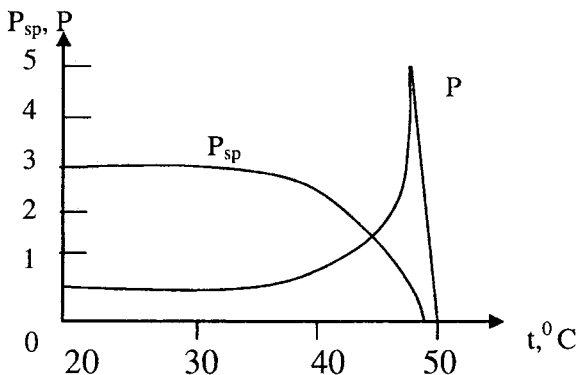
Seqnetoelektriklərdə piroelektrik xassəsi onların monodomenləşmiş halında müşahidə olunur. Bu halda domenlərin hamısının spontan polyarlaşması eyni istiqamətə malik olur. Seqnetoelektriklərin monodomenləşmiş halını almaq üçün onları Küri temperaturundan aşağı temperaturda sabit elektrik sahəsinin təsiri altında saxlamaq lazımdır. Termodinamik nəzəriyyəyə görə, seqnetoelektriklərin polyarlaşmasının temperaturdan asılılığı

$$P_{sp} = A \cdot \sqrt{T_k - T_0} \quad (3.39)$$

ifadəsi ilə təyin olunur. Burada  $A$ -materialı xarakterizə edən sabitdir. Bu ifadədən görüldüyü kimi, faza keçidinin baş verdiyi temperatura ( $T_k$ ) yaxınlaşdıqca, piroelektrik əmsalının qiyməti artır:

$$P = \frac{dP_{sp}}{dT} = \frac{A}{2\sqrt{T_k - T_0}} \quad (3.40)$$

Spontan polyarlaşmanın və piroelektrik əmsalın temperaturdan asılılığı qrafiki olaraq şəkil 3.12-də təsvir edildiyi kimidir.



Şəkil 3.12.

$h$  - qalınlığa malik olan piroelektrik lövhənin  $\Delta t^{\circ}\text{C}$ -qədər qızdırılması nəticəsində onun səthində əmələ gələn  $U$  – potensiallar fərqi:

$$U = \frac{P\Delta t \cdot h}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (3.41)$$

Seqnoelektrlərdə piroelektrik effektinin böyük olması onların əsasında istilik qeydedicilərinin, eləcə də infraqırmızı və ifrat yüksək tezlikli şüalanma enerjisi qeydedicilərinin düzəldilməsinə imkan verir. Şəkil 3.12-dən görüldüyü kimi, piroelektrik əmsali özünün maksimal qiymətini Küri temperaturunda alır. Belə seqnetoelektrik materiallara misal olaraq, niobat barium stronsiumu ( $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{O}_6$ ) göstərmək olar. Bu material üçün piroelektrik əmsalının qiyməti  $(4 \div 28) \cdot 10^{-4} \text{ KJ/m}^2\text{K}$  tərtibindədir.

Piroelektrik effekt bir sıra polimer materiallarda da müşahidə olunur. Polivinildenftorid və polivinildenxlrid belə polimerlərə aiddir. Alınma texnologiyasının sadəliyi və istənilən ölçüdə nümunələrinin hazırlana bilməsi bu materiallara marağı artır.

### § 3.14. Elektretlər

**Elektretlər** xarici elektrik sahəsinin təsiri kəsildikdən sonra polyarlaşmış halını uzun müddət saxlamaqla yanaşı, həm də ətraf mühətdə elektrik sahəsi yaradan dielektriklərdir. “Elektret” terminini ilk dəfə ingilis fiziki Xeyvisayd 1896-cı ildə təklif etmişdir. 1922-ci ildə isə yapon fiziki Motorato Equci palma mumu ilə kanifol qarışığının məhlulunu  $E > 10^6 \frac{V}{m}$  elektrik sahəsində soyutmaqla elektret almışdır. Elektreti almaq üçün müxtəlif texnoloji üsullar mövcud olsa da, bunların hamısının əsasında dielektriki müəyyən müddət ərzində güclü elektrik sahəsində saxlamaq durur. Elektretlərin termoelektret, fotoelektret, psevdoelektret və mexanoelektret kimi müxtəlif növləri mövcuddur.

Qızdırılmış dielektriki güclü elektrik sahəsində soyutmaq yolu ilə alınan elektretə termoelektret deyilir. Fotokeçiriciliyə malik bəzi materialları (S, CdS, ZnS və s.) işığın təsiri altında güclü elektrik sahəsində yerləşdirildikdə fotoelektret əldə edilir. Fotoelektretlər qaranlıqda uzun müddət elektrik yükünü özündə saxlamaq xassəsinə malikdir. Otaq temperaturunda yalnız elektrik sahəsinin təsiri altında elektret xassəsi əldə edən materiallara elektroelektretlər deyilir. Elektrik sahəsi olmadıqda belə, radioaktiv şüalanmanın təsiri altında səthində elektrik yükü əmələ gələn elektretlər psevdoelektretlər, deformasiya nəticəsində elektret xassəsi əldə edən polimerlər isə - mexanoelektretlər adlanır. Aşağı təzyiqlərdə tacvarı boşalma zamanı dielektriklərin yüklənməsi asanlaşır. Bu yolla elektret xassəsi qazanan dielektriklərə tacelektretlər deyilir.

Səthində polyarlaşdırıcı elektrodun işarəsinə uyğun yük əmələ gələn elektret homoyüklü, əks işarətli yük əmələ gələn elektret isə - heteroyüklü elektret adlanır.

Təcrübələr göstərir ki, yaranmış yüklər homoyüklü elektretin səthində heteroyüklü elektretdəkinə nisbətən daha uzun



müddət saxlanılır. Müxtəlif elektretlərin səthində yaranan yüklərin sıxlığı  $10^{-6} \div 10^{-4} \text{ Kl/m}^2$  intervalında dəyişir. Polyarlaşdırın sahənin  $E_p < 0,5 \frac{mV}{m}$  qiymətlərində heteroyük,  $E_p > 1 \frac{mV}{m}$  qiymətlərində isə - homoyük yaranır.

Üzvi polyar elektretlərdə heteroyüklər, qeyri-üzvi materiallarda, (məsələn keramikalarda və üzvi qeyri-polyar dielektriklərdə) isə homoyüklər əmələ gəlir. Homoyüklər elektretin yalnız səthində, heteroyüklər isə - bütün həcmində yaranır. Elektretlərin yaşama müddəti on illər boyu davam edə bilər. Bu müddətin qiyməti temperaturdan və rütubətdən asılı olaraq azalır.

Hal-hazırda praktikada geniş tətbiq tapan elektretlər politetraftoretin, polietilentereftalat, polikarbonat və polimetilmetakrilat polimer nazik lövhələr əsasında hazırlanır.

Elektreti metal lövhələrin arasında yerləşdirdikdə (şəkil 3.13) induksiya nəticəsində onda yaranan elektrik yükünün miqdarı:

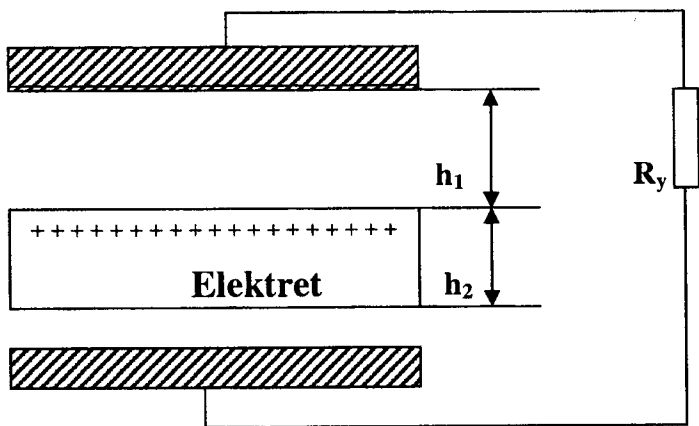
$$Q_{ind} = \frac{Q}{\frac{\epsilon h_1}{h_2} + 1} \quad (3.42)$$

Burada  $Q$  – elektretin səthində olan elektrik yüküdür.  $h_1$  – aralığın enini dəyişdikdə induksiyaalan yükün qiyməti də dəyişir.

$h_1$  – aralığın enini periodik qanunla dəyişdikdə elektrodlar arasındakı dövrədən tezliyi aralığın eninin dəyişmə tezliyinə bərabər olan dəyişən cərəyan axır. Elektret-elektrod sisteminin daxili müqaviməti böyük ( $10^7$ - $10^8 \text{ Om}$ ) olduğundan cərəyan xarici yük müqavimətindən ( $R_y$ ) asılı olmur. Beləliklə, şəkil 3.13-də təsvir olunan qurğu dəyişən cərəyan generatoru, daha doğrusu çeviricisi rolunu oynayır. Belə çeviricilərdə bir qayda olaraq qalınlığı  $3 \div 20 \text{ mm}$  olan nazik polimer lövhədən istifadə edilir.

Elektretlərdən mikrofon və telefonların hazırlanmasında, mexaniki vibrasiyanın, atmosfer təzyiqinin və rütubətin ölçülməsində də istifadə edilir.

Elektretlər, həmçinin elektrometrlərin, klavişli hesablama maşınlarının hazırlanması və elektrofotografiya üçün də əvəzolunmaz materialdır.



Şəkil 3.13

## IV FƏSİL

### YARIMKEÇİRİCİLƏR

#### § 4.1. Ümumi məlumat

Xüsusi müqavimətinin qiyməti keçiricilərlə dielektriklərin xüsusi müqavimətlərinin qiymətləri aralığında (adətən  $10^{-6}$ – $10^8$  Om·m intervalında) yerləşib, fiziki xassələri xarici təsirlərdən (temperatur, işıq, elektrik və maqnit sahələri, ionlaşdırıcı şüalar və s.), daxil edilmiş aşqarların miqdarından və kimyəvi təbiətindən güclü asılı olan maddələrə yarımkeçirici deyilir. Yarımkeçiricilər kimyəvi tərkibinə görə sadə (bəsit) və mürəkkəb olur. Sadə təmiz yarımkeçiricilərin qəfəsi (matrisası) eyni bir kimyəvi elementin, mürəkkəb yarımkeçiricilərin matrisası isə - iki və daha çox müxtəlif kimyəvi elementin atomlarından təşkil olunur.

İstər sadə, istərsə də mürəkkəb yarımkeçiricilərə aşqar daxil etməklə onların xüsusi elektrik keçiriciliyinin qiymətini, əksər hallarda isə həm də tipini dəyişmək olur. Sərbəst yükdaşıyıcılardan elektronlar üstünlük təşkil edən (sərbəst elektronların konsentrasiyası böyük olan) yarımkeçiricilər “n”-, deşiklər üstünlük təşkil edən yarımkeçiricilər isə - “p”- tip yarımkeçiricilər adlanır. Müxtəlif tip keçiriciliyə malik yarımkeçiricilərin kontaktında elektron-deşik keçidi (p-n keçid) yaranır. Bu keçidlər əksər hallarda yarımkeçirici cihazların əsasını təşkil edir.

Yarımkeçirici cihazların tətbiq sahəsi, imkanları və keyfiyyəti ilk növbədə istismar olunduğu temperatur və təzyiq diapazonundan, işçi materialda qeyri-əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyasından, yüyürlüklüyündən, yaşama müddətindən, difuziya uzunluğundan, həmin materialın təmizlik və bircinslik dərəcəsiindən, fotokeçiriciliyinin spektral paylanmasıından, ayrı-ayrı fiziki parametrlərinin radiasiyaya qarşı davamlığıından, elektrik və maqnit sahəsinə həssaslığıından, effektiv şüalanma enerjisinin qiymətindən və s. asılıdır.

Aşqar keçiriciliyi aşağı temperatur diapazonunda üstün rol oynadığından, yüksək temperaturlarda p-n keçidli cihazların (diod, tranzistor, tristor və s.) normal işi pozulur. Yarımkeçirici cihazların maksimal işçi temperaturu işçi materialın qadağan olunmuş zonasının eni və ya aşqar səviyyələrin enerji dərinliyi ilə təyin olunur. Hal-hazırda müasir texnologiyaların köməyi ilə yarımkeçirici cihazların işçi temperaturunu  $500^{\circ}\text{C}$ -ə qədər yüksəltmək olur.

Bipolyar tranzistorların tezlik xarakteristikası, ilk növbədə sərbəst elektron və deşiklərin baza oblastındakı yüyürüklünün qiyməti ilə müəyyən olunur və yüyürüklük böyük olduqda tranzistorun maksimal generasiya tezliyi də böyük olur. Bipolyar tranzistorları hazırlamaq üçün qeyri-əsas yükdaşıyıcıların diffuziya uzunluğunun ( $L_0$ ) optimal qiymətə malik olduğu yarımkeçirici materiallardan istifadə etmək lazımdır və  $L_D$  – tranzistorun baza oblastının qalınlığından böyük olmalıdır. Tranzistorlardan impuls sxemlərində istifadə edildikdə injeksiya olunmuş yükdaşıyıcıların sorulma müddətini minimuma endirmək üçün, işçi materialda qeyri-əsas yükdaşıyıcıların yaşama müddətini kiçiltmək lazımdır. Bu isə öz növbəsində həmin materialda qeyri-əsas yükdaşıyıcıların diffuziya uzunluğunun kiçik qiymətə malik olmasına səbəb olur.

Yarımkeçirici elektronikasının əsas məsələlərindən biri, tranzistorun kollektor keçidinin və diodun p-n keçidinin deşilmə gərginliyinin böyük olmasını təmin etməkdir. Bu isə öz növbəsində cərəyan sıxlığının p-n keçidin hər yerində eyni olmasını tələb edir. Yarımkeçirici materiallarda makroqeyribircinsliyin və defektlərin mövcudluğu keçidin deşilmə gərginliyinin kiçilməsinə səbəb olur.

Çıxışında böyük gücə malik ifrat yüksək tezlikli elektrik rəqsləri alınan generatorların hazırlanması üçün, işçi materialda ona tətbiq edilən xarici elektrik sahəsinin müəyyən qiymətində sərbəst elektronların müxtəlif enerji minimumları (enerji vadiləri) arasında keçidinin baş verməsini təmin etmək lazımdır. Bu məqsədlə istifadə olunan yarımkeçiricilər çox minimumlu ener-

ji-zona quruluşuna malik olmaqla yanaşı, həm də əsas minimumdakı hal sıxlığı və yükdaşıyıcıların effektiv kütləsi böyük enerjiyə uyğun əlavə minimumdakından böyük olmalıdır.

Fotorezistor, fotodiod və fotoelementlərin hazırlanmasında qadağan olunmuş zonasının eni və fotokeçiriciliyinin spektral xarakteristikaları müxtəlif olan yarımkeçirici materiallardan istifadə etmək lazımdır. Bu məqsədlə çox komponentli bərk məhlullardan istifadə etmək daha məqsədəuyğundur. Belə materiallarda ayrı-ayrı komponentlərin faizlə miqdarını dəyişməklə, fotokeçiriciliyin spektral xarakteristikasının maksimumun yerini (uyğun gəlidiyi dalğa uzunluğunu) dəyişmək olur. Fotohəssas və çevirici yarımkeçirici materialların kosmik aparatların göyertəsində istifadə edilməsi üçün onların radiasiyaya qarşı davamlılığı əsas şərtlərdən biridir.

Həyəcanlandırılmış elektron sistemlərinin elektromaqnit enerjisini effektiv şüalandırması çox böyük praktiki əhəmiyyətə malikdir. Bu xassədən istifadə edərək yarımkeçirici işıq diodları və optik kvant generatorları (lazerlər) düzəltmək mümkündür. Belə cihazlar hazırlanarkən istifadə edilən işçi materiallarda yükdaşıyıcıların rekombinasiya şüalanmasının ehtimalı, qeyri-şüalanma xarakterli rekombinasiyasının ehtimalından üstün olmalıdır.

Termistor, varikap, tenzorezistor, termoelement, termoelektrik generatoru və soyuducularının hazırlanmasında istifadə olunan yarımkeçirici materiallara isə başqa tələblər qoyulur.

#### **§ 4.2. Məxsusi və aşqar yarımkeçiricilər**

Metallarda olduğu kimi, yarımkeçiricilərdə də elektrik cərəyanı sərbəst yükdaşıyıcıların dreyfi ilə əlaqədardır. Yarımkeçiricilərdə sərbəst yükdaşıyıcıların əmələ gəlməsi onların kimyəvi təmizliyindən və temperaturundan asılıdır. Təmizlik dərəcəsindən asılı olaraq bu materiallar məxsusi və aşqar yarımkeçiricilərə ayrılır.

Baxılan temperaturda aşqarın təsiri nəzərə alınmaya bilən yarımkeçirici məxsusi yarımkeçirici adlanır. Mütləq sıfır temperaturuna yaxınlaşdıqca məxsusi yarımkeçirici özünü daha çox dielektrik kimi aparır. Mütləq sıfır temperaturundan fərqli bütün temperaturalarda keçirici zonada sərbəst yükdaşıyıcıların yaranma ehtimalı var və temperatur yüksəldikcə bu ehtimal artır. Məxsusi yarımkeçiricidə keçirici zonada sərbəst elektronların yaranması ilə valent zonada da dəşiklər əmələ gəlir və hər iki tip sərbəst yükdaşıyıcılar elektrik keçiriciliyində iştirak edir. Dəşiklər müsbət elektrik yükünə və effektiv kütləyə malikdir. Yarımkeçiricidə qadağan olunmuş zonanın eni nə qədər kiçik və temperatur nə qədər yüksək olarsa, sərbəst yükdaşıyıcıların generasiyasının intensivliyi də bir o qədər böyük olur. Yarımkeçiricidə generasiya prosesi ilə yanaşı, rekombinasiya prosesi də gedir. Bu iki prosesin yanaşı getməsi istənilən temperaturda dinamik tarazlığın yaranmasına səbəb olur. Məxsusi yarımkeçiricilərin əsas xüsusiyyətlərindən biri, termodinamik tarazlıq halında onlarda sərbəst elektronların ( $n_1$ ) və dəşiklərin ( $p_1$ ) konsentrasiyasının bərabər olmasıdır:

$$n_i = p_i, n_i + p_i = 2 n_i . \quad (4.1)$$

Nəzəri hesablamalar göstərir ki, bu halda:

$$n_i = p_i = \sqrt{N_k N_v} \cdot e^{-\frac{\Delta E_0}{2KT}} . \quad (4.2)$$

Burada  $N_k$ ,  $N_v$  – uyğun olaraq keçirici və valent zonada enerji hallarının effektiv sıxlığı,  $\Delta E_0$ -isə qadağan olunmuş zonanın enidir.

Xarici elektrik sahəsində məxsusi yarımkeçiricidə sərbəst yükdaşıyıcıların hərəkəti istiqamətlənmiş xarakter alır - məxsusi elektrik keçiriciliyi yaranır.

Elektrik keçiriciliyində aşqarlar hesabına yaranan keçiricilik üstünlük təşkil edən yarımkeçiricilərə aşqar yarımkeçirici deyilir. Aşqarlar yarımkeçiricinin qadağan olunmuş zonasında əlavə lokal enerji səviyyələri yaradır. Aşqar atomu kristal qəfə-

sin, düyün nöqtələrində əsas atomu əvəz etdikdə belə aşqar əvəzedici, düyün nöqtələri aralığında yerləşdirdikdə isə - daxil edilmiş aşqar adlanır. Aşqar rolunu müxtəlif növ nöqtəvi defektlər də oynaya bilər. Keçirici zonada sərbəst elektronlar yada bilən aşqarlar donor, valent zonasından elektronları tutan aşqarlar isə - akseptor adlanır. Elektronun donor səviyyəsindən keçirici zonaya keçməsi üçün lazım olan minimal enerjiyə donorların, valent zonadan akseptor səviyyəsində keçməsi üçün lazım olan enerjiyə isə - akseptorların ionlaşma enerjisi deyilir. Donorların ionlaşma enerjisi:

$$\Delta E_d = \frac{e^4 m_n^*}{8 \epsilon_0^2 \epsilon^2 h^2} \quad (4.3)$$

Burada  $m_n^*$  - elektronun effektiv kütləsi,  $e$  - elektronun yükü,  $\epsilon$  - maddənin dielektrik nüfuzluğu,  $h$  - Plank sabitidir.  $\Delta \epsilon$  - akseptorların ionlaşma enerjisi üçün də  $m_n^*$ -i deşiklərin  $m_p^*$  - effektiv kütləsi ilə əvəz etməklə uyğun ifadəni yazmaq olar.

Verilmiş yarımkəçiricidə konsentrasiyası böyük olan sərbəst yükdaşıyıcılara əsas, konsentrasiyası kiçik olan yükdaşıyıcılara isə - qeyri-əsas yükdaşıyıcılar deyilir.

Əsas yükdaşıyıcıların  $n_0$  - konsentrasiyası məlum olarsa

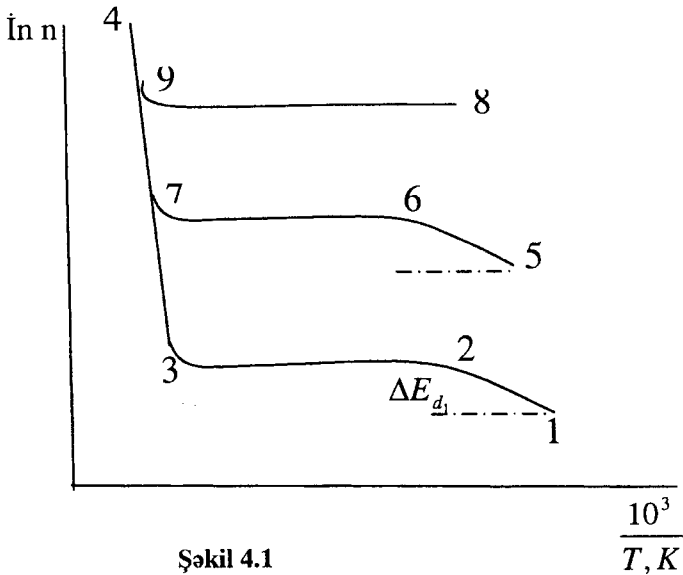
$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (4.4)$$

bərabərliyindən istifadə etməklə, qeyri-əsas yükdaşıyıcıların  $p_0$  konsentrasiyasını tapmaq mümkündür. Burada  $n_i$  - baxılan yarımkəçiricidə verilmiş temperaturda məxsusi sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasıdır.

### § 4.3. Sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının temperaturdan asılılığı

Temperaturun geniş diapazonunda və aşqarların müxtəlif miqdarlarında (müxtəlif səviyyədə aşqarlanmada) n-tip yarımkəçiricidə sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının temperaturdan asılılığı şəkil 4.1 -də təsvir edilmişdir.

Aşağı temperaturlardan başlayaraq, temperatur yüksəldikcə donorların ionlaşmasının böyüməsi ilə elektronların konsentrasiyası artmağa başlayır. Bu, proses şəkil 4.1-dəki qrafikin 1-2 hissəsinə uyğun gəlir. Bu zaman sərbəst elektronların konsentrasiyası



$$n_0 \approx \sqrt{N_c N_d} e^{-\frac{\Delta E_d}{2KT}} \quad (4.5)$$

ifadəsi ilə təyin olunur. Burada  $N_c$ - keçirici zonadakı hal sıxlığı,  $N_d$  - donor ionlarının konsentrasiyası,  $\Delta E_d$  - donor



atomlarının ionlaşma enerjisidir. Qrafikin 1-2 hissəsinin meyli donor aşqarlarının ionlaşma enerjisini göstərir.

Temperaturun sonrakı yüksəlməsində donor atomlarının hamısı ionlaşdığından, geniş temperatur diapazonunda yükdaşıyıcıların konsentrasiyası dəyişmir. Bu, həmin əyrinin 2-3 hissəsinə uyğun gəlir. Əyrinin bu hissəsi aşqarların tükənmə oblastı adlanır.

Temperaturun sonrakı yüksəlməsi sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının kəskin artmasına səbəb olur. Asılılığın bu hissəsi məxsusi keçiriciliyə uyğun gəlir. Bu hissədə xəttin meylinə əsasən yarımkeçiricinin qadağan olunmuş zonasının eni ( $\Delta E_0$ ) təyin olunur.

Aşqar atomlarının konsentrasiyası (aşqarlanma səviyyəsi) artdıqca  $\ln n(10^3/T, K)$  asılılığını təsvir edən qrafikin aşqar keçiriciliyə uyğun 5-6-7 hissəsi yuxarıya doğru sürüşür. Bu sürüşmənin səbəbi (4.5) ifadəsindən görünür. Aşqar atomlarının konsentrasiyası artdıqca aşqarların tükənməsi daha yüksək temperaturda baş verir. Aşqar atomlarının kifayət qədər böyük konsentrasiyalarında onların ionlaşma enerjisi sifira bərabər olur. Bu halda  $\ln n\left(\frac{1}{T}\right)$  asılılığının başlanğıc hissəsi müşahidə olunmur.

Belə yarımkeçirici cırılmış halda olur. Cırılmış n-tip yarımkeçiricidə aşqar (donor) səviyyələri ensiz enerji zonalığına çevrilir və bu zolaq sərbəst zona ilə qismən bürünür. Bu xüsusiyyət həmin cırılmış yarımkeçiriciləri metala bənzədir.

Cırılmamış n-tip yarımkeçiricilərdə Fermi səviyyəsi keçirici zona ilə aşqar zonanın ortasında yerləşir. Bu halda temperaturun yüksəlməsi ilə donor səviyyələrin dolması dərəcəsi azalır və Fermi səviyyəsi yerini aşağıya doğru dəyişir.

#### § 4.4. Yarımkəçiricilərdə sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü

Xarici elektrik sahəsi yarımkəçiricilərdə də sərbəst yükdaşıyıcıların hərəkətində nizamlılıq əmələ gətirərək, elektrik cərəyanı yaradır. Belə sahədə sərbəst yükdaşıyıcıların malik olduğu istiqamətlənmiş sürətə **dreyf sürəti**, həmin sürətin orta qiymətinin elektrik sahəsinin intensivliyinə olan nisbətində isə - **sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü deyilir**:

$$\mu = \frac{\bar{V}}{E} . \quad (4.6)$$

Yarımkəçiricilərdə sərbəst yükdaşıyıcılar elektron və deşiklər olduğundan, bunlara uyğun iki ( $\mu_n$  və  $\mu_p$ ) yüyürüklüyün olduğunu nəzərə almaq lazımdır. Belə olan halda məxsusi keçiricilik:

$$\sigma_0 = en_i\mu_n + ep_i\mu_p = en_i(\mu_n + \mu_p) . \quad (4.7)$$

Elektron və ya deşiklərdən hər hansı birinin konsentrasiyasının böyük olduğu halda, bu toplananlardan uyğun birini aşqar keçiricilikdə nəzərə almamaq mümkündür.

Təcrübələr nəticəsində müəyyənləşdirilmişdir ki, yarımkəçiricilərdə xüsusi elektrik keçiriciliyinin metallardakından kiçik olmasına baxmayaraq, onlarda sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü bir neçə tərtib metallardakından böyük olur. Bunun da başlıca səbəbi, yarımkəçiricilərdə sərbəst yükdaşıyıcıların  $m^*$  - effektiv kütləsinin kiçik,  $\tau_e$  - relaksasiya müddətinin isə böyük olmasıdır. Bu deyilənlər

$$\mu = \frac{e}{m^*} \tau_0 = \frac{e}{m^*} \frac{\bar{l}}{v_i} \quad (4.8)$$

ifadəsindən də görünür. (4.8)-də  $m^*$  - sərbəst yükdaşıyıcıların effektiv kütləsi,  $\tau_0$  - relaksasiya müddəti,  $\bar{l}$  - sərbəst qaçış məsafəsinin uzunluğu,  $\bar{v}_i$  - isə istiliklə əlaqədar sürətinin orta qiymətidir.

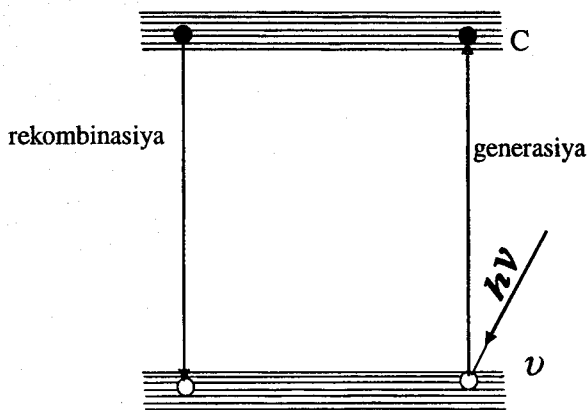
#### **§ 4.5. Tarazlıqda olmayan sərbəst yükdaşıyıcılar və onların rekombinasiyası**

Yarımkəçiricilərdə mütləq sıfır temperaturundan fərqli bütün temperaturlarda sərbəst elektron və deşiklərin generasiyası baş verir. Əgər bu proses yarımkəçiricilərdə baş verən yeganə proses olsaydı sərbəst elektron və deşiklərin yaranması materialın atomlarının hamısının ionlaşmasına qədər davam edərdi. Məsələ burasındadır ki, yarımkəçiricilərdə sərbəst yükdaşıyıcıların generasiyası prosesi ilə yanaşı, eyni vaxtda onların rekombinasiyası prosesi də gedir və müəyyən müddətdən sonra bu iki proses arasında dinamik tarazlıq yaranır. Belə hala elektron və deşiklərin  $n_0$  və  $p_0$  tarazlıq konsentrasiyaları uyğun gəlir.

İstilik generasiyası ilə yanaşı, güclü elektrik sahəsinin, işıqın və radiasiyanın təsiri, eləcə də injeksiya zamanı da sərbəst yükdaşıyıcıların yaranması prosesi baş verə bilər.

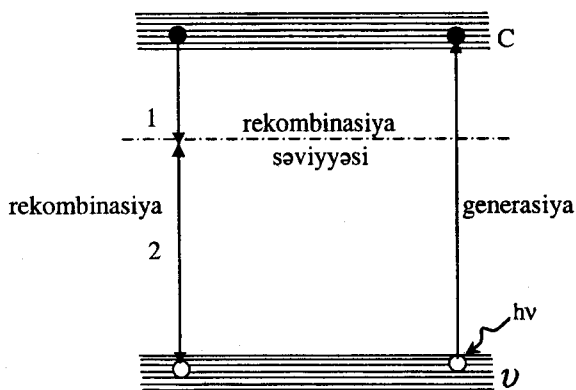
Yarımkəçiricidə sərbəst yükdaşıyıcıların rekombinasiyası prosesinin bir neçə mexanizmi mövcuddur.

**Zonalar arası rekombinasiya** zamanı keçirici zonadan sərbəst elektron valent zonasındakı boş yerlərin birinə keçir və nəticədə bir cüt sərbəst yükdaşıyıcısının yox olması (itməsi) baş verir. Bu növ rekombinasiya sxematik olaraq şəkil 4.2-də təsvir olunmuşdur.



Şəkil 4.2

Lakin belə - birbaşa rekombinasiyanın baş vermə ehtimalı çox kiçikdir. Digər bir rekombinasiya növü qadağan olunmuş zonadakı lokal səviyyələr vasitəsilə baş verən rekombinasiya **yadır** (şəkil 4.3).



Şəkil 4.3

Bu halda rekombinasiya prosesi iki mərhələdən ibarət olur. Birinci mərhələdə rekombinasiya səviyyəsi boş olduğundan keçirici zonadakı sərbəst elektron həmin səviyyə tərəfindən tutulur və elektrik keçiriciliyindən kənarlaşır. İkinci mərhələdə

isə - valent zonadakı dəşik rekombinasiya səviyyəsində yerləşən elektronla rekombinasiya edir. Rekombinasiya səviyyələri qismində kristaldakı aşqarlara, qəfəsin düyün nöqtələrindəki boşluqlara, kristalın həcmində və səthindəki çatlara, eləcə də digər defektlərə uyğun lokal enerji səviyyələri ola bilər.

Rekombinasiya zamanı ayrılan enerji ya foton şəklində şüalanır, ya da istilik şəklində kristal qəfəsə verilir.

Tarazlıqda olmayan artıq (əlavə) sərbəst yükdaşıyıcıların yaşama müddəti, həmin yükdaşıyıcıların  $\Delta n$  və  $\Delta p$  konsentrasiyanın bu konsentrasiyanın dəyişmə sürətinə olan nisbətində bərabərdir:

$$\tau_n = \frac{|\Delta n|}{\left| \frac{d(\Delta n)}{dt} \right|} ; \quad \tau_p = \frac{|\Delta p|}{\left| \frac{d(\Delta p)}{dt} \right|} \quad (4.9)$$

Yarımkəçiriciyə xarici elektrik və maqnit sahəsi təsir etmədikdə artıq konsentrasiyanın  $e$  (natural ədəd) - dəfə azaldığı məsafəyə diffuziya məsafəsi və ya diffuziya uzunluğu deyilir. Bu kəmiyyət elektron və dəşiklər üçün uyğun olaraq:

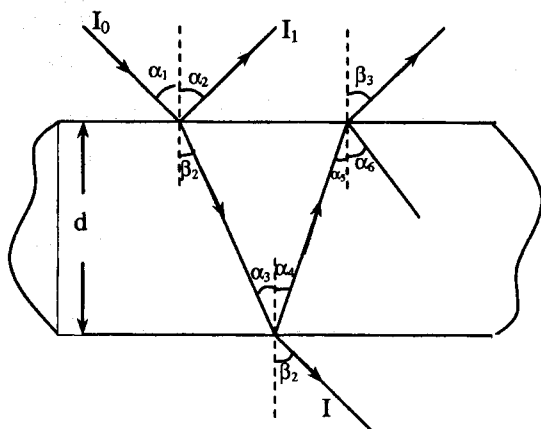
$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} ; \quad L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (4.10)$$

(4.10)-da  $D_n$  və  $D_p$  - uyğun olaraq elektron və dəşiklərin diffuziya əmsəlidir.

#### § 4.6. Yarımkəçiricilərdə optik udulma

İşıq yarımkəçirici materialın üzərinə düşdükdə bir neçə hadisə baş verir (Şəkil 4.4).

Əvvəla, düşən işıq selinin müəyyən bir qismi yarımkəçiricinin üz və arxa səthindən qaydır.



Şəkil 4.4

Düşən işıq dəstəsinin intensivliyi  $I_0$ , qayıdan dəstənin intensivliyi isə  $I_1$  olarsa, qayıtma əmsali:

$$R = \frac{I_1}{I_0}. \quad (4.11)$$

Materialın üz və arxa səthindən işığın qayıtmasını nəzərə alıqda, ondan keçərək kənara çıxan şüanın intensivliyi

$$I = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}} I_0 \quad (4.12)$$

ifadəsi ilə təyin olunur. Bu ifadədəki  $\alpha \cdot d$  - hasili böyük olduqda, ifadənin məxrəcindəki ikinci həddi nəzərə almamaq mümkündür. Bu halda:

$$I = (1-R)^2 I_0 e^{-\alpha d}. \quad (4.13)$$

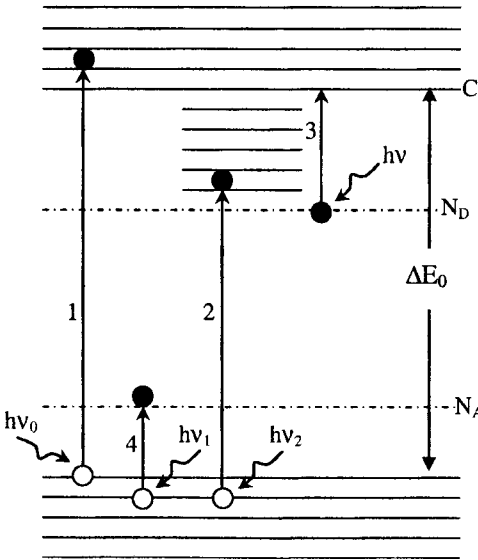
(4.11)-(4.13)-də  $R$ -əks olma (qaytarma) əmsali,  $\alpha$  - baxılan yarımkeçiricidə işığın udulma əmsali,  $d$ -üzərinə işıq düşən yarımkeçirici lövhənin qalınlığıdır. Işıq şüası lövhənin üzərinə normal (perpendikulyar) istiqamətdə düşdükdə  $R$  ilə maddənin optik  $n$  - sındırma əmsali arasında

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (4.14)$$

şəklində əlaqə var. Bir çox yarımkeçiricilər üçün optik sındırma əmsalı 3÷4 arasında dəyişdiyindən, qayıtma əmsalının qiyməti 25÷36% intervalında dəyişir.

$\alpha$  - udulma əmsalının işığın dalğa uzunluğundan və yaxud tezliyindən asılılığına optik udulmanın spektri deyilir. Yarımkeçirici tərəfindən işıq enerjisinin udulması rəqs enerjisinin dəyişməsi ilə əlaqədardır. Bununla əlaqədar olaraq, yarımkeçiricilərdə müxtəlif udulma mexanizmləri mövcuddur.

**Məxsusi udulma.** Valent zonasındaki elektronun işıq kvantı ilə enerji mübadiləsindən sonra keçirici zonaya keçməsi ilə əlaqədar baş verən (şəkil 4.5-də 1 keçidi) udulma məxsusi və ya fundamental udulma adlanır. Bu udulmanın baş verməsi üçün



Şəkil 4.5.

$$hv_0 > \Delta E_0 \quad (4.15)$$

şerti ödənilməlidir. Burada  $h\nu_0$  - maddə üzərinə düşən fotonun enerjisidir.

Ümumi halda udulma prosesi şəkil 4.5-də təsvir edilən hallardan birinə uyğun baş verir. Burada  $h\nu$  - maddə üzərinə düşən fotonun enerjisidir və udma oblastından asılı olaraq, müxtəlif (0-3) indekslərlə işarə olunub. Yarımkeçiricinin qadağan olunmuş zonasının eninin qiymətindən asılı olaraq, məxsusi udulma spektrin müxtəlif oblastlarında baş verə bilər.

Elektronun bir enerji səviyyəsindən digərinə keçidi müəyyən seçmə qaydasına tabedir. İcazəli keçid şərti o halda ödənilir ki, elektronun dalğa vektoru sabit qalsın. Başqa sözlə, elektron-deşik cütü yarandıqda onların kvazi-impulsları eyni olmalıdır. Belə keçid düz keçid adlanır. Bu keçidlə yanaşı, çəp keçid də mövcuddur. Çəp keçidin baş verməsində üç zərrəcik: elektron, foton və fonon iştirak edir. Çəp keçidin ehtimalı düz keçidə nisbətən çox kiçik olduğundan bu keçidə uyğun udulma əmsali da kiçikdir.

**Eksiton udulma.** Bəzi yarımkeçiricilərdə optik həyəcanlaşma zamanı bir-biri ilə rabitədə olan elektron-deşik cütü yaranır. Bir-biri ilə bağlı olan belə cüt eksiton, onun yaranması hesabına baş verən udulma isə - eksiton udulma adlanır. Eksiton udulma düzünə keçid zamanı müşahidə olunur. Eksiton udulma sxematik olaraq şəkil 4.5-də 2-keçidi ilə təsvir olunmuşdur. Eksiton udulmanın baş verməsi üçün maddə üzərinə düşən işıq fotonunun  $h\nu_2$  - enerjisi

$$h\nu_2 = \Delta E_0 - E_e \quad (4.16)$$

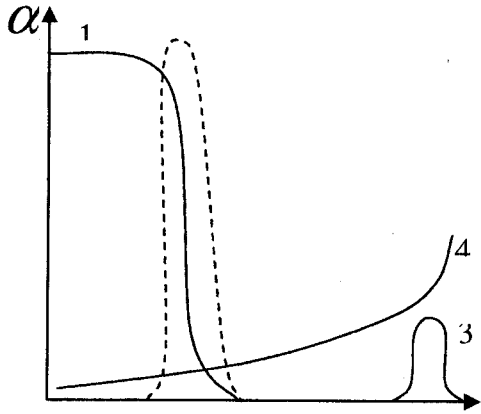
şərtini ödəməlidir. Burada  $E_e$  - eksitonun rabitə enerjisidir. Belə bir-biri ilə bağlı elektron-deşik cütü yəni, eksiton, hidrogen atomuna bənzəyir. Eksitonların yaranması materialın elektrik keçiriciliyinə təsir etmir. Eksiton udulmaya uyğun spektr özünü məxsusi (fundamental) udulmanın spektrinin kənarında (qırağında) ensiz pik şəklində göstərir. Temperatur yüksəldikcə həmin pikin eni böyüyür.



**Aşqar udulma.** Aşqar atomlarının ionlaşması və ya həyəcanlanması ilə əlaqədar udulmaya aşqar udulması deyilir. Bu zaman enerjinin udulma mexanizmi elektronların donor səviyyədən keçirici zonaya və ya valent zonasından akseptor səviyyəsinə keçməsi ilə əlaqədar olur (şəkil 4.5-də 3 və 4 keçidləri). Belə udulma aşağı temperaturlarda müşahidə olunur və onun spektri, bir qayda olaraq infraqırmızı oblastda yerləşir.

**Qəfəs udulması.** Elektromaqnit şüalanmasının kristal qəfəsin düyün nöqtələrindəki atomların rəqsləri ilə əlaqədar udulmasına qəfəs udulması deyilir. Bu udulmanın spektri uzaq infraqırmızı oblastda yerləşib, aşqar və ya sərbəst yükdaşıyıcılarla əlaqədar olan udulmanın spektri ilə yanaşı olur.

**Sərbəst yükdaşıyıcılarla udulma.** Eyni bir icazəli zona daxilində elektron və deşiklərin bir səviyyədən digərinə keçməsi ilə baş verən udulmaya sərbəst yükdaşıyıcılarla udulma deyilir. Bu zaman maddə üzərinə düşən işığın elektrik sahəsinin təsiri altında sərbəst yükdaşıyıcılar sərbəst uçuş məsafəsində təcillə hərəkət edərək qəfəsin düyünləri ilə toqquşur və əldə etdikləri kinetik enerjini onlara verir. Nəticədə işıq enerjisi qəfəsin istilik enerjisinə çevrilir. Bu növ udulma o vaxt baş verir ki, sərbəst yükdaşıyıcıların sərbəst uçuş müddəti elektromaqnit rəqslərinin periodundan çox kiçik olsun.



Səkil 4.6

Yarımkəçiricinin ayrı-ayrı hallara uyğun udulma spektri şəkil 4.6-da təsvir olunmuşdur. Burada 1 - əyrisi məxsusi udulmaya, 2 - eksiton udulmaya, 3 - aşqar udulmaya, 4 - isə sərbəst yükdaşıyıcılarla əlaqədar udulmaya uyğun gəlir.

Baxılan udulma növlərindən yalnız məxsusi və aşqar udulma zamanı sərbəst yükdaşıyıcıların generasiyası baş verir. Ona görə də bu növ udulma fotoaktiv udulma adlanır.

## § 4.7. Fotokeçiricilik

Optik şüalanmanın (ışığın) təsiri altında materialın elektrik keçiriciliyinin dəyişməsi hadisəsinə **fotokeçiricilik** deyilir. Bu hadisə yalnız fətohəssas materiallarda (yarımkeçiricilərdə) müşahidə olunur. Fotokeçiriciliyin qiyməti

$$\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_0 = e( \Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p ) \quad (4.17)$$

ifadəsi ilə təyin olunur.

Burada  $\Delta n$  və  $\Delta p$  - tarazlıqda olmayan sərbəst yükdaşıyıcıların artıq konsentrasiyasıdır.

Yükdaşıyıcıların optik həyəcanlaşma zamanı generasiya sürəti ( $g$ ) yarımkeçiricinin üzərinə düşən işığın  $I$ -intensivliyindən və  $\alpha$  udulma əmsalından asılıdır:

$$g = \eta \alpha I . \quad (4.18)$$

(4.18) – ifadəsindən  $\eta$  mütənəsiblik əmsalı daxili fotoefektin kvant çıxışı adlanır və udulan bir fotona uyğun yaranan sərbəst yükdaşıyıcıların sayını göstərir.

Tarazlıqda olmayan sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artması və ya azalması generasiya və rekombinasiya sürətlərinin fərqi ilə təyin olunur. İşıq təsir etdikdə fotokeçiricilik zamandan asılı olaraq

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_{st} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.19)$$

qanunu ilə dəyişir. Burada  $\tau$  - tarazlıqda olmayan sərbəst yükdaşıyıcıların yaşama müddəti,  $\Delta \sigma_{st}$  - fotokeçiriciliyin stasionar qiymətidir. İşığın təsiri kəsildikdən sonra keçiriciliyin dəyişməsi yalnız rekombinasiya sürəti ilə təyin olunur:

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_{st} e^{-t/\tau} . \quad (4.20)$$

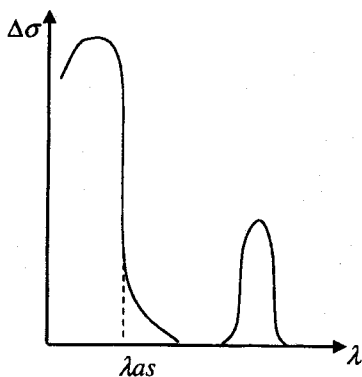
İşığın intensivliyinin sabit qiymətində işıqlandırılma başlayan müəyyən müddət keçdikdən sonra fotokeçiricilik özünün

$$\Delta \sigma_{st} = e \eta \alpha I (\mu_n + \mu_p) \tau \quad (4.21)$$

stasionar qiymətini alır.

Tarazlıqda olmayan sərbəst yükdaşıyıcıların yaşama müddəti nə qədər böyük olarsa, rekombinasiya sürəti bir o qədər kiçik, fotokeçiriciliyin qiyməti isə yüksək olar.

Məxsusi və aşqar fotokeçiriciliyin spektral paylanması yarımkeçirici materialın məxsusi və aşqar udmasının spektrinə uyğun gəlir. Uzun dalğalar oblastündakı aşqar udulmaya aşqar fotokeçiricilik uyğun gəlir. Aşqar fotokeçiriciliyin spektrinin maksimumundan hər iki tərəfdə onun qiyməti sıfır qədər azalır. Bu onunla bağlıdır ki, dalğa uzunluğunun böyük qiymətlərində



Şəkil 4.7

yarımkeçiricinin üzərinə düşən fotonların enerjisi aşqar atomlarını ionlaşdırmaq üçün kifayət etmədiyindən, fotokeçiricilik yaranmır. Qısa dalğalar tərəfə getdikcə aşqar fotokeçiriciliyin azalması isə aşqar udulma spektrinin rezonans xarakterinə malik olması ilə bağlıdır. Məxsusi fotokeçiriciliyin sərhədi məxsusi udulmanın sərhədinə uyğun gəlir. Yarımkeçiricinin üzərinə düşən fotonun enerjisi artdıqda fotokeçiriciliyin qiyməti maksimumdan keçərək (şəkil 4.7) azalır.

Bu azalmanın səbəbi böyük enerjili fotonların səthə təbəqədə udulması və bu zaman yaranan tarazlıqda olmayan sərbəst yükdaşıyıcıların rekombinasiya sürətinin intensiv səth rekombinasiyası ilə əlaqədar olmasıdır. Buna görə də yarımkeçiricinin üzərinə düşən işığın dalğa uzunluğu kiçildikdə fotonların yarımkeçiricinin həcminə daxil olması dərinliyi azalır. Səthdəki rekombinasiyanın sürəti böyük olduqca məxsusi fotokeçiriciliyin spektral paylanması da öz maksimumuna doğru daha kəskin (sürətlə) artır.

## § 4.8. Lüminessensiya

Cismin verilmiş temperaturda istilik şüalanmasından əlavə baş verən və sürəkliyi  $10^{-10}$  san-dən böyük olan şüalanmasına lüminessensiya deyilir. Lüminessensiya şüalanmasının sürəkliyi işıq rəqslərinin periodundan kifayət qədər böyük olur. Lüminessensiya tarazlıqda olmayan proses olduğundan, onu yaratmaq üçün materialı müxtəlif həyacanlaşdırma yolu ilə termodinamik tarazlıq halından çıxarmaq lazımdır. Lüminessensiyada həyacanlaşma və şüalanma prosesləri zaman etibarilə bir-birindən aralıq proseslərlə ayrılır. Buna görə də maddə həyacanlaşmadan sonra uzun müddət şüalanır.

Lüminessensiya edən maddələrə **lüminofor** deyilir. Qeyri-üzvi kristal lüminoforlara **kristallofosfor** deyilir.

Həyacanlaşdırmanın növündən asılı olaraq, lüminessensiyanın fotolüminessensiya, katodolüminessensiya, elektrolüminessensiya, radiolüminessensiya, xemiolüminessensiya kimi müxtəlif növləri mövcuddur.

İşığın təsiri ilə yaranan fotolüminessensiya Stoks-Lommel qanununa tabedir. Bu qanuna görə şüalanma spektrinin maksimumu udulma spektrinin maksimumuna nəzərən uzun dalğalar tərəfə sürüşür. Deməli, həyacanlaşdırıcı işığın enerjinin bir hissəsi istiliyə çevrilir. Yüksək optik sıxlığa malik lazer şüaları vasitəsilə həyacanlaşma yaratdıqda Stoks-Lommel qanunundan kənara çıxmalar müşahidə olunur. Belə lüminoforlar **antistoks lüminoforları** adlanır və onların köməyi ilə infraqırmızı lazer şüalarını görünən şüalara çevirmək olur.

Bərk cisimlərin lüminessensiya etmə xassəsi və şüalanmanın spektrinin quruluşu onların tərkibindəki aşqarların kimyəvi təbiətindən və konsentrasiyasından, eləcə də qəfəs strukturundakı defektlərin (məxsusi defektlərin) tipindən, sıxlığından asılı olur. Aşqar atomları qadağan olunmuş zonanın daxilində lokal enerji səviyyələri yaradır. Həmin səviyyələr maddənin lüminessensiya etməsində başlıca rol oynadığından, onları yaradan aşqarlar - **aktivatorlar** (fəallaşdırıcılar) adlanır.

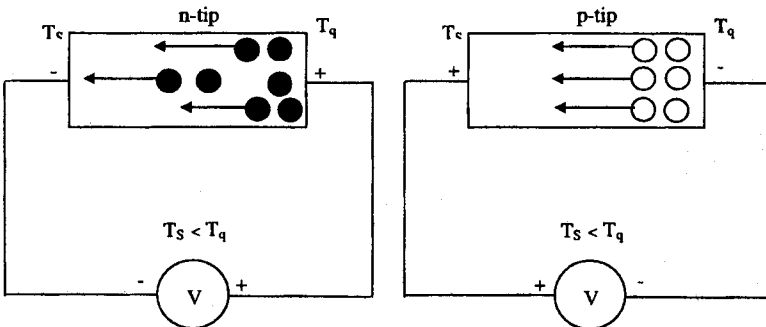
## § 4.9. Termoelektrik hadisələri

Metal və yarımkeçirici materialı həndəsi ölçüləri boyunca qeyri-bərabər qızdırdıqda kristalın müxtəlif yerlərində sərbəst yükdaşıyıcıların kinetik enerjisi, yarımkeçiricilərdə isə həm də sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası dəyişər. Bu səbəbdən də qızdırılmış hissədən soyuq hissəyə yükdaşıyıcıların diffuziyası baş verər və materialın daxilində elektrik sahəsi yaranar. Həmin sahə isə öz növbəsində həm də elektronların diffuziya prosesinin əksinə yönəlmiş dreyf selini yaradar. Nəhayət, bu iki proses bir-birini tarazlaşdırdıqda sistemin ucları arasında müəyyən potensiallar fərqi-**termoelektrik hərəkət qüvvəsi** yaranır. Yarımkeçiricilərdə metallardan fərqli olaraq, termoelektrik hərəkət qüvvəsi həm elektronlar, həm də deşiklər hesabına yaranır. Buna görə də böyük olur.

Cırılma olmadıqda məxsusi yarımkeçiricilərdə yaranan **differensial termoelektrik hərəkət qüvvəsi əmsalı**

$$\alpha_T = \frac{K}{\sigma} \left\{ n\mu_n \left[ 2 + \ln \frac{2(2\pi m_n^* K T^2)^{3/2}}{nh^3} \right] - p\mu_p \left[ 2 + \ln \frac{2(2\pi m_p^* K T^2)^{3/2}}{ph^3} \right] \right\} \quad (4.22)$$

ifadəsi ilə təyin olunur. Aşqar yarımkeçiricilərdə (4.22) ifadəsi xeyli sadələşir. Çünki bu halda toplananlardan biri çox kiçik olduğundan onu nəzərə almamaq mümkündür.



Şəkil 4.8

Elektronların n –tip yarımkəçiricidə isti hissədən soyuq hissəyə doğru axını əks istiqamətdəki axından böyük olduğundan soyuq tərəfdə mənfi yüklü elektronlar, isti tərəfdə isə kompensə olunmamış müsbət yüklü donor ionları məskunlaşar. p-tip yarımkəçiricidə isə diffuziya prosesində dəşiklər iştirak etdiyindən termoelektrik hərəkət qüvvəsinin işarəsi dəyişər (şəkil 4.8)

Aşqar yarımkəçiricilərin istilik sahəsinin qeyri bircinsliyinə göstərdiyi bu reaksiya termoelektrik effektinə əsasən (yaranan termo e.h.q.-nin işarəsinə əsasən) baxılan yarımkəçirici materialın keçiricilik tipini təyin etməyə imkan verir.

Yarımkəçiricilərin metal və dielektriklərlə müqayisədə böyük termoelektrik hərəkət qüvvəsinə malik olması, onlardan termoelektrik generatorlarının və soyuducularının işçi elementi olan termoelementlərin hazırlanmasında istifadə etməyə imkan verir.

#### § 4.10. Holl effekti

Yarımkəçiriciyə elektrik və maqnit sahəsinin eyni zamanda təsiri hesabına yaranan fiziki hadisələr **qalvanomaqnit effektləri** adlanır. Qalvanomaqnit effektləri sırasında elmi əhəmiyyətinə və praktiki tətbiq imkanlarına görə **Holl effekti** mühüm yer tutur. Bu effektin mahiyyəti ondan ibarətdir ki, cərəyan keçən yarımkəçirici lövhəni cərəyanın istiqaməti ilə bucaq əmələ gətirən istiqamətdə yönəlmiş maqnit sahəsində yerləşdirdikdə, onun cərəyanına və maqnit sahəsinə perpendikulyar olan üzləri arasında potensiallar fərqi yaranar. Bu potensiallar fərqi Holl elektrik hərəkət qüvvəsi adlanır. Sadə halda (cərəyan və maqnit sahəsinin istiqamətləri bir-birinə perpendikulyar olduqda)  $U_H$  - Holl elektrik hərəkət qüvvəsinin qiyməti p –tip yarımkəçirici üçün

$$U_H = \frac{1}{ep} \cdot \frac{iB}{d} = R_H \frac{iB}{d} \quad (4.23)$$

ifadəsi ilə təyin olunur. Burada  $i$  - lövhədən axan cərəyan şiddəti,  $B$  - maqnit sahəsinin induksiyası,  $d$  - lövhənin qalınlığı,  $R_H$  - Holl əmsalıdır.

$n$ -tip yarımkəçirici üçün Holl elektrik hərəkət qüvvəsinin ifadəsini yazmaqdan ötrü (4.23) ifadəsində sərbəst dəşiklərin  $p$ -konsentrasiyasını, sərbəst elektronların  $n$ -konsentrasiyası ilə əvəz etmək lazımdır. Bu ifadələrin arasındakı fərq yalnız Holl əmsalının işarəsində özünü göstərir. Holl əmsalının işarəsi  $p$ -tip yarımkəçiricilər üçün mənfidir. Holl elektrik hərəkət qüvvəsinin işarəsinin yarımkəçirici materialın keçiricilik tipindən asılı olması, bu hadisədən təcrübədə materialın keçiricilik tipini təyin etmək üçün istifadə etməyə imkan verir.

Səpilmə mexanizmini nəzərə aldıqda

$$R_H = \frac{A}{ep} \quad (4.24)$$

Səpilmə mexanizminin növündən asılı olaraq  $A$  -nın qiyməti  $1 \div 2$  intervalında dəyişir. Məsələn, kovalent rabitəli yarımkəçiricilərdə səpilmə qəfəsin istilik rəqsləri ilə əlaqədar olduqda  $A=1.18$ , aşqar ionları ilə əlaqədar olduqda isə  $A=1.93$ .

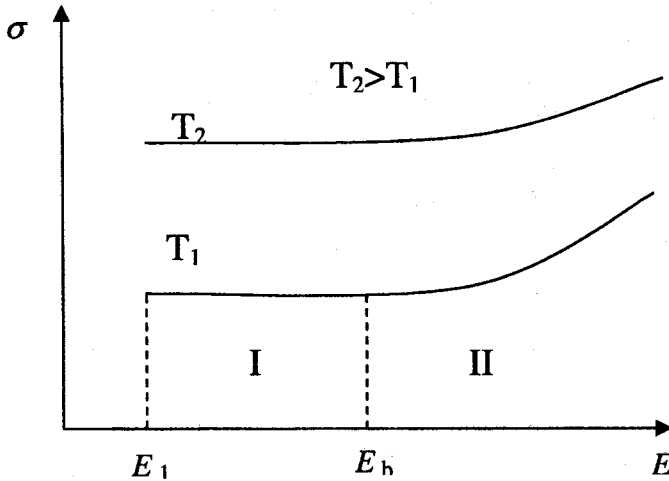
Yarımkəçiricidə hər iki növ sərbəst yükdaşıyıcıları olduqda, Holl əmsalı:

$$R_H = -\frac{A}{e} \cdot \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2} \quad (4.25)$$

Holl effekti təkcə yarımkəçirici materialların xassələrini təyin etmək üçün deyil, həm də texniki məqsədlər üçün tətbiq tapmışdır. Belə yarımkəçirici cihazlara maqnit induksiyasını və dövrəni qırmadan ondan axan cərəyanı ölçən, eləcə də fazaya həssas detektorlar, spektral analizatorlar, modulyator tipli cihazlar aiddir.

#### § 4.11. Güclü elektrik sahəsində yarımqeçiricilərin elektrik keçiriciliyi

Güclü elektrik sahəsi təsir edən yarımqeçiricidə cərəyanın sıxlığı ilə onu yaradan elektrik sahəsinin intensivliyi arasında zəif elektrik sahələri üçün xas olan mütənasıblıq pozulur. Bu xüsusiyyət materialın xüsusi elektrik keçiriciliyinin elektrik sahəsindən asılılığından irəli gəlir. Şəkil 4.9 –da yarımqeçiricinin xüsusi elektrik keçiriciliyinin müxtəlif temperaturlarda elektrik sahəsindən asılılığı təsvir edilmişdir.



Şəkil 4.9

Xüsusi elektrik keçiriciliyinin elektrik sahəsinin intensivliyindən asılı olmağa başladığı sahə intensivliyinin qiyməti zəif və güclü elektrik sahələrinin sərhədi kimi qəbul oluna bilər. Bu nöqtəyə uyğun gələn elektrik sahəsinin qiymətinə sahənin böhran qiyməti ( $E_b$ ) deyilir.  $E_b$  -nin qiyməti yarımqeçiricinin materialından, ondakı aşqarların konsentrasiyasından və nümunənin temperaturundan asılıdır.

Om qanununun ödənməsi üçün (sərbəst yükdaşıyıcıların) yüyürüklük və konsentrasiyası elektrik sahəsinin intensivliyindən asılı olmamalıdır.



Elektrik sahəsinin böhran qiyməti

$$E_b = \frac{3}{2} \frac{kT}{e\bar{l}} \quad (4.26)$$

ifadəsi ilə təyin olunur. Burada  $K$  – Bolsman sabiti,  $T$  – temperatur,  $e$  – elektronun yükü,  $\bar{l}$  - yükdaşıyıcıların sərbəst yolunun orta uzunluğudur. Əksər yarımkeçiricilər üçün  $E_b$ -nin qiyməti  $\sim 10^5 \frac{V}{m}$  tərtibindədir.

Güclü elektrik sahəsinin sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürlüklüyünə təsiri onların səpilmə mexanizmindən asılıdır.

Kristal qəfəsin istilik rəqslərindən səpilmə zamanı sərbəst yolun orta uzunluğu yükdaşıyıcıların sürətindən asılı olmur. Bu zaman yüyürüklük sahənin böyüməsi ilə kiçilir. Aşqar ionlarından səpilmə zamanı isə  $\bar{l} \sim v_0^4$  olduğundan,  $\mu \sim v_0^3$  olur. Beləliklə, güclü elektrik sahəsində səpilmə mexanizmindən asılı olaraq sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü həm böyüyə və həm də kiçilə bilər. Lakin təcrübədə elektrik sahəsinin artması ilə yarımkeçiricilərin keçiriciliyinin artması müşahidə olunmur. Çünki güclü elektrik sahələrində əksər hallarda sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası artır. Qeyd etmək lazımdır ki, yarımkeçiricilərdə sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası termo-elektron, zərbələrlə, elektrostatik (tunel effekti nəticəsində) ionlaşma hesabına arta bilər. Elektrik sahəsinin intensivliyinin böyük qiymətlərində sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyünün və konsentrasiyasının dəyişməsi ümumi halda yarımkeçiricilərin elektrik keçiriciliyinin xüsusiyyətlərində əhəmiyyətli dəyişiklik yarada bilər.

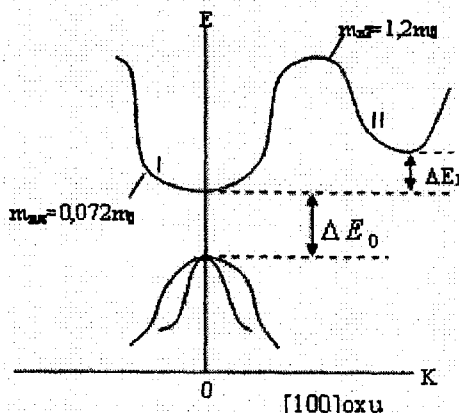
#### § 4.12. Qann effekti

Güclü elektrik sahəsinin sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürlüklüyünə təsiri özünü Qann effektində də göstərir. Bu effektin mahiyyəti güclü sabit elektik sahəsinin təsiri altında yarımkeçi-

ricidə ifrat yüksək tezlikli cərəyan rəqslərinin yaranmasıdır. İlk dəfə Qann effekti n-GaAs və n-InP monokristallarında müşahidə edilmişdir. Bu effekti müşahidə etmək üçün elektrik sahəsinin böhran qiyməti GaAs və InP üçün uyğun olaraq  $3 \cdot 10^3 \frac{V}{sm}$  və  $6 \cdot 10^3 \frac{V}{sm}$  -dir.

Qann effektinin mahiyyətini aydınlaşdırmaq üçün həmin yarımkəçiricilərin keçirici zonasının mürəkkəb quruluşuna malik olduğunu nəzərə almaq lazımdır.

Qallium arsenidin kvaziimpuls fəzasında zona enerji diaqramında potensial çəpərlə ayrılmış bir neçə minimum mövcuddur (Şəkil 4.10).

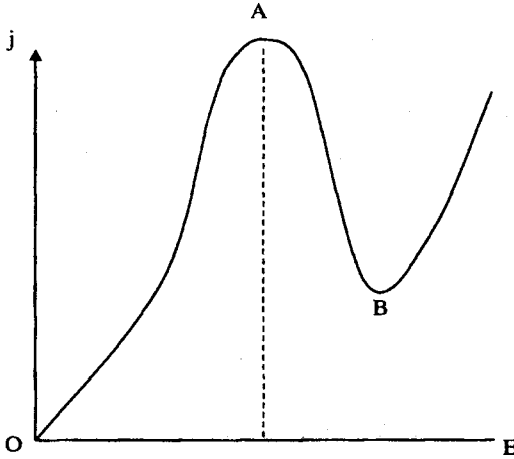


Şəkil 4.10

$K=0$  –nöqtəsinə uyğun minimumda elektronlar kiçik effektiv kütləyə, lakin böyük yüyürüklüyə malikdir. Elektrik sahəsinin kiçik qiymətlərində elektronların dreyf sürəti və kvaziimpulsu kiçik olduğundan, onlar başlıca olaraq birinci (əsas) minimumda məskunlaşır. Kifayət qədər güclü sahələrdə elektronların enerjisi əsas minimumla ikinci minimum arasındakı potensial çəpərin hündürlüyündən böyük olduğundan onlar yüyürüklüyün dəfələrlə kiçik olduğu ikinci minimuma keçir.

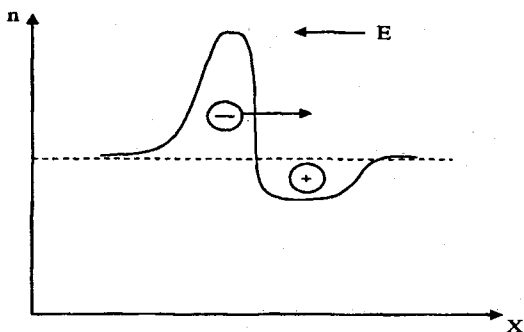
Elektrik keçiriciliyi sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü ilə mütənasib olduğundan bu keçid nəticəsində kristalın volt-ampere xarakteristikasında (şəkil 4.11) mənfi differensial keçiricilikli (MDK) hissə (şəkil 4.11-də AB hissəsi) əmələ gəlir. VAX-da MDK - hissənin olması isə kristalın daxil olduğu dövrdə ifrat yüksək tezlikli rəqslərin generasiyasına səbəb olur.

Bu halda tədqiq edilən nümunənin qeyri-bircins olması nəticəsində elektronların aşağı minimumundan yuxarı minimuma keçməsi onun bütün həcmində deyil, müqavimətinin böyük olduğu oblastında baş verir.



Şəkil 4.11

Belə qeyri-bircinslik nəticəsində nümunədə “ağır” elektronların toplandığı asta hərəkət edən tıxac yaranır və həmin tıxac elektrik sahəsinin təsiri altında anoda doğru hərəkət edir. Bu zaman tıxacın önündə və arxasında böyük dreyf sürətinə malik “yüngül” elektronlar hərəkət edir. Öndəki sürətli elektronların tıxacdən uzaqlaşması nəticəsində onun önündə anoda tərəf olan hissədə mənfi yüklərin seyrəkləşməsi baş verir. Tıxacın arxasında katoda yaxın hissədə, isə mənfi yüklər sıxlaşır (şəkil 4.12).



Şəkil 4.12

Belə yüklər sistemi elektrik domeni adlanır və o, katod oblastında yaranıb, anoda doğru dartılaraq anod tərəfindən sorulur. Həmin domenin əmələgəlmə prosesi ərzində kristaldan axan cərəyan kiçilir.

Domen anoda çatıb anod tərəfindən sorulduqda isə cərəyan öz ilkin qiymətinə qədər artır. Bu azalan və artan hissələr cərəyan rəqslərinin ön və arxa cəbhələrini əmələ gətirir. Formalaşmış domenin katod-anod aralığındakı hərəkət müddətində cərəyanın qiyməti dəyişməz qalır və bu müddət iki qonşu cərəyan impulsunun maksimumları arasındakı fasiləyə, yəni rəqslərin perioduna bərabər olur. Qann effekti əsasında yaradılan cihazların generasiya etdiyi rəqslərin tezliyi yüz Qiqahersə (QHs-ə) qədər çata bilər.

#### § 4.13. Yarımkəçirici materialların təsnifatı

Yarımkəçiricilik xüsusiyyətinə müxtəlif tip: üzvi, qeyri-üzvi, kristal, amorf, maye, maqnit və qeyri-maqnit maddələrə malikdir. Müasir elektronikanın əsasını kristal qeyri-üzvi yarımkəçiricilər təşkil edir.

Kimyəvi Elementlərin Dövri Sisteminin ortasında yerləşən on iki kimyəvi element yarımkəçirici xüsusiyyətinə malikdir. Bu yarımkəçiricilər bəsit yarımkəçiricilərdir (cədvəl 4.1)

Nö	Adı	Kimyəvi işarəsi	Qadağan olunmuş zonanın eni ( $\Delta E_0$ , eV)	Ərimə temperaturu ( $^{\circ}\text{C}$ )	Periodik sistemdə yeri (dövr, qrup və sıra nömrə)
1	Bor	B	1,1	2075	2-3-5
2	Karbon (almaz)	C	5,6	-	2-4-6
3	Silisiyum	Si	1,12	1414	3-4-14
4	Germanium	Ge	0,665	936	4-4-32
5	Boz qalay	$\alpha$ -Sn	0,08	231,9	5-4-50
6	Fosfor	P	1,5	-	3-5-15
7	Mərgümiş	As	1,2	-	4-5-33
8	Sürmə	Sb	0,12	630,5	5-5-51
9	Kükürd	S	2,5	112,8	3-6-16
10	Selen	Se	1,8	220	4-6-34
11	Tellur	Te	0,36	449,8	5-6-52
12	Yod	J	1,25	113,6	5-7-53

Bu Kimyəvi Elementlərin Dövri Sistemində yerləşməsi müəyyən qanunauyğunluğa tabedir. Bir perioddan digərinə soldan sağa keçdikdə qadağan olunmuş zonanın eni böyüyür, qrupun daxilində yuxarıdan aşağıya doğru hərəkət etdikdə isə qadağan olunmuş zonanın eni kiçilir.

Məlum olduğu kimi, karbon iki allotropik şəkildə: almaz və qrafit kimi mövcuddur. Qrafit elektrik keçiriciliyinə görə metal, təmiz almaz isə dielektrik qrupuna aiddir. Süni yolla alınmış və bir qədər aşqarlanmış almaz isə yarımkeçirici xassəsinə malik olur.

Normal şəraitdə qalay yaxşı metal xassəsinə malikdir. Ancaq  $13,2^{\circ}\text{C}$ -dən aşağı temperaturlarda o, yarımkeçirici xassəsinə malik  $\alpha$  - modifikasiyasına çevrilir və boz qalay adlanır.

Elementar (bəsit) yarımkeçiricilər sırasında Yer qabığında miqdarına, tələb olunan kristallarının alınması mümkünlüyünə, qadağan olunmuş zonasının eninə, sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının və yüyürüklüyünün qiymətinə görə Si, Ge və bir qədər də Se digərləri ilə müqayisədə daha geniş tətbiq olunur.

Qeyri-üzvi birləşmələr sırasında iki və daha çox kimyəvi elementdən təşkil olunmuş yarımkeçirici material qrupları mövcuddur. Belə birləşmələrə misal olaraq GaAs, InSb, CdSe, ZnS, ZnSiAs<sub>2</sub>, CuGe<sub>2</sub>P<sub>3</sub>-i göstərmək olar. Almaz qəfəsində olduğu üçün bir sıra yarımkeçiriciləralmazabənzər yarımkeçiricilər adlanır.

Tərkibində mərgümüş (As), kükürd, tellur, karbon olan binar birləşmələr uyğun olaraq arsenidlər, sulfidlər, telluridlər, karbidlər adlanır.

Yarımkeçirici birləşmələr qrupu latın əlifbası ilə işarə edilir. Burada A-birləşmənin birinci, B-ikinci, C-üçüncü və s. komponentini göstərir. Həmin hərflər indekslərə malik olur. Hərfin rum rəqəmi ilə işarə olunmuş yuxarı indeks elementin Periodik Sistemdəki qrupunu göstərir. Ərəb rəqəmləri ilə işarə olunan aşağı indeks isə stexiometrik əmsalın göstəricisidir. Məsələn, InP birləşməsi A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> yarımkeçirici birləşmələr qrupuna, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> birləşməsi A<sub>2</sub><sup>V</sup>B<sub>3</sub><sup>VI</sup> qrupuna, ZnSiP<sub>2</sub> isə A<sup>II</sup>B<sup>IV</sup>C<sub>2</sub><sup>V</sup> qrupuna daxildir.

Bu birləşmələrlə yanaşı, müxtəlif materialların bərk məhlulları əsasında da mürəkkəb yarımkeçirici materiallar mövcuddur. Bərk məhlulların kimyəvi formulasında aşağıdakı indeks elementin bərk məhluldakı payını göstərir. Məsələn, Ge ilə Si və In As ilə InP arasındakı bərk məhlul Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> və InAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> formasında göstərilir. InAs<sub>0,8</sub>P<sub>0,2</sub> formulası həmin bərk məhlulda fosforun atom payının, yaxud InP-in payının 0,2 mol olduğunu göstərir.

Hal-hazırda mürəkkəb yarımkeçiricilər olduqca çoxdur, lakin bunların içərisində praktiki cəhətdən daha böyük əhəmiyyət kəsb edənlər A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, A<sup>II</sup>B<sup>IV</sup>, A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> tipli birləşmələrdir.

#### § 4.14. Germanium və onun tətbiq sahələri

**Germanium** elementinin varlığı və xassələri barədə fikri ilk dəfə rus alimi D.İ.Mendeleyev 1870-ci ildə söyləmişdir. 1886-cı ildə isə alman fiziki K.Vinkler təhlil etdiyi mineralda yeni elementin olduğunu aşkar etmiş və öz vətəninin şərəfinə onu Germanium adlandırmışdır. Germanium təbiətdə geniş yayılmış elementlərdəndir. Yer qabığında onun miqdarı  $7 \cdot 10^{-4}\%$  təşkil edir. Hal-hazırda germanium daş kömürün koklaşdırılması prosesində və germanium konsentratından alınır.

Təmiz germanium metal parlaqlığına malik olub, nisbətən yüksək bərkliyə və kövrəkliyə malikdir. Onun elementar qəfəs özəyində 8 atom yerləşir və almaz quruluşuna bənzər kristallaşma gedir.

Kristal germanium otaq temperaturunda havada dayanıqlıdır, lakin  $650^{\circ}\text{C}$ -də oksidləşərək,  $\text{GeO}_2$  birləşməsinə əmələ gətirir. Bu material otaq temperaturunda suda, xlorid və durulaşdırılmış sulfat turşusunda həll olmur. Germanium normal şəraitdə azot və flüorit turşularının qarışığında, tərkibində oksidləşdirici reagentlər olan aşılayıcılarda, hidrogen peroksidin məhlulunda həll olur. Bu maddə qızdırıldıqda hallogenlər, kükürd və kükürd birləşmələri ilə güclü qarşılıqlı təsirdə olur. O, hətta ərimiş halda da qrafit və kvars şüşə ilə qarşılıqlı təsire girmir. Maye halda olan germanium hidrogeni yaxşı udur və hidrogen onun üçün elektroneytral aşqardır.

Cədvəl 4.2-də germaniumun əsas parametrlərinin qiymətləri göstərilmişdir.

Cədvəl 4.2

No	Parametrlər	Ədədi qiymətlər
1	Qəfəs periodu	$5,66 \cdot 10 \text{ nm}$
2	Sıxlıq ( $20^{\circ}\text{C}$ )	$5,3 \text{ Mg/m}^3$
3	Xətti genişlənmənin temperatur əmsali ( $1-100^{\circ}\text{C}$ )	$6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

4	Xüsusi istilikkeçiriciliyi	55 Vt/m · K
5	Xüsusi istilik tutumu (0-100°C)	333 C/Kq · K
6	Ərimə temperaturu	936°C
7	Xüsusi ərimə istiliyi	4,1 · 10 <sup>5</sup> C/ Kq
8	Ərimə temperaturunda səthigərilmə əmsalı	0,6 N/m
9	Xüsusi müqavimət (20°C)	0,47 Om · m
10	Məxsusi sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası	2,5 · 10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup>
11	Qadağan olunmuş zonanın eni 0 K	0,746 eV
12	Sərbəst elektronların yüyürlüüyü (300 K)	0,665 eV
13	Elektronların yüyürlüüyü	0,39 m <sup>2</sup> /V · s
14	Deşiklərin yüyürlüüyü	0,19 m <sup>2</sup> /V · s
15	Çıxış işi	4,8 eV
16	Birinci ionlaşma potensialı	8,1 eV
17	Dielektrik nüfuzluğu	16
18	Elektronların effektiv kütləsi	0,12 m <sub>0</sub>
19	Deşiklərin effektiv kütləsi	0,2 m <sub>0</sub>

200 K-dən yüksək temperaturalarda qadağan olunmuş zonasının eni temperaturdan xətti asılı olur:

$$\Delta E_0 = 0,782 - 3,9 \cdot 10^{-4} T \quad (\text{eV}).$$

Yarımkəçirici cihazların hazırlanmasında elektroaktiv aşqarlardan istifadə olunur. Ge əsasında müxtəlif cihazlar, ilk növbədə isə diod və tranzistorlar hazırlanır.

Müstəvi düzləndirici Ge diodlar gərginliyin 0,5V qiymətində düzünə cərəyanın 0,3-1000A qiymətinə hesablanır. Germanium diodlarının çatışmayan cəhəti əksinə gərginliyin çox da böyük olmamasıdır. Bu material əsasında hazırlanan tranzistorlar aşağıtezlikli və yüksəktezlikli olmaqla yanaşı, həm də kiçik güclü və güclü olur. SiO<sub>2</sub> izolyasiya qatından istifadə etməklə Ge-dan planar texnologiya əsasında tranzistorlar hazırlanır.

Germaniumdan, həmçinin tunel diodlarının, varikapların, nöqtəvi yüksəktezlikli, impuls və ifrat yüksəktezlikli diodların hazırlanmasında istifadə olunur. İmpuls diodlarında sürətli (ki-



çik ətalətli) keçirmə əməliyyatı təmin etmək üçün elə materialdan istifadə olunur ki, onlarda tarazlıqda olmayan sərbəst yükdaşıyıcıların yaşama müddəti kiçik olsun. Bunun üçün qızıl atomları ilə aşqarlanmış germaniumdan istifadə olunur. Qızıl aşqarı germaniumda rekombinasiya səviyyələri yaradır.

Sərbəst yükdaşıyıcıların yüksək yüyürüklüyə malik olması germaniumdan Holl qeydediciləri və digər maqnitəhəssas cihazların hazırlanmasında istifadə etməyə imkan verir.

Germaniumun optik və fotoelektrik xassələri bu materialdan fototranzistor, fotodiod, infraqırmızı şüalar üçün optik linza, optik filtr, işıq modulyatoru, nüvə hissəciklərinin sayğacları hazırlamağa imkan verir. Belə cihazların işçi temperatur diapazonu  $-60 \div +70^{\circ} \text{C}$  intervalında dəyişir. İşçi temperaturun yuxarı sərhədinin kiçik olması, germanium cihazlarının çatışmayan cəhətidir.

#### § 4.15. Silisium və onun tətbiq sahələri

Germaniumdan fərqli olaraq, silisium Yer kürəsində oksigendən sonra ən çox yayılmış elementdir. Yer qabığında onun kütlə hesabı ilə miqdarı 29,5%-ə çatır. Təbiətdə silisium sərbəst halda yox, birləşmələr şəklində mövcuddur. Onun ən geniş yayılmış birləşməsi  $\text{SiO}_2$ -dir. Sərbəst halda  $\text{SiO}_2$ -yə kvars mineralı şəklində rast gəlinir. Elektronikada yarımkeçirici material kimi, ötən (XX) əsrin ortalarından istifadə edilməyə başlanmışdır.

Kristal silisium da almaz kimi, kubik qəfəs quruluşuna malikdir. Silisiumun hər atomu dörd valentli rabitə ilə tetraedrin təpəsində yerləşən digər Si atomları ilə birləşir.

Kimyəvi baxımdan otaq temperaturunda silisium təsirsiz maddə hesab olunur. O, suda həll olmur və istənilən konsentrasiyada bir çox turşularla reaksiyaya girmir. Si - azot və flüorit turşularının qarışığında və həmçinin qaynar qələvi məhlulunda həll olur. Silisiumun əsas fiziki parametrlərinin qiymətləri cə-

vəl 4.3-də göstərilmişdir. 250 K-dən yüksək temperaturlarda onun qadağan olunmuş zonasının eni xətti qanunla dəyişir:

$$\Delta E = 1,205 - 2,84 \cdot 10^{-4} T.$$

Germaniumdan silisiuma keçid zamanı məxsusi optik udulmanın kənarı spektrin yaxın infraqırmızı oblastından görünən oblastına tərəf sürüşür. Normal şəraitdə Si, dalğa uzunluğu 1 mkm-dan böyük olan optik şüalar üçün şəffafdır.

Qadağan olunmuş zonasının eni böyük olduğundan, silisiumun xüsusi müqaviməti germaniumun xüsusi müqavimətindən üç tərtib böyük olur.

Kimyəvi Elementlərin Dövri Sistemindəki III və V qrup elementlərinin atomları silisiumda uyğun olaraq dayaz akseptor və donor, I, II, VI və VII qrup elementlərinin atomları isə -dərən aşqar səviyyələri yaradır.

*Cədvəl 4.3*

№	Parametrlər	Ədədi qiymətlər
1.	Qəfəs periodu	6,42·10 nm
2.	Sıxlıq (20 <sup>0</sup> C)	2,3 Mg/m <sup>3</sup>
3.	Xətti genişlənmənin temperatur əmsalı	4,2 · 10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
4.	Xüsusi istilikkeçiriciliyi	80 Vt/m·K
5.	Xüsusi istilik tutumu (0-100 <sup>0</sup> C)	710 C/Kq·K
6.	Ərimə temperaturu	1414 <sup>0</sup> C
7.	Xüsusi ərimə istiliyi	1,6·10 <sup>6</sup> C/Kq
8.	Ərimə temperaturunda səthigərmə əmsalı	0,72 N/m
9.	Xüsusi müqavimət (20 <sup>0</sup> C)	2·10 <sup>3</sup> Om·m
10.	Məxsusi yükdaşıyıcıların konsentrasiyası	10 <sup>16</sup> m <sup>-3</sup>
11.	Qadağan olunmuş zonanın eni (0-300 K)	1,165 eV, 1,12 Ev
12.	Elektronların yüyürəkliyi	0,14 m <sup>2</sup> /V·s
13.	Deşiklərin yüyürəkliyi	0,05 m <sup>2</sup> /V·s
14.	Elektronların çıxış işi	4,3 eV
15.	Birinci ionlaşma potensialı	8,14 eV
16.	Dielektrik nüfuzluğu	12,5
17.	Effektiv kütlə: Elektronların effektiv kütləsi Deşiklərin effektiv kütləsi	0,26 m <sub>0</sub> 0,39 m <sub>0</sub>

Böyük ölçülü inteqral mikrosxemlərin (BİS-lərin) hazırlanmasında polikristal silisiumdan istifadə olunur. Bu zaman silisium lövhəsinin üzəri  $\text{SiO}_2$  dielektrik pərdəsi ilə örtülür və onun üzərinə polikristal silisium çökdürülür.

Yüksəkumlu polikristal silisium təbəqəsi  $\text{SiO}_2$  qatı ilə birlikdə inteqral mikrosxemlərin (İS-lərin) ayrı-ayrı elementləri arasında elektrik izolyasiyası yaratmaq üçün istifadə olunur.

Planar tranzistorların və inteqral mikrosxemlərin yaradılmasında silisium əsas material kimi istifadə olunur. Kiçik ölçülərə və aktiv oblastların mürəkkəb konfigurasiyasına malik olduğundan onlardan gücləndirici cihaz və qurğularda, hesablama texnikasında istifadə olunur.

Silisiumdan düzləndirici, impuls və ifrat yüksək tezlikli diodların, alçaq və yüksək tezlikli, kiçik güclü və güclü bipolyar tranzistorların, o cümlədən sahə tranzistorlarının hazırlanmasında istifadə olunur. Silisiumdan düzəldilmiş planar tranzistorların işçi tezliyi 10 QHz-ə qədər çata bilər.

Silisium əsasında düzəldilmiş düzləndirici müstəvi diodlardan düzünə istiqamətdə 1500A-ə qədər cərəyan keçə bilməklə yanaşı, əks istiqamətdə tətbiq olunan gərginlik 1500V-a çata bilər. Stabiltron və tristorların böyük əksəriyyəti bu material əsasında düzəldilir. Aşqarlanmanın səviyyəsindən asılı olaraq stabilləşdirilən gərginliyin qiyməti 3V ilə 400V arasında dəyişir.

Optik şüalanmanın təsirinə çox qısa zaman müddətində (cəld) reaksiya verən fotohəssas diodların hazırlanmasında silisiumdan istifadə olunur. Fotodetektorun spektral həssaslığı diopozonu bir çox yarımkeçirici işıq mənbələrinin şüalanma spektri ilə uyğun gəlir. Bu material əsasında hazırlanmış fotoelementlər (günəş batareyaları) günəşin şüalandırdığı işıq enerjisini elektrik enerjisinə çevirmək üçün effektiv qurğular kimi geniş tətbiq olunur. Kosmik aparatların elektrik enerjisi ilə təminatında başlıca olaraq bu fotoelementlərdən istifadə olunur. Onların faydalı iş əmsalı, adətən 10-12%- ətrafında olur.

Silisium həm də şüalanma detektorlarının, Holl qeydedicilərinin və tenzoqeydedicilərin düzəldilməsi üçün keyfiyyətli materialdır.

Qadağan olunmuş zonasının eni böyük olduğundan, silisium cihazlarının işçi temperaturu daha yüksək olub, 180-200<sup>0</sup>C ətrafındadır.

#### § 4.16. Karbidlər və onların tətbiq sahələri

Karbonun digər elementlərlə birləşmələrinə karbidlər deyilir. Silisium karbid karbonun yeganə binar birləşməsidir ki, yarımkəçirici xassəsinə malikdir. Bu birləşmə karborund adlanır. Karborund (SiC) elektrik sobasında 2000<sup>0</sup>C-də silisium-iki oksidin karbonla birləşməsindən alınır. Karborund kristalları heksaqonal quruluşa malik olub, təmiz halda rəngsizdir. Lakin ona aşqar daxil edildikdə açıq sarı, yaxud da yaşıl rəngdə olur.

Karborundun heksaqonal modifikasiyalrı kristal quruluşda atomların düzülüşü ilə fərqlənir. Karborundun (SiC) iki modifikasiyası:  $\alpha$ -SiC və  $\beta$ -SiC mövcuddur.  $\alpha$ -SiC modifikasiyası bir layda eyni tip atomların müxtəlif istiqamətdə düzülüşü ilə fərqlənən politiplərdən ibarətdir. SiC 100-dən artıq politipə malikdir. Karborundun ən geniş yayılmış politiplərinin elektrofiziki xassələri cədvəl 4.4-də verilmişdir.

Cədvəl 4.4

Modifikasiya	$\beta$ -SiC	$\alpha$ -SiC			
		15R	6H	4H	2H
Politiplərin simvolları	3C	15R	6H	4H	2H
Qəfəsin periodu 10 nm (300K)	0,459	3,073(a) 37,3 (c)	3,081 15,12	3,076 10,05	- -
Qadağan olunmuş zonanın eni, eV (300K)	2,39	2,986	3,023	3,365	3,333

Elektronların yüyürüklüyü (300K) $m^2/V \cdot s$	0,1	0,05	0,033	0,07	-
Deşiklərin yüyürüklüyü (300K) $m^2/V \cdot s$	0,0006	0,006	0,006	0,006	0,006

Karborund ən bərk materiallardan biridir. O,  $1400^{\circ}\text{C}$ -ə kimi oksidləşmir, otaq temperaturunda turşularda həll olmur, yalnız qızdırıldıqda qələvi ərintilərində həll olur. Bu maddə ortofosfat turşusunun və ( $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ ) qarışığının təsirini hiss edir.

SiC-in elektrik keçiriciliyinin xüsusiyyətləri aşqarın növündən və SiC birləşməsinin stexiometrik tərkibdən kənara çıxması ilə müəyyən edilir. SiC-in tərkibində stexiometrik tərkibdən artıq miqdarda Si atomları olduqda o, n-tip, stexiometrik tərkibdən artıq miqdarda C atomları olduqda isə p-tip keçiriciliyə malik olur. Kimyəvi Elementlərin Dövri Sisteminin V qrupunun elementləri (fosfor, mərgümüş, sürmə, bismut) aşqar kimi SiC-ə daxil olduqda onun rəngi yaşıl olmaqla yanaşı, həm də n-tip keçiriciliyə malik olur; II (Ca, Mg) və III (B, Al, Ga, İn) qrup elementləri aşqar kimi daxil olduqda isə keçiriciliyi p-tip, rəngi isə mavi və bənövşəyi olur. Silisium karbidə məxsusi keçiricilik  $\sim 1400^{\circ}\text{C}$ -dən yüksək temperaturlarda baş verir.

Bu birləşmənin daha çox nəzərə çarpan xüsusiyyəti spektrin görünən oblastında lüminessensiya etməsidir. Müxtəlif politiplərdən istifadə etməklə və silisium karbidə müxtəlif aşqarlar daxil etməklə əlvan rəngli lüminessensiya əldə etmək mümkündür. Bu da öz növbəsində həmin material əsasında işıq diodlarının hazırlanmasına imkan verir. SiC əsəsindəki işıq diodlarının çatışmayan cəhəti elektrik enerjisinin işığa çevrilməsinin az effektivliyə malik olmasıdır. Xarakteristikalarının stabilliyi və deqradasiyaya uğramaması isə SiC əsəsindəki diodların üstün cəhətlərindəndir. Bu xüsusiyyət həmin diodlardan ölçü qurğularında etalon və nümunəvi işıq mənbəyi kimi istifadə etməyə imkan verir.

Silisium karbiddən aqressiv kimyəvi mühitdə işləyə bilən və praktiki əhəmiyyət kəsb edən güclü düzləndirici diodların, yüksəktemperaturlu tenzorezistorların, yüksək enerjili zərrəcikləri qeyd edən qurğuların düzəldilməsində istifadə olunur. Bundan əlavə, SiC-dən həm də yaxşı tezlik xarakteristikasına malik sahə tranzistorları, ifrat yüksək tezlikli diodlar, termistorlar hazırlanır. Qadağan olunmuş zonasının eninin böyük olması, bu cihazların əksəriyyətinin işçi temperatur diapazonunun yuxarı sərhədini  $500^{\circ}\text{C}$ -ə çatdırmağa imkan verir.

#### § 4.17. $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ birləşmələri tipli yarımkeçiricilər

$A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  birləşmələri tipli yarımkeçiricilər Kimyəvi Elementlərin Dövri Sisteminin III qrupuna daxil olan alüminium, qallium və indiumun, V qrupun elementlərindən fosfor, mərgümüş və sürmə ilə birləşməsindən alınır. Nitridlərdən fərqli olaraq,  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  birləşmələrinin hamısı sfalerit tip qəfəs quruluşunda kristallaşır. Nitridlər üçün isə heksaqonal quruluş xarakterikdir.

Optik və elektrik ölçmələri əsasında tətbiq sahələri geniş olan əsas birləşmələrin enerji zonalarının quruluşu müəyyən edilmişdir. Bu birləşmələrdə elektronların effektiv kütləsi kiçik olduğu üçün yüyürüklüyü kifayət qədər böyük qiymətə malikdir. Sərbəst yükdaşıyıcıların yüksək temperaturlarda qəfəsin optik rəqslərindən, aşağı temperaturlarda isə aşqar ionlarından səpilməsi üstündür.  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  birləşmələri tipli yarımkeçiricilərin parametrlərinin təcrübələr nəticəsində tapılmış qiymətləri cədvəl 4.5 verilmişdir.

Mexaniki möhkəmliyi, kimyəvi dayanıqlığı, elektrik, fotoelektrik və optik xassələrinin bir-biri ilə ahəngliyi  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  birləşmələri tipli yarımkeçirici materiallar əsasında praktiki tətbiq imkan və sahələri geniş olan bir sıra yarımkeçirici cihazlar düzəltməyə imkan verir. Belə materiallara tələbat optoelektron

qurğularında ani olaraq işləmə rejiminə keçmək xüsusiyyətinə malik işıq mənbələrinin və şüalanma qəbuledicilərinin hazırlanmasına olan ehtiyacdan da irəli gəlir.

Cədvəl 4.5

Əsas parametrlər	BİRLƏŞMƏLƏR												
	BN	AlN	GaN	InT	AlP	GaP	InP	AlAs	GaAs	InAs	AlSb	GaSb	InSb
Qəfəs sabiti $\times 10^8 \text{m}^{-1}$	3,615	3,110 (a) 4,975 (c)	3,186 (a) 5,176 (c)	3,540 (a) 5,704 (c)	5,463	5,451	5,869	5,661	5,653	6,058	6,136	6,096	6,47
Sıxlıq $10^3 \text{Kq/m}^3$	3,40	3,28	6,11	6,91	2,37	4,07	4,78	3,60	5,32	5,67	4,28	5,65	5,78
Ərimə temperaturu, $^{\circ}\text{C}$	3000	2400	1700	1100	2000	1467	1070	1770	1238	942	1060	710	525
Xətti genişlənmənin temperatur əmsali, $\alpha \cdot 10^6 \text{K}^{-1}$	-	6,1	5,65	-	4,2	5,9	4,6	5,2	6,4	5,3	4,2	6,2	4,9
Qadağan olunmuş zonanın eni, eV	6	5,88	3,40	1,95	2,45	2,26	1,35	2,16	1,43	0,36	1,58	0,12	0,18
Elektronların yüyürüklüiyü, $\text{m}^2/\text{Vs}$	-	-	6,03	-	0,008	0,019	0,46	0,028	0,95	3,3	0,02	0,4	7,8
Deşiklərin yüyürüklüiyü, $\text{m}^2/\text{Vs}$	-	-	-	-	0,0003	0,012	0,015	-	0,045	0,046	0,055	0,14	0,07
Alçaq tezlikli dielektrik nüfuzluğu	7,1	9,1	12,9	-	9,8	11,1	12,4	10,1	13,1	14,6	14,4	15,7	17,7

İşıq mənbəyi olaraq istifadə edilən işıq diodu qeyri-koherent şüalanma mənbəyi olub, işləməsi elektrolüminessensiya hadisəsinə əsaslanır. Cədvəl 4.6-da  $A^{III}B^V$  birləşmələri tipli yarımkeçiricilər əsasında hazırlanmış işıq diodlarının əsas parametrləri verilmişdir.

Materiallar	Maksimal şüalanmaya uyğun dalğa uzunluğu	İşçi cərəyan	İşçi gərginlik	Ətalətliyi	Parlaqlıq
	$\lambda_m$	J, mA	U, V	nsan	L, kd/m <sup>2</sup>
GaP	0,56	50	4,0	10	340
GaAs <sub>x</sub> P <sub>1-x</sub>	0,60	50	4,0	2000	260
GaAs <sub>x</sub> P <sub>1-x</sub>	0,61	50	2,0	1	500
GaAs <sub>x</sub> P <sub>1-x</sub>	0,67	50	1,65	1	3400
Ga <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> As	0,68	50	1,65	10	1000
GaP	0,70	10	-	100	500

Yarımkəçirici lazerlər və işıq diodları kosmonavtikada, texniki rəbitədə, informasiya, ölçmə və müdafiə texnikasında istifadə olunur. İlk dəfə yarımkəçirici injeksiya lazeri GaAs əsasında düzəldilmişdir. Belə koherent şüalanma mənbəyi p-n keçid əsasında yaradılır. P-n keçiddə lazer effektinin baş verməsi üçün keçiddən axan cərəyanın sıxlığı müəyyən hədd qiyamətindən böyük olmalıdır. Arsenid qallium əsasında hazırlanmış optik kvant generatorunun parametrləri cədvəl 4.7-də verilir. GaAs-dən düzəldilmiş (Qann diodlarında) ilk dəfə ifrat-yüksək tezlikli rəqslərin generasiyası (Qann effekti) müşahidə edilmişdir. Sonralar belə diodlar InP və GaAs<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub> əsasında da düzəldilmişdir. Qann diodları həm kəsilməz, həm də impuls rejimlərində işləyə bilər.

GaAs, GaSb və InSb əsasında tunel diodları, yüksəktemperaturlu düzləndiricilər və tranzistorlar da düzəldilir.



Parametrlər	Temperatur T, K	
	4:77	300
İmpulsdakı gücü (P), Vt	0,01-2,0	2-800
Cərəyan hüdudu (J), A	0,3-5,0	12-300
Şüalanmanın dalğa uzunluğu ( $\lambda$ ), mkm	0,84	0,91
Şüanın səpilmə (ayrılma) bucağı ( $\theta$ ), rad	0,15-0,35	0,15-0,35
Qidalandırıcı cərəyan impulsunun davametmə müddəti, mksan	5-0,2	0,2-2,1
İmpulsların ardıcılıq tezliyi ( $\nu$ ), hs	200-1000	0,5-1000

#### § 4.18. Oksid yarımkeçiricilər

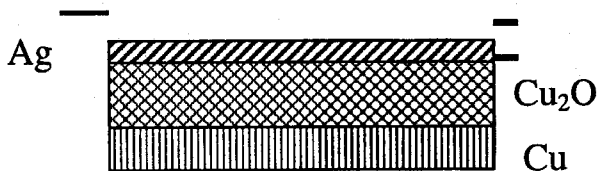
Keçid metallarının bəzi oksidləri yarımkeçirici xüsusiyyətinə malikdir. Belə yarımkeçiricilərə mis, sink, kadmium, titan, molibden, volfram, uran, marqans və nikel oksidləri aiddir. Mis ( $\text{CuO}_2$ ) və marqans oksidinin ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) bəzi xassələrinə baxaq.

İon qəfəs quruluşuna malik yarımkeçirici  $\text{Cu}_2\text{O}$  təbəqəsi mis lövhə üzərində yüksək temperaturda alınır. Bu təbəqə tünd qırmızı moruq rəngində olub, dəşik keçiriciliyinə malikdir. Mis oksidin ərimə temperaturu  $1230^\circ\text{C}$ , qadağan olunmuş zonanın eni isə  $1,56\text{ eV}$ -dir.

$\text{Cu}_2\text{O}$ -də sərbəst dəşiklərin yüyürüklüyü  $80\text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{san}\cdot\text{yə}$ , materialın xüsusi elektrik keçiriciliyi isə alınma texnologiyasından və tərkibindəki aşqarlardan asılı olaraq  $10^{-6}\text{ Om}^{-1}\text{ sm}^{-1}$ -ə çatır.

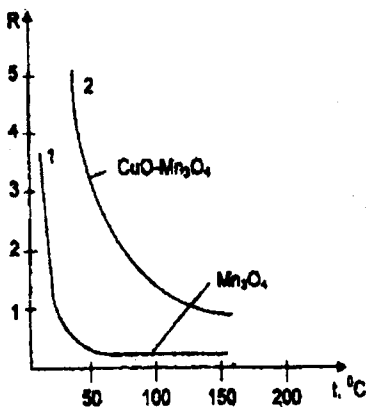
Mis lövhə üzərindəki  $\text{Cu}_2\text{O}$  təbəqəsini oksidləşdirici mühitdə termik aşılamaqla onun əsasında elektron-deşik keçidi (p-n keçid) yaratmaq olar. Bunun üçün qaz mühiti tərəfindən oksid təbəqəsində akseptor rolu oynayan oksigenin diffuziyası yaradılır. Mis lövhə tərəfdən mis atomları təbəqəyə daxil olaraq asanlıqla elektron verərək p-n keçid əmələ gətirir.

Mis oksidi əsasında hazırlanmış düzləndiricinin bir elektrodu rolunu mis lövhə, digərini isə - vakuumda gümüşün buxarlandırılması yolu ilə yaradılmış gümüş təbəqə oynayır. Bəzən ikinci elektrod kimi mis-nikel xəlitəsindən də istifadə edilir.



Şəkil 4.13

Yarımkeçirici manqan-oksidi tetraqonal kristal qəfəs quruluşuna malikdir. Bu yarımkeçiricinin ərimə temperaturu  $1700^\circ\text{C}$ , qadağan olunmuş zonasının eni isə 1,25 eV-dır. Polikristal manqan-oksidinin müqavimətinin temperaturdan asılılığı şəkil 4.14-də təsvir edilmişdir.



Şəkil 4.14

Şəkildəki 1-əyrisindən görüldüyü kimi, müqavimətin qiyməti temperaturun yüksəlməsi ilə kəskin azalır.  $Mn_3O_4$ -ün müqavimətinin temperatur əmsalı mənfi olduğundan, bu materialdan termorezistorların (termistorların) hazırlanmasında istifadə edilir. Bu məqsədlə  $Cu_2O-Mn_3O_4$ ;  $NiO-Mn_3O_4$ ;  $NiO-Co_3O_4$  yarımkeçirici qarışıqlarından və mürəkkəb quruluşlu oksid birləşmələrdən də istifadə edilir.

#### § 4.19. Şüşəvari yarımkeçiricilər

Bir sıra hallarda qeyri-üzvi şüşələr də yarımkeçirici xas səyə malikdir. **Şüşəvari yarımkeçiricilər** adlanan bu materiallar da kristallar kimi zona quruluşuna malikdir. Lakin quruluşun pozulması valent və keçirici zonaların genişlənməsinə, qadağan olunmuş zonanın eninin isə kiçilməsinə səbəb olur. Adi şüşələr ion keçiriciliyinə malik olduğu halda, yarımkeçirici şüşələr elektron keçiriciliyinə malikdir. Belə materiallara aşqarın daxil edilməsi kristallardan fərqli nəticələrə gətirir. Bu zaman aşqar atomları qəfəsin düyün nöqtələri arasında yerləşərək, bu aralığın genişlənməsinə səbəb olur. Bu isə öz növbəsində qadağan olunmuş zonada olan lokal səviyyələrin yerdəyişməsi ilə nəticələnir. Belə ki, donor səviyyələri valent, akseptor səviyyələri isə keçirici zonaya doğru sürüşür və aşqar səviyyələrin keçiriciliyə təsiri kifayət qədər zəifləyir, aşqar keçiricilik aradan qalxır.

Metal oksidi və ərintiləri tipli şüşəvari yarımkeçiricilərlə yanaşı, oksigensiz yarımkeçirici birləşmələr də mövcuddur. Belə birləşmələrdə kükürd, selen və tellur iştirak etdiyindən onlar halkogenid şüşələr adlanır.

Oksigenli yarımkeçiricilərə misal olaraq vanadium-fosfat ( $V_2O_5-P_2O_5-Me_xO_y$ ) tipli yarımkeçirici şüşələri göstərmək olar. Burada Me - metal göstəricisi olub, kadmium, sink, sürmə, kobalt və s. ola bilər. Vanadium-fosfat şüşəsi spektrin görünən oblastında qeyri-şəffaf olduğu halda, infraqırmızı şüalar ( $2\div 5$  mkm) üçün

şəffafdır. Onun xüsusi elektrik keçiriciliyi  $10^{-12} \div 10^{-5} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$  intervalında dəyişir. Tərkibində 80 %  $\text{V}_2\text{O}_5$ , 20%  $\text{P}_2\text{O}_5$  olan şüşə, dəşik keçiriciliyinə malik olduğu halda, 20% sürmə-oksidi əlavə edildikdə n-tip keçirici olur. Bu materialda keçiriciliyin temperaturdan asılılığı eksponensial xarakterlidir. Halkogenid şüşələrin yumşalma temperaturu  $200-450^\circ\text{C}$  aralığındadır. Bu növ şüşə birləşmələrinin tərkibində Ge komponenti olduqda, yumşalma temperaturu  $550^\circ\text{C}$ -ə çatır. Belə şüşələr dalğa uzunluğu 1-17 mkm olan infraqırmızı şüalar üçün şəffafdır və qadğan olunmuş zonasının eni kifayət qədər böyükdür (Məsələn, SeAs- 1,7eV, SeGe- 2,2 eV). Şüşələrdə sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü kiçikdir ( $10^{-8} \text{ sm}^2/\text{Vs}$  tərtibindədir). Bu cür şüşələrin xüsusi elektrik keçiriciliyi  $10^{-14} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$  və daha kiçik olur. Onların dielektrik nüfuzluğu isə kifayət qədər böyükdür ( $9,5 \cdot 10^9$  Hs-də 7,5-10,0). Bu xüsusiyyətlər və dielektrik itkisinin kiçik olması ( $\text{tg}\delta < 6 \cdot 10^4$ ) həmin materiallardan kondensatorlarda istifadə etməyə imkan verir. Uyğun şəffaflıq spektrinə və fətohəssaslığa malik olması, bu materiallardan televiziyaya texnikasında geniş istifadə etməyə imkan yaradır. Halkogenid şüşələrin kiçik elektrik keçiriciliyinə malik olması, onlardan vakuum texnologiyasında, mikroradioelektrikada nazik təbəqə elementləri üçün altlıq kimi istifadə etməyə imkan yaradır.

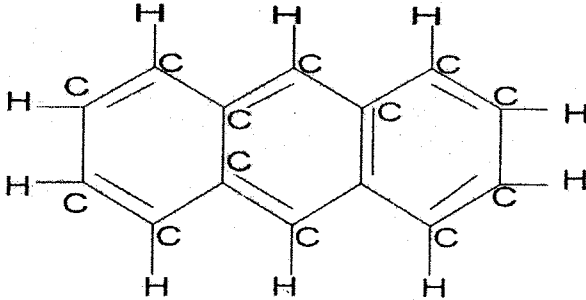
#### § 4.20. Üzvi yarımkəçiricilər

Üzvi yarımkəçiricilərə elə kimyəvi birləşmələr aid edilir ki, onlarda, keçiricilik ionlar deyil, elektron və deşiklər hesabına yaranır. Bu birləşmələrin xüsusi elektrik keçiriciliyi  $10^{-16} \div 10^{-1} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  aralığında dəyişir və temperaturun yüksəlməsi ilə artır.

Bundan əlavə, yarımkəçiricilərə məxsus Holl və fotoefekt hadisələri də üzvi yarımkəçiricilərdə müşahidə olunur. Onların yarımkəçiricilərdən əsas fərqli cəhətlərindən biri sər-

bəst yükdaşıyıcıların yüyürlüklüyünün bir neçə tərtib kiçik olmasındır.

Üzvi bərk yarımqeçiricilərə xas olan əlamətdar xüsusiyyət bir-birinə bağlı aromatlı həlqələrin mövcudluğudur. Belə quruluş yarımqeçirici antrasenitə xasdır (şəkil 4.15).



Şəkil 4.15. Antrasenitin quruluşu

O, üç benzol həlqəsindən ibarətdir. Bu növ yarımqeçiricilərdə keçiricilik, sərbəst yükdaşıyıcıların molekulların daxilində hərəkəti və eyni zamanda onların bir molekuldan digərinə keçməsi ilə əlaqədardır. Molekullar arasında sadə (birqat) və mürəkkəb (ikiqat) rabitə mövcuddur. Sadə rabitə molekul daxilində olan qonşu atomların iki elektronları vasitəsilə yaranır. Bu elektronlar  $\sigma$ -elektronlar adlanır.  $\sigma$ -elektronların yerləşdiyi müstəviyə perpendikulyar müstəvidə yerləşən elektronlar isə  $\pi$ -elektronlar adlanır. İkiqat rabitə iki cüt elektronlar arasında baş verir. Belə cüt elektronlar müxtəlif rabitə enerjisinə malikdir.  $\sigma$  - elektronların rabitə enerjisi 59 kkal/mol,  $\pi$  - elektronlarınki isə 41 kkal/mol-dur.  $\sigma$  - elektronlarla əlaqədar keçiricilik az ehtimallıdır. Çünki  $\sigma$  - elektronların sərbəstləşməsi üçün 8eV enerji tələb olunur və bu proses molekulun parçalanması ilə gedir. Molekul daxilində elektron keçiriciliyi yalnız bağlı rabitələrin mövcudluğu şəraitində baş verə bilər. Polimer yarımqeçiricilərdə əlaqəli zəncirlərin uzunluğu artdıqca elektrik keçiriciliyi artır. Bir-biri ilə rabitədə olan molekullarda  $\pi$  - elektronların sayı  $N$  - olarsa, aktivləşmə enerjisi

$$E_{ak} = \frac{h^2}{8m^*l} \frac{N+1}{N^2} \quad (4.27)$$

ifadəsi ilə təyin olunur. Burada  $l$  – molekulların əmələ gətirdiyi zəncivari hədqələrin uzunluğudur.

Temperaturun yüksəlməsi ilə keçiricilik

$$\sigma_T = \sigma_0 e^{\frac{E_{ak}}{KT}} \quad (4.28)$$

qanunu ilə artır.  $E_{ak}$  – aktivləşmə enerjisi 0,02÷1,7eV intervalında dəyişir.

Üzvi yarımkəçiricilərdə daxili və ventillə fotoeffekt hadisələri müşahidə olunur. Aromatik birləşmələrin metallarla kontaktında foto-e.h.q. yaranır. Bu növ materiallarda fotokeçirilik işığın intensivliyinin və temperaturun yüksəlməsi ilə artır və müəyən spektral xarakteristikaya malikdir. Üzvi yarımkəçiriciyə oksigen daxil etməklə onun fotokeçiriliyini artırmaq olur.

#### § 4.21. Bərk üzvi yarımkəçiricilərin təsnifatı

Bərk üzvi yarımkəçiriciləri molekulyar kristallar, molekulyar və metalüzvi komplekslər, polimer yarımkəçiricilər və piqmentlər kimi qruplara ayırmaq olar.

**Molekulyar kristallara** çoxsilsiləli az molekullu aromatik birləşmələr daxildir. Azmolekullu yarımkəçiricilərin fərqləndirici xüsusiyyəti onların kristallığı və ikiqat rabitəli aromatik həlqəli sistemə malik olmasıdır. Belə birləşmələrə antrasen, naftalin, fenantren, perilen, koronen, violantron və s. daxildir. Bu sinfə daxil olan materiallar p-tip keçiriciliyə və 1÷3eV tərtibində aktivləşmə enerjisinə malikdir. Onlarda sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü və xüsusi elektrik keçiriciliyi çox kiçikdir.

**Molekulyar komplekslərin** əsas xüsusiyyəti onların çoxsiləli azmolekullu birləşmələr olması və molekullar arasındakı əlaqənin elektron qarşılıqlı təsiri ilə təyin edilməsidir. Molekulyar komplekslər molekulyar kristallara nisbətən böyük elektrik keçiriciliyinə malikdir. Bu birləşmələrdə molekulların biri elektronu özünə birləşdirdiyi halda, ikincisi onu verə bilər ki, bu da akseptor-donor tipli birləşməyə uyğun gəlir. Bir molekuldan digərinə yükün verilməsi nəticəsində ion rabitəsi yaranır. Donor xüsusiyyəti naftalinə, pirenə, perilenə, iolantren aromatl birləşmələrə, akseptor xüsusiyyəti isə tetrasianetilenə, brom və yoda xasdır. Donor və akseptor molekulları arasındakı nisbət yarımkəçiricinin xassələrinə təsir edir. Molekulyar komplekslər öz quruluşlarına görə laylı və bütöv olur. Məsələn, hallogenin aromatl kompleks bütöv, antrasenin qələvi metallarla birləşməsi isə laylı quruluşa malik olur.

**Metalüzvi komplekslər** qrupuna mərkəzində metal atomu yerləşən azmolekullu maddələr daxildir. Belə birləşmələrdə aktivləşmə enerjisi 1 eV tərkibindədir. Sərbəst yükdaşıyıcıların yüyürüklüyü isə  $10^2 \text{ sm}^2/\text{V}$  san-ə çata bilər. Əsas yükdaşıyıcıları deşiklərdir. Xüsusi elektirik keçiriciliyi  $10^{-13} \div 10^{-9} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  aralığında qiymətlər alır. Metal-üzvi komplekslər polimerləşmə xüsusiyyətinə malikdir.

Polimer yarımkəçiricilərin azmolekullu birləşmələrdən fərqləndirici xüsusiyyəti onların uzun əlaqəli zəncivari makromolekula və mürəkkəb fiziki-kimyəvi quruluşa malik olmasıdır. Əlaqəli zəncirlərin uzunluğunun artması onların keçiriciliyinin böyüməsinə və aktivləşmə enerjisinin kiçilməsinə səbəb olur. Çoxsaylı polimer yarımkəçirici birləşmələr qrupuna hetero- və metal silsiləli əsas zəncirlər, asılılıq əlaqəli sistemlər və əlaqəli zəncirlərdə aromatik nüvəli polimerlər daxildir.

## § 4.22. Yarımkəçirici materialların alınması

Yarımkəçiricilərin fiziki xassələri, ilk növbədə onlardakı kənar maddələrin idarə olunmayan atom və molekullarının (aşqarların) miqdarı ilə təyin olunur. Elektron texnikasında istifadə edilən materiallarda belə idarə olunmayan aşqarların konsentrasiyasından asılı olaraq, onlardan hazırlanmış cihazların parametrləri əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənir. Bu səbəbdən də yarımkəçiricilərin tərkibindəki idarə olunmayan, eləcə də məqsədyönlü daxil edilmiş aşqar atomlarının paylanması məsələsi əsas texnoloji problemlərdəndir.

Hal-hazırda yarımkəçiricilərin alınması üçün müxtəlif texnoloji üsullardan istifadə olunur. Bunlardan biri də zona əritmə üsulu ilə yarımkəçirici materialların təmizlənməsi və əritidən dartılma yolu ilə monokristalların alınmasıdır. Ərimiş halda olan maye zonanı çubuqşəkilli germanium və ya silisium külçəsi boyunca hərəkət etdirməyə başladığında aşqar atomları maye faza ilə birlikdə hərəkət edərək, çubuğun o biri başına çatdıqda temperatur aşağı salınır. Nəticədə maye zona bərk hala keçir və aşqarlar bu hissədə qalır. Prosesi bir neçə dəfə təkrar etməklə germanium və silisiumu kənar kimyəvi elementlərin atomlarından kifayət qədər yüksək dərəcədə təmizləmək olur. Bu zaman maye faza zonasını əldə etmək üçün xüsusi konstruksiyalı yüksək tezlikli qızdırıcıdan istifadə edilir.

Germanium və silisiumun zona əritmə üsulu ilə təmizlənməsi yalnız istifadə edilən çubuqşəkilli şaquli və ya üfüqi vəziyyətdə yerləşdirilməsi ilə fərqlənir. Germaniumdan silindrik formada düzəldilmiş külçə üfüqi vəziyyətdə qrafit tiqəldə tər-pənmez vəziyyətdə yerləşdirilir. Yüksək tezlikli qızdırıcı 50-100 mkm/s sürətlə həmin külçə boyunca hərəkət edir. Maye faza zonasının eni 40-50 mm arasında dəyişir. Təmizlənmiş germanium külçənin uzunluğu 1 m və ondan böyük ola bilər. Əməliyyat hidrogen mühitində aparılır.

Germaniumdan fərqli olaraq, silisium qrafitə qarşı reaksiya verir. Buna görə də silisium üçün əməliyyat təsirsiz qaz



mühitində tiqelsiz şaquli vəziyyətdə aparılır. Maye silisiumun səthigərilmə əmsalı böyük olduğundan, bütün proses ərzində maye faza zonası öz formasını saxlayır. Hər iki halda alınmış materialın keyfiyyəti onun xüsusi elektrik müqavimətinin ölçülməsi ilə müəyyən edilir.

Mükəmməl quruluşlu germaniumun monokristalının alınması üçün ərintidən kristalın dartılması üsulundan istifadə olunur. Bu məqsədlə içərisində  $10^{-4}$  Pa tərtibində vakuum yaradılmış və ya qoruyucu qaz mühiti olan kamerada xüsusi formalı qrafit qızdırıcının içərisində kvars qab yerləşdirilir. Həmin qabın içərisində maye halda olan germaniumun bütün həcmində temperatur sabit saxlanılır.

Müəyyən kristalloqrafik istiqamətdə yönəldilmiş germanium monokristal külçə xüsusi formalı silindrşəkilli milin ucunda yerləşdirilərək, uc hissəsi maye halda olan germanium ərintisinə salınır və müəyyən müddətdən sonra ona fırlanma hərəkəti verilərək kiçik sürətlə yuxarıya doğru qaldırılır. Maye haldakı ərintidən yuxarıya doğru dartılan hissə, kameranın temperaturu aşağı olan hissəsinə daxil olduqda bərkilərək seçilmiş monokristal halına keçir. Bu halda yuxarıya doğru dartma sürəti  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  m/san aralığında dəyişə bilər. Dartılan külçənin diametrini ərintinin temperaturunu dəyişməklə idarə etmək mümkündür. Monokristal külçənin diametrinin külçə boyunca sabit qalması üçün ərintinin temperaturu onda bir dərəcə dəqiqliklə sabit saxlanmalıdır. Bu üsul ilə diametri 10 sm-ə qədər olan germanium monokristal külçələri əldə etmək mümkündür. Monokristalın dartılması zamanı onun aşqarlanması prosesini də həyata keçirmək olar. Bunun üçün ərintiyə tələb olunan miqdarda aşqar maddəsi əlavə etmək lazımdır. Əksər hallarda n-tip germanium almaq üçün sürmədən, p-tip germanium almaqdan ötrü isə qalliumdan istifadə olunur. Bu üsulla, silisium monokristalını da almaq olur.

Yarımkeçirici birləşmələrin (mürəkkəb yarımkeçiricilərin) alınma texnologiyası elementar (bəsit) yarımkeçiricilərin

alınma texnologiyasından yalnız onların əlavə olaraq sintezi əməliyyatı ilə fərqlənir. Mürəkkəb yarımkeçiricilərin sintezdən sonrakı texnologiyası (təmizlənmə, aşqarlanma, monokristalın göyərdilməsi) elementar yarımkeçiricilərin texnologiyası ilə demək olar ki, eynidir.

#### § 4.23. Yarımkeçirici strukturların hazırlanması

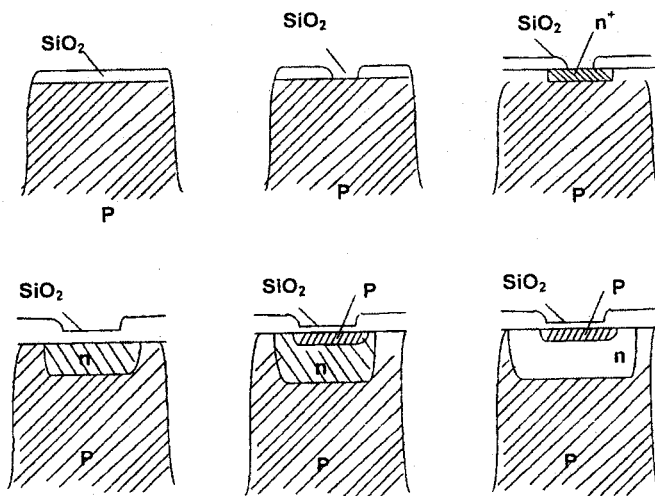
Yarımkeçirici cihazların böyük əksəriyyəti p-n keçidlər əsasında düzəldilir. Bu p-n keçidlərin alınma üsullarından biri, ərintidən dartılma prosesində yarımkeçirici monokristalın aşqarlanmasıdır. Beləki, əvvəlcə ərintidən n-Ge monokristalı dartılır və müəyyən müddətdən sonra həmin ərintiyə yüksək dərəcədə aşqarlanmış p-Ge əlavə edilir. Prosesin sonunda eyni bir külçədə onun oxu boyunca bir-birini əvəzləyən (ardıcıl) n- və p-tip oblastlar yarandığından p-n keçidlər əmələ gəlir. Başqa bir üsul isə, ərintinin aşqarlanmasının təkcə ondakı aşqarın miqdarından deyil, həm də monokristalın ərintidən dartılma sürətindən asılı olmasına əsaslanır. Maye və bərk fazada yarımkeçiricidəki aşqarların paylanma əmsalının qiyməti akseptor aşqarları ilə müqayisədə donor üçün daha böyük olur. Əgər ərintidə donor aşqarları akseptorlara nisbətən çox olarsa, yavaş dartılmada monokristalda n-tip oblast, sürətli dartılmada isə p-tip oblast yaranır. Bu xüsusiyyət imkan verir ki, dartılma sürətini ardıcıl olaraq artırıb-azaltmaqla alınmış monokristal külçədə onun oxu boyunca bir-birini əvəz edən n- və p- hissələrin yaranması təmin edilsin. p-n keçidi əritmə üsulu ilə də almaq mümkündür. Məsələn, n-tip germanium lövhə üzərində indium yerləşdirilir və onlar birlikdə vakumda  $500^{\circ}\text{C}$ -ə qədər qızdırılır. Ərimiş germanium lövhəsi üzərində kiçik oblastda indium ərintisi əmələ gəlir. Təkrar soyudulma prosesində germaniumda kristallaşma başladıqda onun qəfəsinə indium atomları girir, bu da p-tip oblastın əmələ gəlməsinə səbəb olur. Beləliklə, n- və p-tip germanium oblastları arasında p-n keçid yaranır.

p-n keçidin alınması üçün geniş tətbiq tapmış daha bir üsul donor və akseptor atomlarının əsas materiala diffuziyasına əsaslanır. Diffuziya prosesinin baş verməsi üçün tozlandırma üsulu və ya yüksək temperaturda qaz fazasının köməkliliklə yarımkəçirici lövhə üzərində akseptor və donor aşqarlarının nazik qatını yaratmaq lazımdır. Bu zaman verilmiş forma və ölçüdə p-n keçid əldə etmək üçün xüsusi maskalardan istifadə olunur.

İnteqral sxemlərin elementləri yaradılarkən tranzistor, diod, rezistor, kondensator və digər elementlər yarımkəçirici oblastın müxtəlif yerlərində alınır. İnteqral sxemlərdə başlıca olaraq silisiumdan istifadə edilir. Bunun üçün qalınlığı 0,25 mm olan lövhələr hazırlandıqdan sonra, onları ardıcıl mərhələlərlə cılalamaq, pardaxlamaq, təmizləmək, kimyəvi aşılamaq, yumaq və qurutmaq lazımdır. Alınmış oblastları bir-birindən təcrid etmək üçün aralıqların yaradılması əsas amillərdən biridir. Bu məqsədlə maskalamadan istifadə olunur. Silisiumun maskalanması üçün əksər hallarda onun səthini oksigen və ya su buxarı mühitində termik oksidləşdirirlər. Bu zaman silisiumun səthində qalındığı bir neçə on mikron tərtipində olan  $\text{SiO}_2$  örtüyü yaranır. Belə örtüklər donor və akseptor aşqarlarının diffuziyası üçün keçilməz olur. Fotokimyəvi üsulla turşuya davamlı  $\text{SiO}_2$  qatları yaradılır. Bundan sonra  $\text{SiO}_2$  maskası ilə qorunmayan qat flüorit turşusu vasitəsilə kənarlaşdırılır. Əmələ gəlmiş aralıqlardan aşqarlar silisiuma daxil edilir. Aşqar komponentləri olaraq bor (akseptor) və fosfordan (donor) istifadə edilir. Diffuziya  $1200^0$ - $1300^0$  C-də aparılır və diffuziya sürəti olduqca böyük olmaqla yanaşı, həm də başqa oblastlara keçmir. İnteqral sxemlərin alınmasında ikipilləli sxemlərdən istifadə olunur (şəkil 4.16). Əvvəlcə aşqar çox da böyük olmayan dərinliyə diffuziya edir və yüksək dərəcəli aşqarlanma oblastı «+» simvolu ilə işarə olunur.

Silisium əvvəlcə hava mühitində  $1200^0$  C-də oksidləşdirilərək səthində qoruyucu  $\text{SiO}_2$  qatı yaradılır. Bu qoruyucu qatın

mövcudluğu silisiumun səthini korlamadan uzun müddətli diffuziya aparmağa imkan verir. Sonradan həmin proseslərin ardıcıl təkrar edilməsi p-n-p keçidini almağa imkan verir.



**Şəkil 4.16**

İkipilləli diffuziya zamanı p-n-p keçidinin inteqral sxemdə alınmasının sxematik təsviri

## V FƏSİL

### NANOMATERİALLAR

Nanometr ( $10^{-9}$  m) tərtibli ölçülərdə maddənin xarakterik xüsusiyyətlərindən istifadə edilməsi elektronika, materialşünaslıq, kimya, mexanika, eləcə də elmin və texnikanın digər sahələri qarşısında yeni imkan və perspektivlər açır. Belə materialların alınması və onların əsasında müxtəlif strukturların yaradılması ilə məşğul olan sahə nanotexnologiya adlanır. «Nano» önlüyünü əlavə etməklə, miqyası milyard dəfə dəyişmək olar. Nanotexnologiya, müasir texnologiya və üsulların yığımının 1-100 nm miqyasında ayrı-ayrı atom və molekullarla manipulyasiya aparılmasına imkan yaradır ki, bu da onun əsasını təşkil edir.

Nanotexnologiya yeni sahə olsa da, nanometrlik ölçülü struktur və qurğular Yer kürəsində canlı aləmin yaranması zamanından mövcuddur. Belə ki, dəniz balıqqulağının zirehini iç tərəfdən, təbaşir nanozərrəciklərinin xüsusi zülal karbohidrogendə həll edilməsi nəticəsində yaranan pərdə örtür. Bu da həmin zirehin xaricində hər hansı bir səbəbdən yaranan çətin daxilə keçməsinin qarşısını alır. Bu xüsusiyyət nanozərrəciklərlə formalaşan strukturun daha böyük möhkəmliyə malik olması ilə əlaqədardır.

Yeni eranın dördüncü yüzilliyində Romada şüşə emalı zamanı metal nanozərrəciklərdən istifadə edilməsi alınan məhsulun adi şüşələrdən kəskin fərqlənməsini təmin etmişdir. 1857-ci ildə ingilis fiziki Maykl Faradey metal nanozərrəciklərin rəngli şüşələrin alınmasında rolunu aşkar etməyə cəhd göstərmişdir. Lakin ilk dəfə 1908-ci ildə nanozərrəciklərin ölçüsündən asılı olaraq, şüşələrin rənginin dəyişməsinə Qustav Mi izah etmişdir.

1959-cu ildə məşhur amerikan fiziki, Nobel mükafatı laureatı Riçard F.Feynman «Aşağıda yerlər çoxdur» mövzusunda mühazirəsində atomları tək-tək istənilən nizamlı qaydada

düzməklə yeni növ maddənin alınması, bundan 40 il sonra isə Erik K.Dreksler özünün məşhur «Yaradıcı maşın» əsərində «molekulyar maşın» qurğusunun yaradılması ideyasını irəli sürmüşdür. Drekslerin xəyalən yaratdığı qurğunun ölçüsü bioloji hüceyrənin ölçüsündən çox kiçikdir.

1980-ci ildən başlayaraq, tranzistor və lazerlərin istehsalında qalınlığı 10 nm olan süni nazik təbəqələrdən istifadə edilməsi nəticəsində, yüksək texniki xarakteristikalara malik qurğuların hazırlanmasına başlanıb. IBM firmasının əməkdaşları tərəfindən ayırdedici qabiliyyəti atom ölçüləri tərtibində olan skaynerləyici tunel mikroskopunun yaradılması atom miqyasında müşahidələr aparmağa imkan yaratmışdır. Bu isə öz növbəsində nanometr diapazonunda eksperimental texnikanın inkişafı, mikroaləm və nanoobyektlər haqqında anlayışların genişlənməsinə səbəb olmuşdur.

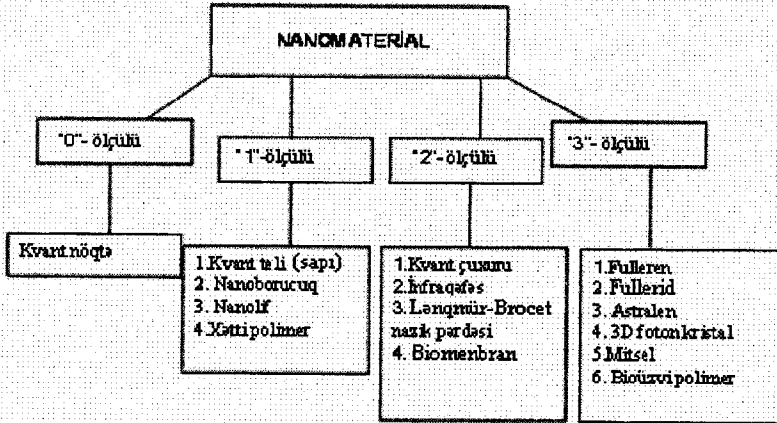
1990-cı ilə kimi informasiya texnologiyası elektronikanın əsas hissəsi olduğu halda, bundan sonra yeni bir istiqamət – bioinformasiya texnologiyasının yaranmasının əsası qoyuldu. XXI əsrin ilk illərindən başlayaraq, insan orqanizmi ilə əlaqədar olan genetik informasiyanın oxunulmasının mümkün olması, öz növbəsində yeni prinsip əsasında müalicə dərmanlarının hazırlanmasına imkan yaratdı. Çox güman ki, gələcək illərdə müalicə dərmanları hər bir xəstə üçün fərdi qaydada hazırlanacaq və fundamental tədqiqatlar molekulyar səviyyədə aparılacaqdır.

Qeyd etmək lazımdır ki, indi bu yönündəki işlər iki istiqamətdə – nanoelm və nanotexnologiya istiqamətində aparılır.

### **§ 5.1. Nanomaterialların təsnifatı**

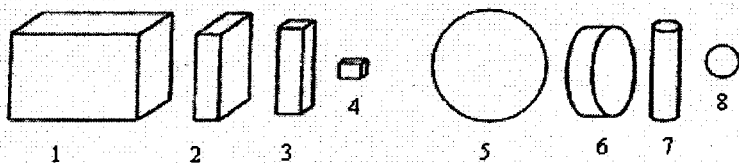
Nanomateriallar elə maddələrə və ya kompozitlərə deyilir ki, onların baza elementləri nanometrlik xarakterik ölçüyə malik olub, süni və ya təbii nizamlı, yaxud da nizamsız düzülüşə malik olmaqla, materialda miqyas faktoru ilə müəyyənləşən və əvvəl məlum olmayan mexaniki, kimyəvi, elektrofiziki, optik,

eləcə də istilikfiziki xassələri özlərində daşımış olsun. Nanomateriallara verilən bu tərifə əsasən, onları aşağıdakı sxem üzrə qruplara ayırmaq olar:



## § 5.2. Kvant çuxuru, kvant naqili və kvant nöqtəsi

İstənilən materialın forması onun üç həndəsi ölçüsü ilə müəyyən olunur. Makroskopik cismin ölçüləri tədricən kiçildilməyə başlanılsa, onun xassələrində dəyişiklik müşahidə olunmur. Lakin ölçülər 100 nm-dən kiçik olduqda cismin xassələrində kəskin dəyişmələr baş verir. Bu üç həndəsi ölçünün müəyyən qayda ilə dəyişməsindən asılı olaraq, material kvant çuxuru, kvant teli (sapı) və kvant nöqtəsi adlanır. Əgər baxılan materialdan hazırlanmış nümunənin bir istiqamətdə ölçüsü nanometr diapazonunda, digər ölçüləri isə kifayət qədər böyük olarsa, belə material **kvant çuxuru adlanır**. Nümunənin iki istiqamətdə ölçüsü nanometr miqyasında olub, üçüncü ölçüsü böyük qalarsa, onda həmin nümunə **kvant teli (sapı)** adlanır. Hər üç ölçüsü nanometr diapazonunda olan material isə **kvant nöqtəsi** adlanır. Şəkil 5.1-də bu təsnifatın düzbucaqlı və əyri-xətli həndəsədə sxematik təsviri verilmişdir.



Şəkil 5.1

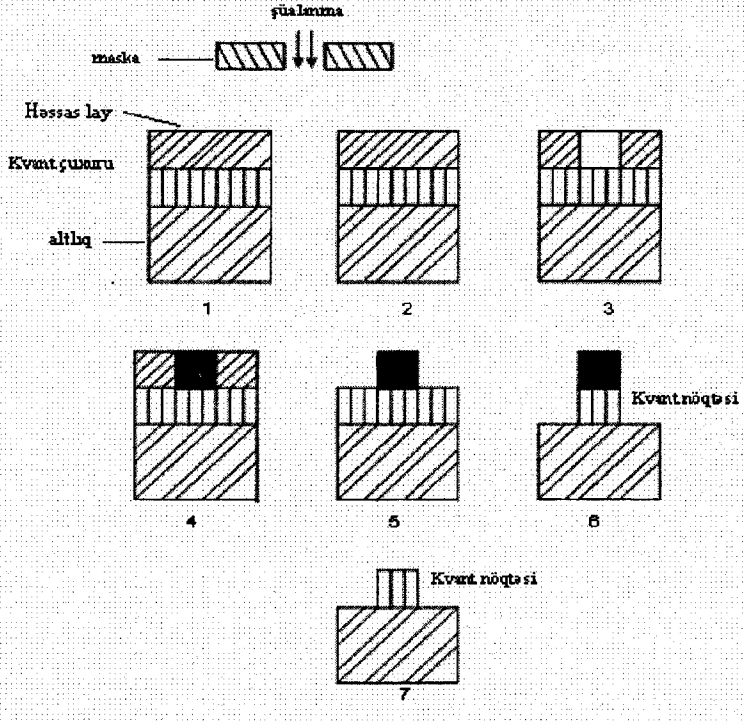
Şəkil 1 və 5 təsvirləri düzbucaqlı və əyrixətli həndəsədə nümunənin makroskopik formasına, 2, 6; 3, 7; və 4, 8 təsvirləri isə kvant çuxuru, kvant naqili və kvant nöqtəsinə uyğun gəlir.

Ayrı-ayrı atom və molekulardan istifadə edərək nizamlı quruluş yaratmaq konsepsiyası «aşağıdan–yuxarıya yaxınlaşma» adlanır. Bu yaxınlaşmanı katalitik kimyəvi reaksiya vasitəsilə həyata keçirmək mümkündür. Bu proses bioloji sistemlərdə geniş yayılıb və bu zaman katalizator adlanan fermentlər aminturşularını toplayaraq canlı hüceyrələri formalaşdırır.

Bu konsepsiyanın əksi olan yuxarıdan aşağıya yaxınlaşma konsepsiyası isə nanoquruluşun formalaşmasını aparmağa imkan verir. Belə yaxınlaşmada makromiqyaslı obyektin və strukturun ölçüləri tədricən kiçildilməyə başlayır və proses nanoölçülərə qədər davam etdirir. Bu prosesin daha geniş yayılmış növü litoqrafiyadır. Prosesin əsas mərhələləri (şəkil 5.2) ardıcıl olaraq aşağıdakı kimi həyata keçirilir. İlk növbədə nümunənin səthi radiasiyaya həsas materialla əksər hallarda  $[C_5O_2H_8]_n$  polimetilmetakrilatla örtülür. Sonra səthin lazımi yeri nanostruktur almaq üçün sürətli elektronlar dəstəsi ilə şüalandırılır. Bunun üçün maskadan və ya səthin istənilən yerinə düşən elektron selini skaynerləşdirməkdən istifadə edilir. Xüsusi kimyəvi aşılamaçının köməyiylə şüalandırılmış hissə həll olunur (aşılanmış hissə aradan qaldırılır). Həssas hissədə alınmış çuxur maska ilə örtülür. Sonrakı mərhələlərdə maska aşılama yolu ilə aradan götürülür və nəticədə tələb olunan nanostruktur əldə edilir. Bu nanostruktur kvant nöqtəsi və ya



kvant naqili ola bilər. Elektron şüa litoqrafiyası ilə yanaşı, neytral atomlar selindən ibarət olan litoqrafiyanın digər növlərindən də (məsələn, Li, Na, K, Rb, Cs) istifadə etmək olar. Litoqrafiyadan istifadə edərək daha mürəkkəb nanostrukturular yaradıla bilər. Buna misal olaraq çoxsaylı kvant çuxurlarını və kvant nöqtələri yığımını (toplusunu) göstərmək olar.



**Şəkil 5.2.**

Elektron-şüa litoqrafiyası ilə kvant nöqtəsinin formalaşması mərhələlərinin sxematik təsviri.

- 1 – alıtıq üzərində kvant çuxurunun qoruyucu təbəqə ilə örtülməsi;
- 2 – nümunənin maska vasitəsilə şüalandırılması;
- 3 – şüalanmış həssas hissənin kimyəvi üsulla (aşılmaqla) həll edildikdən sonra alınmış konfigurasiyası;
- 4 – növbəti aşılma üçün maskanın formalaşması;
- 5 – həssas qoruyucu lay kənar edildikdən sonra nümunənin vəziyyəti;
- 6 – kvant çuxurunun bir hissəsini aşladıqdan sonra nümunənin vəziyyəti;
- 7 – maskanı aradan götürdükdən sonra nanoquruluşlu kvant nöqtəsinin təsviri;

Alınmış kvant nanostrukturlu materialların parametrlərinə ölçülər kəskin təsir göstərir. Bu təsir ölçü effekti adlanır. Onu  $A^{III}B^V$  birləşmələri tipli yarımkəçiricilərdən biri olan GaAs-ın təmsalında nəzərdən keçirək. GaAs yarımkəçirici birləşməsinin kristal qəfəsinin parametrlərinin  $a = 0,565 \text{ nm}$  olduğunu nəzərə alsaq, elementar qəfəsin həcmi  $V_0 = a^3 = (0,565 \text{ nm})^3 = 0,180 \text{ nm}^3$  olar. Nanometrlik kubik qəfəsdəki atomların sayı 22-yə bərabər olduğu halda, tərəfi 10 nm-ə bərabər olan kvant nöqtə  $5,56 \cdot 10^{23}$  elementar qəfəsdən ibarətdir. Əgər verilmiş kvant nanostruktur  $n$  sayda laydan ibarətdirsə, o,  $n^3$  sayda özəkdən təşkil olunur. Layların sayı ( $n$ ) məlum olarsa, səthdəki atomların sayı ( $N_s$ ), atomların tam sayı ( $N_t$ ) və kubun  $d$  tərəfi uyğun olaraq:

$$N_s = 12n^2, \quad N_t = 8n^3 + 6n^2 + 3n, \\ d = na = 0,565n$$

kimi təyin olunur.

Bu zaman  $n$ -in ala biləcəyi qiymətlərdən asılı olaraq  $N_s$ ,  $N_t$ ,  $d$  və  $\frac{N_s}{N_t}$ -in qiymətləri cədvəl 5.1-də verilmişdir. Cədvəldən görünür ki,  $n$ -in kiçik qiymətlərində səthdə olan atomların faizlə miqdarı böyükdür. Bu fakt nanostrukturlu və həcmi materialların müxtəlif xassələrə malik olmasının göstəricisidir.

Digər bir ölçü effekti, yarımkəçiricilərin aşqarlanması ilə bağlıdır. Belə ki, 100 nm ölçülü kvant nöqtəsində donor atomlarının konsentrasiyası  $10^{14} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$  olduqda, keçiricilik elektronlarının sayı  $10^{-1} \div 10^3$  tərtibində olur.

Kvant nöqtəsində  $10^{-1}$  sayda elektronların olması o deməkdir ki, 10 kvant nöqtəsindən yalnız birində keçirici elektron ola bilər. Aşqarların konsentrasiyası  $10^{18} \text{ sm}^{-3}$  olduqda tərəfi

10 nanometr olan kubşəkili kvant nöqtəsinə bir elektron düşür. Aşqarların konsentrasiyasının  $10^{14} \text{ sm}^{-3}$  qiymətində isə kvant nöqtəsində elektronun olması ehtimalı çox kiçikdir. Analoji olaraq kvant teli və kvant çuxuru üçün aparılmış təhlil cədvəl 5.2-də verilmişdir. Buradan görünür ki, belə kvant strukturlarında cərəyanın yaranmasında çox sayda elektronlar iştirak edir.

*Cədvəl 5.1*

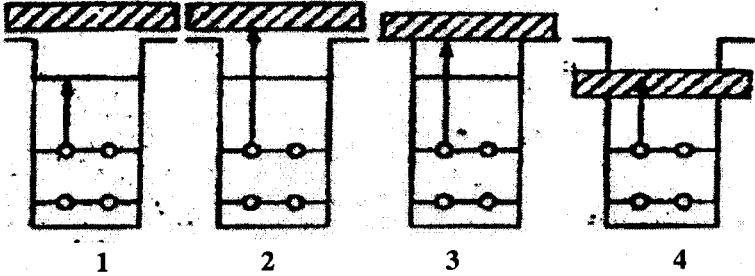
Layların sayı (n)	$n \cdot a(\text{nm})$	Atomların tam sayı	Səthdə olan atomların sayı ( $N_s$ )	Səthdə olan atomların faizlərdə miqdarı ( $N_s/N_v$ )
2	1,13	94	48	51,1
3	1,70	279	108	38,7
4	2,26	620	192	31,10
5	2,83	1165	300	25,8
6	3,39	1962	432	22
10	5,65	8630	1200	13,9
15	8,48	$2,84 \cdot 10^4$	2700	9,5
25	14,1	$1,29 \cdot 10^5$	7500	5,8
50	28,3	$1,02 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^4$	2,9
100	56,5	$8,06 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^3$	1,5

*Cədvəl 5.2*

Kvant quruluşu	Ölçü	Elektronların miqdarı	Ölçü	Elektronların miqdarı
Həcimli materiallar	-	$10^4 \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$	-	$10^{14} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$
Kvant çuxuru	Qalınlığı 10 nm	$1 \div 10^4 \text{ mkm}^{-2}$	Qalınlığı 100nm	$10 \div 10^5 \text{ mkm}^{-2}$
Kvant teli	$10 \times 10 \text{ nm}$ en kəsikli	$10^2 \div 10^2 \text{ mkm}^{-1}$	En kəsiyi $100 \times 100 \text{ nm}$	$1 \div 10^4 \text{ mkm}^{-1}$
Kvant nöqtəsi	Tərəfi 10 nm	$10^{-4} \div 1$	Tərəfi 100 nm	$10^{-1} \div 10^3$

Kvant nanomateriallarından infraqırmızı şüalanma detektorlarının, yarımkəçirici lazerlərin və tranzistorların hazırlanmasında istifadə olunur.

Kvant nöqtəsində enerji səviyyələri arasında keçid infraqırmızı diapazona uyğun gəldiyindən, ondan infraqırmızı şüalanma fotodetektoru kimi istifadə etmək olar. Belə tip fotodetektorların dörd tipinin sxemi şəkil 5.3-də göstərilib.

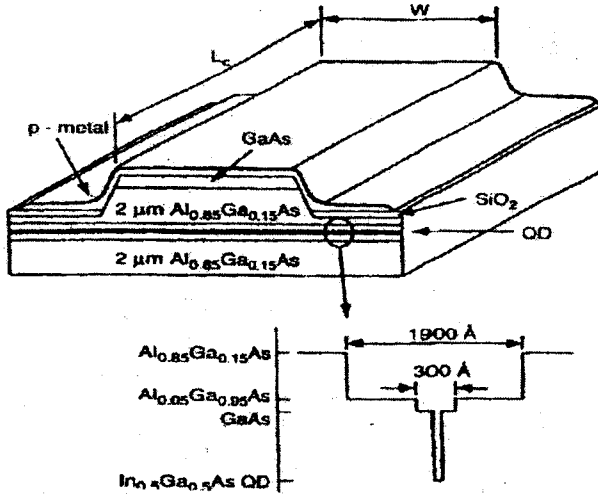


Şəkil 5.3.

Şəkildəki ştrixlənmiş hissə yarımkeçiricinin keçirici zonasını göstərir. Dolmuş və boş lokal hallar çuxurda yerləşmiş üfüqi xətlərlə, infraqırmızı şüaların təsiri ilə baş verən keçid isə şaquli oxla göstərilmişdir. İnfraqırmızı şüalar elektronları keçirici zonaya keçirir və bu zaman yaranan elektrik cərəyanının qiyməti infraqırmızı şüalanmanın intensivliyinin ölçü meyarı olur. Belə detektorların həssaslığı bir vatt şüalanma gücünə düşən cərəyan şiddəti ilə (amper/vt) müəyyən olunur, işçi diapazonu isə  $8,5-10 \text{ mkm}$  dalğa uzunluğu intervalında yerləşir.

Kvant nanomaterialı əsasında işləyən lazerlər diskret spektral səviyyələrin olmasına əsaslanır. Şəkil 5.4-də  $n-GaAs$  əsasında hazırlanmış kvant nöqtəsi lazerinin quruluşu təsvir olunmuşdur. Metal lövhə onun altında yerləşən  $GaAs$  layı ilə təmasda olur və elektrod rolunu oynayır. Bu elektrodla aşağı altlıq arasında qalınlığı  $2 \text{ mkm}$  olan bir cüt  $Al_{0,85}Ga_{0,15}As$  lövhə, onların arasında isə şüalanmanı xaricə yönəltmək üçün  $Al_{0,05}Ga_{0,95}As$ -dan  $190 \text{ nm}$  qalınlıqlı dalğa kanalı (dalğaötürən) yerləşdirilir. Dalğaötürənin mərkəzində

qalınlığı  $30\text{ nm}$  olan  $\text{GaAs}$  layı və həmin  $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  əsasında hazırlanmış 12 monolaydan ibarət kvant nöqtəsi yerləşir. Lazer şüalanmasının dalğa uzunluğu spektrin yaxın infraqırmızı oblastında yerləşib,  $1,32\text{ mkm}$  -ə bərabərdir.

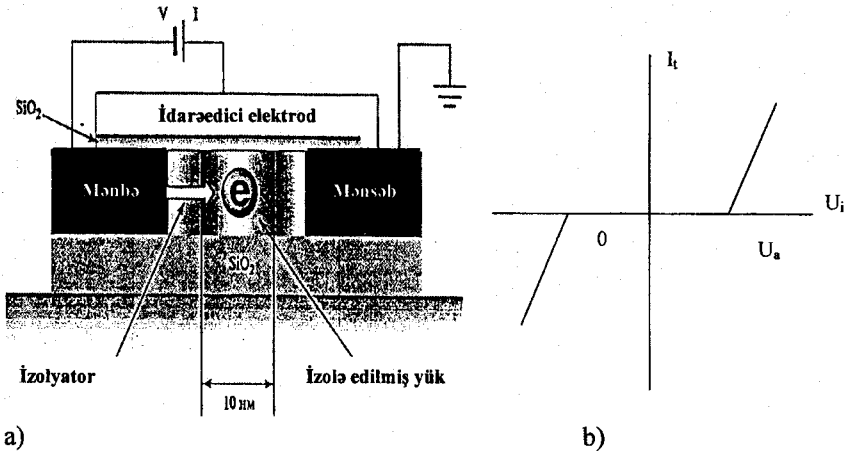


Şəkil 5.4

Kvant materiallarının tətbiq olunduğu digər bir sahə birelektronlu tranzistordur.

**Birelektronlu tranzistor** bir elektronu idarə etməklə elektrik dövrəsini açıb-bağlayan dəyişdirici qurğu rolunu oynayır. Mövcud tranzistorlarda yüz minlərlə elektronun seli idarə olunduğundan, onlar bir elektronlu tranzistorlara nisbətən dəfələrlə çox enerji sərf edir.

Bir elektronlu tranzistor iki metal lövhənin arasında yerləşdirilmiş çox nazik (nanometr tərtibli qalınlığa malik) tədricedici laydan ibarətdir. Elektron bir elektroddan digərinə bu tədricedici laya tunel etmək yolu ilə keçə bilər. Bir elektronlu tranzistorun işçi volt-ampər xarakteristikası (a) və sxemi (b) şəkl 5.5-də təsvir edildiyi kimidir.

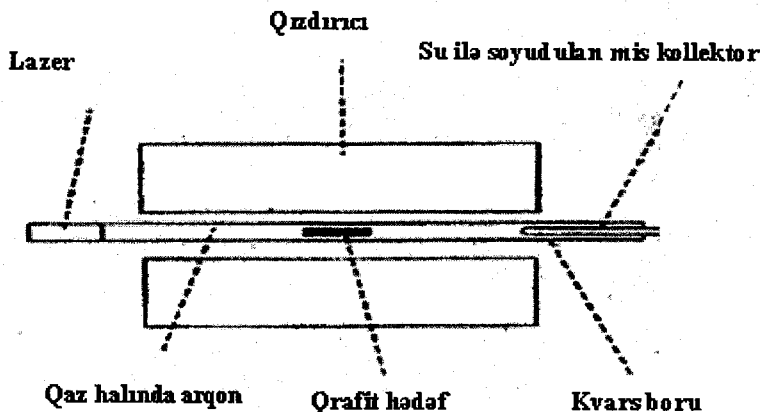


Şəkil 5.5

Burada  $I_t$  -tunel cərəyanı,  $U_i$  -idarəedici gərginlik,  $U_a$  isə minimal astana gərginliyidir. Gərginliyin  $U_a$  qiymətindən başlayaraq dövrdə cərəyan yaranır.

### § 5.3. Nanoborucuqlar

Geniş tətbiq sahəsinə malik olan nanoborucuqlar nanostrukturlu materiallar sırasında ən ön yerlərdən birində durur. Nanoborucuğu silindr formasında bükülmüş qrafit vərəqinə bənzətmək olar. Birqatlı nanoborucuqların uzunluğu 100 mikron olub, diametri 2–20 nm arasında dəyişir. Nanoborucuqların fizikasından və tətbiq sahələrindən danışmadan əvvəl, onların alınma texnologiyası ilə tanış olaq. Şəkil 5.6-da lazer buxarlandırma üsulu ilə nanoborucuqların alındığı qurğunun sxemi verilmişdir.



Şəkil 5.6

İçərisində qaz halında arqon, qrafit hədəf və su ilə soyudulan kollektor yerləşən kvars boru  $1200^{\circ}\text{C}$ -ə kimi qızdırılır. Nanoboruğun əmələ gəlməsi üçün qrafit hədəfin tərkibinə katalizator rolunu oynayan az miqdarda kobalt və nikel daxil edilir. Qrafit hədəfin üzərinə yüksək intensivlikli lazer şüası düşdükdə o buxarlanır. Arqon seli bu buxarı yüksək temperaturu zonadan soyudulan mis kollektora daşıyır. Qrafit buxarı mis kollektorun üzərinə çökərək nanoboruq əmələ gətirir. Bu üsul ilə uzunluğu 100 mikron və diametri 10–20nm olan borucuqlar əldə etmək olur.

Nanoboruquları, həmçinin diametri 5–20mm və aralarındakı məsafə isə 1mm olan qrafit elektrodlu qövs vasitəsilə də sintez etmək mümkündür. Bu məqsədlə həmin elektrodlara 20–25V gərginlik tətbiq edilərək 500 tor təzyiqli helium axınında yerləşdirirlər. Müsbət elektroddan karbon atomları uça-raq mənfi elektrodun üzərində nanoboruq yaradır. Birqat nanoboruqular almaq üçün müsbət elektrodun mərkəz hissəsinə müəyyən miqdarda katalizator rolunu oynayan kobalt, nikel və yaxud dəmir əlavə edilir. Katalizatordan istifadə edildikdə çox-

qatlı nanoboruçular alınır. Qövs üsulu ilə diametri 1–5 mm və uzunluğu 1 mkm olan nanoboruçular alınır. Kimyəvi çökdürmə üsulu ilə də nanoboruçular almaq mümkündür. Bu üsulun mahiyyəti, qaz şəklində olan karbohidrogenin yüksək temperaturda parçalanması nəticəsində əmələ gələn sərbəst karbon atomlarının tərkibində müxtəlif katalizatorlar olan altlığın üzərinə çökməsindən ibarətdir.

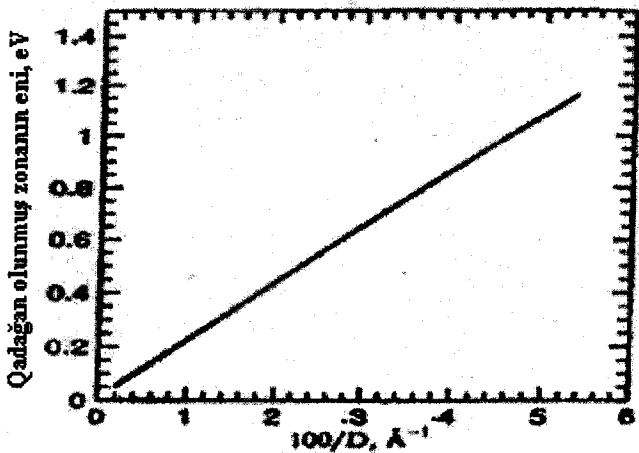
Nanoboruçuların sintezi zamanı müxtəlif xarakterli və xüsusi elektrik keçiriciliyi fərqlənən boruçuqların qarışığı alınır. Qarışıq dəstəni ayırmaq üçün silisium altlığı üzərinə çökdürdükdən sonra onların səthini tozlanma yolu ilə metal elektrodla örtürlər. Altlıqdan elektrod kimi istifadə etməklə sistemə çox da böyük olmayan gərginlik tətbiq etdikdə, yarımkeçirici borular qapanaraq izolyatora çevrilir. Sonra metal elektrodlara yüksək gərginlik tətbiq edib, metal nanoboruçularda böyük cərəyan yaratmaqla onları buxarlandırmaq olur.

Karbonlu nanoboruçular müxtəlif atom quruluşlarına malik olduqlarından onların xassələri də bir-birindən fərqlənir.

#### **§ 5.4. Nanoboruçuların elektrik və mexaniki xassələri**

Nanoboruçuların ən maraqlı xassələrindən biri onların diametrindən və quruluşundan aslı olaraq metal və yarımkeçirici ola bilməsidir. Sintez nəticəsində alınan qarışıq tipli nanoboruçuların üçdə biri metal, üçdə ikisi isə yarımkeçirici xassəsinə malik olur. Metal boruçuqlar kresel quruluşuna malikdir. Şəkil 5.7-də yarımkeçiricinin qadağan olunmuş zonasının eninin nanoboruçuğun diametrinin tərs qiymətindən asılılığı verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi, boruçuğun diametri böyüdükcə yarımkeçiricinin qadağan olunmuş zonasının eni kiçilir. Nanoboruçuların elektron quruluşunu öyrənmək üçün skannərləyici tunel mikroskopundan istifadə olunur.



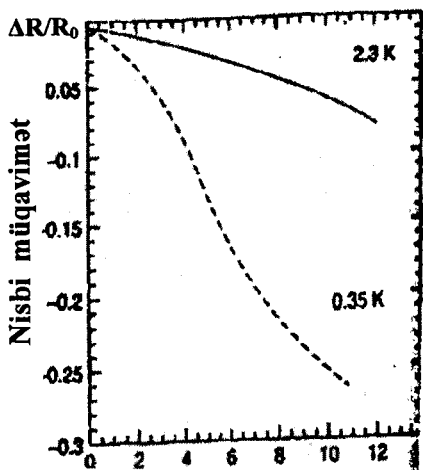


Şəkil 5.7

Metal nanoborucuqların elektrik keçiriciliyi olduqca böyükdür. Hesablamalar göstərir ki, onların hər kvadrat santimet-rindən milyard amper cərəyan keçə bilər. Mis məfillərin hər kvadrat santimetrdən milyon amper cərəyan keçdikdə ayrılan Coul istiliyi naqili əridir. Nanoborucuqların yüksək keçiriciliyə malik olmasının səbəbi onlarda elektronların səpildiyi defectlə-rin sıxlığının az olmasıdır. Nanoborucuqlar həm də böyük istilik keçiriciliyə malikdir.

Sabit maqnit sahəsinin təsiri altında maddənin elektrik müqavimətinin dəyişməsinə **maqnitorezistiv effekt** deyilir. Karbonlu nanoborucuqlar aşağı temperaturalarda maqnitorezistiv xassəyə malikdir. Nanoborucuğun müqavimətinin nisbi dəyişməsinin 2,3K və 0,35K -də xarici maqnit sahəsindən asılılıq qrafiki şəkil 5.8-də təsvir edilmişdir. Müşahidə olunan bu effekt mənfi maqnitorezistiv effekt adlanır. Yəni maqnit sahəsinin intensivliyi artdıqda borucuğun müqaviməti azalır, keçiriciliyi isə artır. Bu effekt maqnit sahəsinin təsiri altında elektronların spiralvarı hərəkəti zamanı yeni enerji səviyyələri-

nin yaranması ilə əlaqədardır. Bu səviyyələr **Landau səviyyələri** adlanır və ən yuxarı dolmuş səviyyəyə yaxın yerləşir.



Şəkil 5.8

B, Tl

İstənilən materialın mexaniki xassələrinin göstəricisi onun möhkəmliyi və elastikliyi xarakterizə edən  $E$  -Yunq moduludur. Yunq modulunun qiyməti böyük olduqca, materialın elastikliyi kiçik olur. Məsələn, poladın Yunq modulu rezininkindən 30000 dəfə böyükdür. Nanoborucuqların Yunq modulu  $1,28 \div 1,8TPa$  intervalında dəyişir. Poladın Yunq modulu  $0,21TPa$  bərabər olduğundan, nanoborucuğun Yunq modulu poladinkindən on dəfə çoxdur.

Karbonlu nanoborucuqlar əyilmədə olduqca elastikdir. Onlar saman çöpü kimi əyilə bilir, lakin qırılmaz. Bir çox materiallar deffektli olduqlarına görə, əyilmə zamanı qırılır. Nanoborucuqlarda deffektlərin sıxlığı çox kiçikdir. Buna görə də onlarda qırılma baş vermir. Məlumdur ki, tutma gərginliyi möhkəmlik hüdudu ilə müəyyən edilir. Birqat nanoborucuqlar üçün möhkəmlik hüdudu  $45QPpa$  olduğu halda, polad ərintiləri  $2QPpa$ -da dağılır. Beləliklə, nanoborucuqlar poladdan 20 dəfə

möhkəmdir. Çoxlaylı nanoborucuqların mexaniki xarakteristikaları poladınkindən yaxşı olsa da, birlaylı nanoborucuqlarınkindən kiçik olur. Məsələn, diametri  $200\text{ nm}$  olan çoxlaylı nanoborucuğun möhkəmlik hüdudu  $0,007\text{ TPa}$ , Yunq modulu isə  $0,6\text{ TPa}$  -dır.

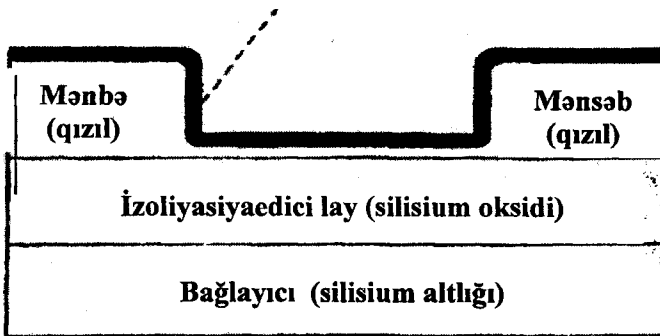
### § 5.5. Nanoborucuqların tətbiq sahələri

Nanoborucuğun oxu boyunca çox da böyük olmayan elektrik sahəsi tətbiq edilərsə, onun uclarından elektronların intensiv emissiyası baş verər. Sahə emissiyası adlanan bu hadisə asanlıqla müşahidə oluna bilər. Bunun üçün biri nanoborucuqlardan hazırlanmış kompozit pasta üzərinə çəkilmiş paralel elektrodlar arasında müəyyən xarici gərginlik yaradılır. Bu zaman nanoborucuq elektrodla kifayət qədər perpendikulyar istiqamətdə qalır ki, bu da sahə emissiyasını müşahidə etməyə imkan verir. Baxılan effektin başlıca tətbiq sahələrindən biri, müstəvi panel displeylərin təkmilləşdirilməsidir. Televizorlarda və kompyuterlərdə lüminensiyaedici ekranları şüalandırmaq üçün idarə olunan elektron topundan istifadə edilir. Koreyanın Samsung korporasiyasında karbon nanoborucuqlarında baş verən elektron emissiyasından istifadə etməklə müstəvi displeylər hazırlanmışdır. Bunun üçün nanoborucuqlardan hazırlanmış nazik təbəqə idarəedici elektronika ilə birlikdə layın arasında yerləşdirilir və o, üzərinə lüyuminefor çəkilmiş şüşə qatı ilə örtülür. Yapon firmalarından biri, elektron emissiyası effektindən vakuüm işıqlandırıcılarında istifadə edərək, adi gözərmə lampalarında olduğu kimi, parlaqlıq əldə etmiş, lakin bu işıqlandırıcılar daha effektiv və uzunmüddətli olmuşdur. Bu effektədən istifadə etməklə, mikrodalğa şüalanma generatorları hazırlamaq da mümkündür.

Yüksək elektrik keçiriciliyinə malik nanoborucuqlar elektromaqnit dalğalarını pis buraxdığından, onlardan hazırlanmış

kompozitli pasta elektromaqnit şüalanmasını ekranlaşdırmaq üçün istifadə edilə bilən ən perspektivli materialdır.

### Karbonlu nanoborucuq



Şəkil 5.9

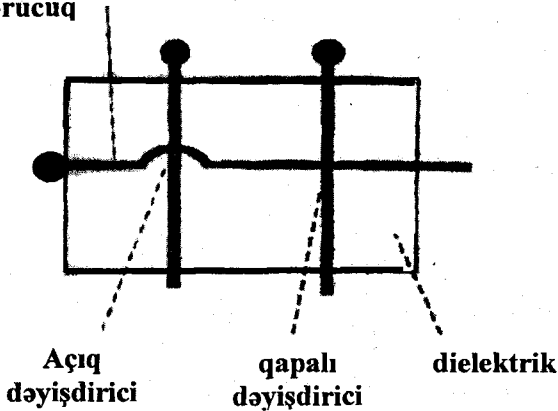
Yarımkeçirici karbonlu nanoborucuq əsasında hazırlanmış sahə tranzistoru kompüterlərdə əsas dəyişdirici element rolunu oynayır. Belə qurğunun sxemi şəkil 5.9-da göstərilmişdir. Silisium altlıqlı bağlayıcıya müəyyən kiçik xarici gərginlik tətbiq etdikdə nanoborucuq mənbədən mənsəbə doğru cərəyan axır. Bu sistem cərəyan axdığı zaman bağlı, əks halda isə açıq olur. Aşkar edilib ki, bağlayıcıya tətbiq olunan xarici gərginliyin kiçik qiymətlərində belə nanoborucuğun keçiriciliyi  $10^6$  dəfəyə qədər artır.

Bu da silisium əsasında hazırlanmış sahə tranzistorundakı qiymətə uyğun gəlir. Belə qurğunun qoşulma (işə düşmə) müddəti çox kiçik olduğundan, onun takt tezliyi təqribən  $10^9$  Hz-ə bərabər olur. Bu da hal-hazırda mövcud olan prosessorlardan 1000 dəfə sürətlidir. Mənbə və axarı birləşdirən nanoborucuğun diametri təqribən 1 nanometr tərtibindədir. Ölçünün belə kiçik olması gələcəkdə çipin (çıxış elektrodslarsız və gövdəsiz hazır yarımkeçirici cihaz və ya mikrosxemin) daxilində çoxlu

sayda dəyişdiricilərin yerləşdirilməsinə imkan verir. Belə çiplərin daxilində birləşdirici naqillərdən istifadə olunması bir sıra problemlər yaradır. Belə ki, naqillərin en kəsikləri kiçik olduğundan onların müqaviməti böyükdür. Bu səbəbdən də həmin naqillərdən cərəyan keçdikdə güclü Coul qızması baş verir. Bunun nəticəsində də naqıl əriyir və ya buxarlanır. Lakin nanoborucuqların müqaviməti kiçik və istilikkeçirməsi yüksək olduğundan onlardan naqıl kimi istifadə edərək bu problemi aradan qaldırmaq olar.

Yeni kompyuterlərin hazırlanmasının digər bir üsulu, altlıq üzərində nanoborucuqlar yerləşdirdikdən sonra, onların üzərində bir-birindən müəyyən məsafədə olmaqla perpendikulyar istiqamətdə digər nanoborucuq yığımı (dəstəsi) yerləşdirməkdir. Bu halda hər bir nanoborucuq metal elektrodla birləşdirilir. Bu ideyaya uyğun sxem şəkil 5.10-da göstərilmişdir. Sxemdəki kəsişmə nöqtələri dəyişdirici rolunu oynayır.

**Karbonlu nanoborucuq**



**Şəkil 5.10**

Kəsişmə nöqtələrində nanoborucuqlar bir-birinə toxunmadıqda onların arasında müqavimət böyük olduğundan, dəyişdirici açıq, həmin nöqtələrdə nanoborucuqlar bir-birinə to-

xunduqda isə müqavimət kiçik olduğundan, dəyişdirici-qapalı olur. Qapalı-açıq halını nanoborucuqdan axan cərəyan vasitəsi ilə idarə etmək mümkündür. Hesablamalar göstərir ki, çipin hər kvadrat santimetrində  $10^{12}$  belə element yerləşdirmək mümkündür. Belə dəyişicilərin sürəti mövcud çiplərin sürətindən 100 dəfə böyük ola bilər.

Əgər yarımkeçirici nanoborucuq aşağıda, metal nanoborucuq isə yuxarıda yerləşərsə və onlar bir-biri ilə toxunarsa, onda bu iki nanoborucuğun arasında metal-yarımkeçirici keçidi yaranır. Belə keçid cərəyanı bir istiqamətdə buraxdığından ondan düzləndirici kimi istifadə etmək olar.

Nanoborucuqlardan litium batareyalarının hazırlanmasında və hidrogenin saxlanması üçün istifadə etmək olar. Bir çox batareyalarda litium yükdaşıyıcısı olduğundan onu nanoborucuğun daxilində yerləşdirmək olar. Hesablamalar göstərir ki, borucuqda hər altı karbon atomuna uyğun bir litium atomu yerləşdirmək və bunun nəticəsində yüksək keyfiyyətli batareya əldə etmək mümkündür.

Nanoborucuqlarda hidrogenin yığılması və saxlanması imkan verir ki, onlardan gələcəkdə avtomobillərdə yanacaq mənbəyi elementi kimi istifadə olunsun. Belə yanacaq mənbəyi elementi iki elektrodan və xüsusi elektrolitdən ibarətdir. Elektrolit hidrogen ionunu özündən buraxdığı halda, elektronları buraxmır. Hidrogen anoda doğru hərəkət edərək ionlaşır və elektrolitdən katoda diffuziya edir. Elektronlar isə xarici dövrə vasitəsilə katoda doğru hərəkət edir. Burada hidrogen ionları, elektronlar və oksigen birləşərək su molekulunu əmələ gətirir.

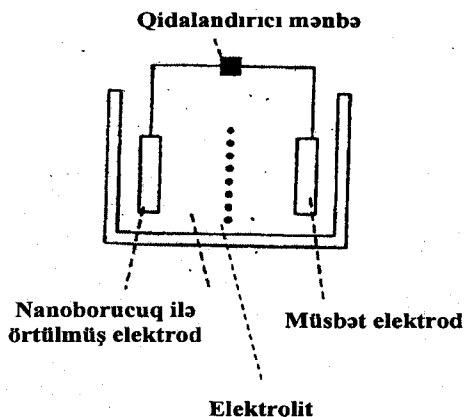
Belə sistemdə hidrogen mənbəyinin olması lazımdır. Bu problemi nanoborucuqlarda hidrogenin saxlanması ilə həll etmək olar.

Nanoborucuqlar öz çəkisinin 6,5%-i qədər hidrogen udarsa, bu yüksək nəticə hesab olunur. Hal-hazırda əldə edilən ən yüksək göstərici 4%-dir.

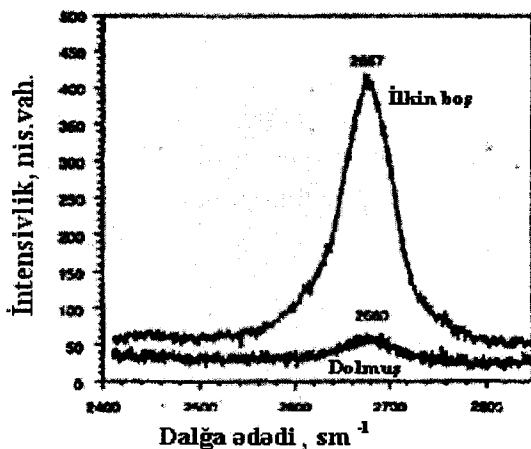
Nanoborucuqların hidrogenlə doldurulması elektrokimyəvi özək vasitəsilə həyata keçirilir (şəkil 5.11).

Bu zaman, bir laylı nanoborucuq təbəqədən silindrik formada elektrod hazırlanır və KOH məhlulunun içərisində yerləşdirilir. Həmin məhlul elektrolit, nanoborucuq isə mənfi elektrod rolunu oynayır. Digər elektrod  $\text{Ni(OH)}_2$  əsasında düzəldilir. Elektrolitin tərkibindəki su parçalana-raq müsbət hidrogen ionları ( $\text{H}^+$ ) yaradır və həmin

ionlar nanoborucuqdan düzəldilmiş elektroda doğru hərəkət edir. Nanoborucuqda hidrogenin mövcud olması düşən şüanın Raman səpilmə intensivliyini təyin etməklə aşkar edilir (şəkil 5.12).



Şəkil 5.11

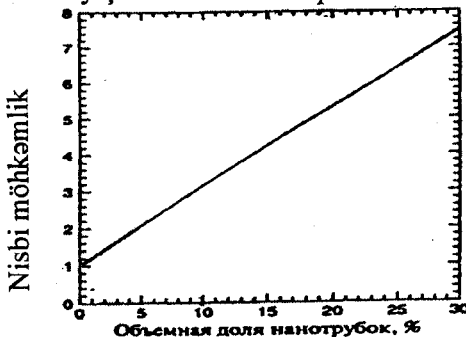


Şəkil 5.12

## § 5.6. Mexaniki möhkəmləndirmə

Poliakrilnitil uzun karbonlu lif olub, plastik kompozitlərin möhkəmliyini artırmaq üçün istifadə edilir. Diametri 1–10 mkm olan poliakrilnitilinin qırılmaya qarşı möhkəmliyi  $7 \cdot 10^9$  Pa tərtibindədir. Möhkəmliyi artırmaq üçün bu liflərdən istifadə edərkən onların bərabər paylanması və seçilmiş istiqamətdə yönəldilməsi başlıca tələblərdən biridir. Kompozit materialların effektiv möhkəmliyinin əsas göstəricisi olan parametrlər qırılmaya qarşı möhkəmlik, liflərin uzunluğunun diametrinə olan nisbəti, eləcə də matrisada deformasiya olunma xüsusiyyətidir. Qırılmaya qarşı möhkəmliyin və lifin uzunluğunun diametrinə olan nisbəti böyük olan kompozitlər elektron texnikası üçün daha əlverişli material sayılır. Aparılmış tədqiqatlar göstərir ki, polipropilənə çəki hesabı ilə 11,5%-ə qədər diametri 0,2 mkm olan karbonlu nanoborucuq əlavə etdikdə onun qırılmaya qarşı möhkəmliyi iki dəfə böyüyür. Alüminiuma 5%-ə qədər nanoborucuq əlavə etdikdə isə onun möhkəmliyinin ikiqat artması ilə yanaşı, kimyəvi davamlığı da xeyli yüksəlir. Hesablamalar vasitəsilə müəyyənləşdirilmişdir ki, borucuğun materialda çəki hesabı ilə 10% optimal paylanmasını təmin etmək mümkün olsa, onun qırılmaya qarşı möhkəmliyi 10 dəfə artar.

Poladın əsas komponentlərindən biri olan dəmirə karbonlu nanoborucuqlar möhkəm rabitə yaratdığından onun qırılmaya qarşı möhkəmliyini kəskin artırmaq mümkündür. Şəkil 5.13-də diametri 10nm və uzunluğu 100 mkm olan nanoborucuqların poladın həcminə düşən dozəsindən asılı olaraq qırılmaya qarşı möhkəmliyinin dəyişməsinin nəzəri qrafiki verilmişdir.



Şəkil 5.13. Nanoborucuğun həcmi dozəsi, %



Bu hesablama Kelli–Tayson tənliyinə əsasən, aparılmışdır. Qrafikdən görüldüyü kimi, karbonlu nanoborucuğun həcmi dozası 30%-ə çatdıqda onun möhkəmliyi 7 dəfəyə qədər yüksəlmiş olur.

Göstərilən faktlara mənfi təsir göstərən başlıca amillərdən biri nanoborucuqda laylar arasında və ayrı–ayrı dəstələrdə liflərin sürüşmələrinin mövcud olmasıdır. Digər tərəfdən, nanoborucuqların atomar hamarlanması onları bərkidir, materiala yaşımasını zəiflədir.

Nanoborucuqların digər tətbiq sahəsi onlardan kimyəvi sensorlar və katalizator kimi istifadə edilməsidir.

### § 5.7. Həcmi nanoquruluşlu materiallar

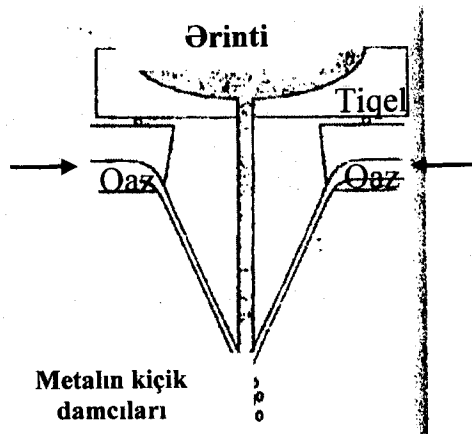
Nanoölçülü quruluşa malik bərk cisimlərə **həcmi nanoquruluşlu materiallar** deyilir. Həcmi nanoquruluşları əmələ gətirən quruluş elementləri nizamsızlıqla yanaşı, həm də heç bir simmetriyaya malik deyil. Belə materiallar kompakt, sürətli bərkimə, qazla atomlaşdırma və qalvanik üsullarla alınır.

**Kompakt üsulu** ilə  $Cu - Fe$  nanoquruluşlu ərinti almaq üçün əvvəlcə tərkibi  $Fe_{85}Cu_{15}$  -dən ibarət olan mis və dəmir tozu qarışığı 15 saat ərzində otaq temperaturunda kürə dəyirmanında qarışdırılır. Sonra alınmış material əvvəlcə volfram karbid ştampında 24 saat ərzində  $10^9 Pa$  təzyiqdə, otaq temperaturunda, bundan sonra isə  $400^\circ C$  -də 30 dəqiqə ərzində  $870 MPa$  təzyiq altında sıxılır. Alınan materialın sıxlığı ilkin məsaməsiz materialın sıxlığının 99,2%-ni təşkil edir. Onu təşkil edən zərrəciklərin ölçüsü 20-70  $nm$  arasında dəyişsə də, əksəriyyətinin ölçüsü 40  $nm$  ətrafında olur. Bu yolla alınmış həcmi nanoquruluşlu materialın dağılması  $2,8 \cdot 10^9 Pa$  mexaniki gərginliyə uyğun gəlir ki, bu da zərrəciklərinin ölçüsü 50-100 mikron olan dəmirinkindən 5 dəfə böyükdür. Nanokristal

metalların və ərintilərin əldə edilməsi onların tətbiq sahələrinin genişlənməsinə imkan yaradır.

Nanoquruluşlu materialların alınması üçün tətbiq edilən **sürətlə bərkimə üsulunun** mahiyyəti isə aşağıdakı kimidir. Metal yüksək tezlikli qızdırıcı vasitəsi ilə xüsusi körükdə əridilərək müəyyən istiqamətdə ətrafa püskürdülür. Bu ərinti seli daxilə soyudulan və inert qaz atmosferində fırlanan diyircəyin üzərinə buraxılır. Bu prosesdə qalınlığı 10 və 100 *mkm* olan zolaq və ya lent formalarında material alınır. Alınmış həmin bu materialın quruluşu körüyün ölçüsündən, forsunkadan diyircəyə qədər olan məsafənin qiymətindən, körükdəki ərintinin təzyiqindən və metal diyircəyin fırlanma sürətindən asılıdır. Bu üsulla tərkibi 85 -94% alüminiumdan və *Y, Ni, Fe* əlavələrinə ibarət ərinti əldə edilir.

**Qazla atomlaşdırma üsulu** maye metalın yüksək sürətli təsirsiz qaz axını vasitəsilə soyudulmasına əsaslanır. Bu prosesin həyata keçirildiyi qurğunun sxemi şəkil 5.14-də təsvir olunur.



Şəkil 5.14

Bu üsulda qaz şırnağı ərimiş halda olan metalla qarşılıqlı təsirdə olduqda öz kinetik enerjisini metala verdiyindən, nazik

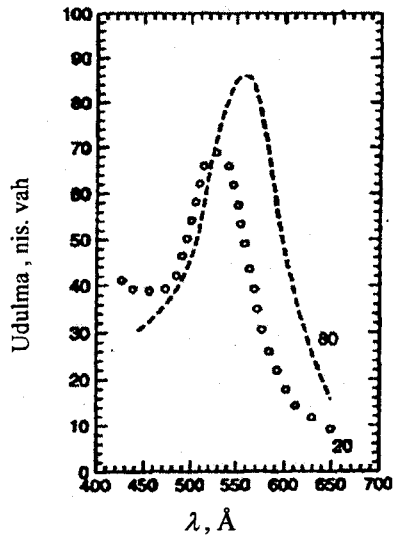
dispers damcılar əmələ gəlir. Təsvir olunan üsul böyük miqyasda nanoquruluşlu tozun, sonuncu isə öz növbəsində isti sıxma yolu ilə həcmi nanoquruluşlu materialın alınmasına imkan verir.

Nanoquruluşlu materialları **qalvanik üsulla** almaq üçün  $CuSO_4$  - göy daş (mis kuporosu) məhluluna iki elektrod daxil edərək, həmin elektrodlara gərginlik verilir. Bu zaman mənfi yüklü titan elektrodu üzərində nanoquruluşlu mis qatı əmələ gəlir. Bu üsul ilə qalınlığı 2 mm olan mis lövhə alına bilər və həmin lövhədəki mis nanozərrəciklərinin ölçüsü 27 nm tərtibində olur.

### § 5.8. Optik şüşələrdə metallik nanoklasterlər

Hələ qədim zamanlardan məscid və kilsələrdə tərkibində nanoölçülü metal zərrəcikləri olan şüşələrdən rəngli naxışlar və şəkillərin hazırlanmasında istifadə edilirdi. Tərkibində müəyyən miqdarda nanoklasterlər olan şüşələr qeyri-adi optik xassələrə malik olur və bu da onların geniş tətbiqinə imkan yaradır. Maksimal optik udulmaya uyğun dalğa uzunluğu şüşənin rəngini müəyyən etməklə yanaşı, metal zərrəciyinin ölçüsündən və tipindən də asılıdır.

Optik spektrin görünən oblastında  $SiO_2$  şüşəsinə daxil edilən qızıl nanozərrəciklərinin ölçülərinin həmin şüşənin optik udulma spektrinə təsiri şəkil 5.15-dəki qrafiklə



Şəkil 5.15

təsvir olunur. Nanozərrəciyin ölçüsü  $80 \text{ nm}$ -dən  $20 \text{ nm}$ -ə qədər dəyişdikdə optik udulmanın spektral paylanması maksimumu qısa dalğalar oblastına tərəf sürüşür. Belə spektr metal nanozərrəciklər sistemində «plazma udulması» ilə əlaqədardır.

Yüksək tezliklərdə metallarda keçirici elektron qazı özünü plazma kimi aparır. İonlaşmış elektroneytral qazda mənfii yük mütəhərrik elektronlar, müsbət yük isə hərəkətsiz atom qəfəsi ilə bağlıdır. Əgər ölçüləri maddənin üzərinə düşən işığın dalğa uzunluğundan kiçik olan klasterlər, həcmdə elə səpələnilərsə ki, onların arasındakı qarşılıqlı təsiri nəzərə almamaq mümkün olsun, onda elektromaqnit dalğaları elektron plazmasını rəqsə gətirir. Sonuncu isə öz növbəsində düşən şüanı udur. Udulma əmsalının dalğa uzunluğundan asılılığını bilmək üçün Mayem nəzəriyyəsiindən istifadə etmək olar. Bu nəzəriyyəyə görə şəffaf mühitdəki kiçik sferik metal zərrəcikləri üçün  $\alpha$ -udulma əmsalı:

$$\alpha = \frac{18 \pi N_s V n_0 \epsilon_2^3}{\lambda (\epsilon_1 + 2 n_0^2)^2} \quad (5.1)$$

Burada  $N_s$  -həcmi  $V$  -olan kürələrin konsentrasiyası,  $\epsilon_1$  və  $\epsilon_2$  kürənin dielektrik nüfuzluğunun uyğun olaraq, həqiqi və xəyali hissələri,  $n_0$  -udulma olmayan mühitin sındırma əmsalı,  $\lambda$  -isə işığın dalğa uzunluğudur.

Metallaşdırılmış kompozit şüşələr nəzərəcarpacaq qiymətə malik üçüncü tərtib qavrayıcılığa malik olur. Bu isə həmin şüşələrdə  $n$ -sındırma əmsalının işığın I-intensivliyindən

$$n = n_0 + n_2 I \quad (5.2)$$

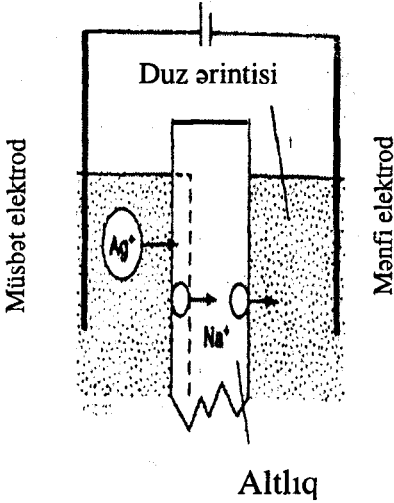
şəklində asılılığına gətirir.

Qeyri-xətti optik effektlərdən fotonlu kompyüterlərdə əsas işçi elementlərdən biri olan optik açarların hazırlanmasında istifadə edilə bilər.

Metallaşdırılmış kompozit şüşə ilk vaxtlar ərintiyə metal zərrəcikləri əlavə etməklə alınmışdır. Lakin bu zaman şüşənin

xassələrini istənilən şəkildə idarə etmək mümkün olmur. Hal-hazırda tətbiq edilən ion implantasiya üsulu texnologiya prosesini arzu olunan şəkildə idarə etməyə imkan verir. Bu üsulun əsas mahiyyəti, şüşənin enerjisi  $10\text{keV} - 10\text{MeV}$  aralığında dəyişə bilən implantasiya olan metal atomlarından ibarət ion dəstəsi ilə işlənməsindən ibarətdir.

### Qidalanma mənbəyi



Şəkil 5.16

Şüşəyə metal zərrəcinin daxil olması üçün ion mübadiləsindən də istifadə edilir. Belə bir qurğunun sxemi şəkil 5.16-da göstərilmişdir.

Bu prosesdə şüşələrin hamısının səthindəki birvalentli natrium ( $Na$ ) atomu gümüş ionu ilə əvəz edilir. Bunun üçün şüşə özəyinin altlığı elektrodlar arasında yerləşən duz ərintisi içərisində yerləşdirilir və elektrodlar xarici sabit gərginlik mənbəyinə qoşulur. Şüşədə olan natrium ionları mənfi

elektroda (katoda) diffuziya etdiyi halda, özündə gümüş ehtiyatı olan elektrolitdən gümüş ionları şüşənin səthinə diffuziya edir.

### § 5.9. Məsaməli silisium

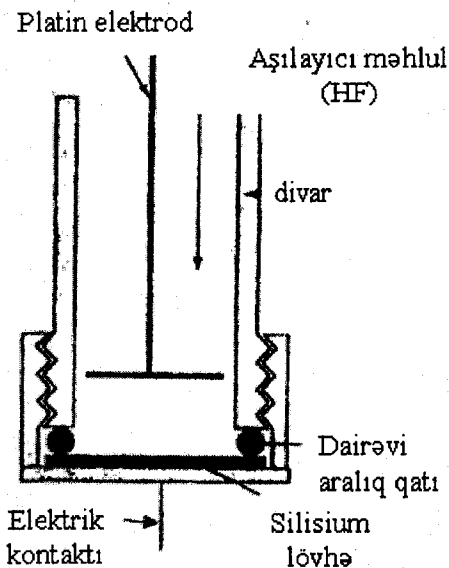
Silisium lövhəsini elektrokimyəvi üsulla aşıladiqda onda məsamələr əmələ gəlir. Aşılama prosesinin aparıldığı şəraiti dəyişməklə həmin məsamələrin ölçülərini nanometr tərtibinə gətirmək mümkündür. Belə materiallara maraq otaq temperatu-

runda onlarda maksimumu  $0,96$  və  $1,20 eV$ -a uyğun gələn flüressensiya şüalanmasının müşahidə olunması ilə bağlıdır. Bu maksimumlar otaq temp eraturunda təqribən silisiumun qadağan olunmuş zonasının eninə ( $1,125 eV$ ) uyğundur. Belə flüoresensiya elektronların qadağan olunmuş zonanı keçməsi ilə əlaqədardır. Lakin işığın təsiri ilə  $300 K$ -də  $1,4 eV$ -dən enerjiden böyük enerjili lüminsensiya baş verir və onun spektrində maksimal şüalanmanın yeri aşılama müddəti ilə müəyyən olunur. İşlənmə texnologiyasının təkmilləşdirilməsi fotoaktiv silisiumdan yeni displeylərin və optoelektron cütlərinin hazırlanmasında istifadə etməyə imkan verir.

Fotoaktiv silisiumun alındığı qurğunun sxemi şəkil 5.17-də təsvir edilmişdir.

İşlənməyə hazırlanan material alüminium konteynerin dibində yerləşdirilir. Konteynerin divarı aşılama kimi istifadə olunan flüorit turşusuna (HF) davamlı polietilen və ya teflon ilə örtülür. Platin elektrodlarla müsbət elektrod rolu oynayan silisium lövhəsi arasında potensial fərqi yaratmaq üçün onlar xarici gərginlik mənbəyinə qoşulur.

Məsələlərin xarakteristikası elektrolitdə olan HF-nin konsentrasiyası, elektrolitdən axan cərəyanın şiddəti və elektrodlara verilən gərginliyin işarəsindən asılıdır. Aparılan təcrübələr nəticəsində aşkar edilmişdir ki, məsələlərin ölçüsü silisiumun



Şəkil 5.17

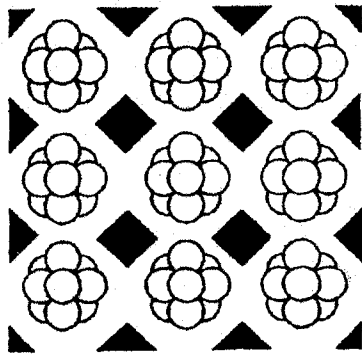
keçiricilik tipindən də asılıdır. P-tip silisiumu aşılıyanda ölçüsü  $10\text{ nm}$  -dən kiçik olan nazik məsəmələr qrupu yaranır.

### § 5.10. Nanoquruluşlu kristal materiallar

Təbiətdə elə obyektlərə rast gəlmək olur ki, onlar nano-kristal quruluşa malikdir. Belə obyektlərə misal olaraq 20 üzvlü ikosaedrik quruluşa malik on iki atomlu bor klasterini göstərmək olar. Bərk borun bir neçə kristal fazası mövcuddur ki, burada  $B_{12}$  - klasteri quruluş elementi rolunu oynayır. Belə fazalardan biri, elementar qəfəsində 50 atom olan tetraqonal simmetriyaya malik aralıq bor atomları vasitəsilə birləşən dörd ikosaedrik  $B_{12}$  - klasterindən ibarətdir. Deyilənlərdən görüldüyü kimi, bərk cismin kristal quruluşunu atom və ionlar deyil, atomlardan ibarət olan klasterlər əmələ gətirir. Belə klaster quruluşuna malik bərk cisimlər maraqlı xassələrə malik olur.

Bəzi nəzəri hesablamalar qabaqcadan nanoklasterli kristalların mövcud olması haqda fikir irəli sürməyə imkan verir. Buna misal olaraq,  $Al_{12}C$  - klasteri əsasında qurulması mümkün olan kristal birləşməni göstərmək olar. Hesablamalar göstərir ki,  $Al_{12}C$  (alüminium silikat-seolit) quruluşlu kristal birləşmənin qadağan olunmuş zonasının eni  $0,05\text{ eV}$  olub, yarımkəçiricilik xüsusiyyətinə malikdir.

Seolitlərdə nanozərrəciklərin nizamlı düzülüşünü yaratmaqla, kristal quruluşu formalaşdırmaq mümkündür. Seolitlər kubik quruluşa malik olub, məsəməli materiallardır



Şəkil 5.18

və bu məsamələr daxildə kəsilməz nizamla paylanır. Məsamələr kifayət qədər böyük olduğundan onlarda klasterlər yerləşdirmək mümkündür. Şəkil 5.18-də seoliddə klasterlərin yerləşdirilməsinin sxemi təsvir edilmişdir.

Seoliddəki məsamələr ərimiş halda olan maddələrlə doldurulur. Bu yolla işlənmiş seolit özünü kiçik ölçülü nanoquruluşa malik cisim kimi aparır.

Fotonika üçün istifadə edilən kristalların daxilində dielektrik zərrəcikləri bir-birindən görünən işığın dalğa uzunluğuna bərabər məsafədə yerləşərək, qəfəs strukturu yaradır. Belə kristallar maraqlı optik xassələrə malikdir.



## VI FƏSİL

### MAQNİT MATERIALLARI

#### § 6.1. Maddənin maqnitlənməsini xarakterizə edən parametrlər

Maddəni xarici maqnit sahəsinə daxil etdikdə o maqnitlənərək, sıfırdan fərqli maqnit momentinə malik olur və özü maqnit sahəsi yaradır. Maddənin maqnitlənməsini xarakterizə edən əsas parametrlərdən biri  $\vec{J}$  - maqnitlənmə vektorudur. Maqnitlənmə vektoru cismin vahid həcmindəki elementar maqnit momentlərinin cəminə bərabərdir:

$$\vec{J} = \frac{\sum_i \vec{P}_i}{V}. \quad (6.1)$$

Burada  $\vec{P}_i$  -bir elementar zərrəciyin maqnit momenti,  $V$ -maqnitlənən cismin həcmidir.

Maqnitlənmə vektorunun vahidi  $1 \frac{A}{M}$  - dir.

Maqnitlənmə xarici maqnit sahənin təsiri altında baş verir. Təcrübələr göstərir ki, bircinsli izotrop cisimlər üçün maqnitlənmə vektoru xarici maqnit sahəsinin  $\vec{H}$  intensivliyi ilə düz mütənasibdir:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (6.2)$$

(6.2) ifadəsinə daxil olan  $\chi$  - əmsalı maddənin maqnitlənmə əmsalı adlanır.

Beynəlxalq Vahidlər Sistemində maqnitlənmə vektoru və xarici maqnit sahəsinin intensivliyi eyni vahidlərlə ölçüldüyündən,  $\chi$  - adsız kəmiyyətdir.

Maddələrin maqnit xassələrini səciyyələndirmək üçün həcmi maqnitlənmə əmsalı ilə yanaşı, məxsusi və molyar maqnitlənmə əmsallarından da istifadə olunur.

Xarici maqnit sahəsində yerləşdirilmiş maqnitlənən cisim özünün məxsusi maqnit sahəsini yaradır. Bircins izotrop materiallarda bu sahənin istiqaməti xarici sahəyə paralel və ya anti-paralel ola bilər. Bu səbəbdən də maddə daxilindəki sahənin induksiyası ( $B$ ), xarici sahənin induksiyası ( $B_x$ ) ilə məxsusi maqnit sahəsinin ( $B_m$ ) induksiyasının cəminə bərabər olur:

$$\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_m . \quad (6.3)$$

Digər tərəfdən  $B_x = \mu_0 H$  və  $B_m = \mu_0 J$  olduğundan:

$$B = \mu_0 (H + J). \quad (6.4)$$

Bu ifadədəki  $\mu_0$  – maqnit sabiti adlanır və  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Hn/m. (6.2) ifadəsini nəzərə aldıqda (6.4) bərabərliyi şəklinə düşür.

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H \quad (6.5)$$

Verilmiş mühitdə maqnit induksiyası  $B = \mu \mu_0 H$  olduğunu nəzərə aldıqda, (6.5)-dən

$$\mu = 1 + \chi \quad (6.6)$$

münasibətini yazmaq olar. Burada  $\mu$  - mühitin maqnit nüfuzludur.

## § 6.2. Maddələrin maqnit xassələri

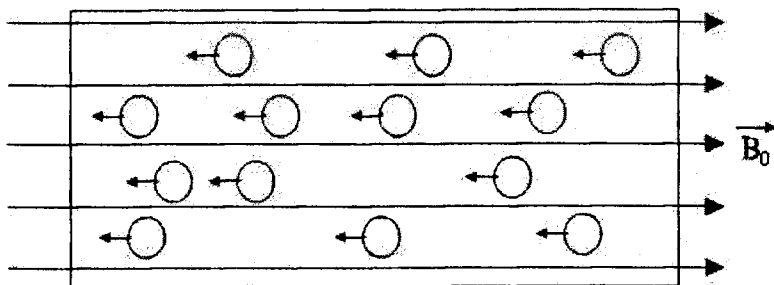
Mövcud olan bütün maddələr maqnit xassəsinə malik olub, xarici maqnit sahəsinə göstərdiyi reaksiyaya və daxili maqnit nizamına görə beş qrupa bölünür: diamaqnit, paramaq-

nit, ferromaqnit, antiferromaqnit, ferrimaqnit. Belə maqnit materialların malik olduqları maqnit xassələrinin təbiətini ayrı-ayrılıqda nəzərdən keçirək.

**Diamaqnitlər** maqnitlənmə əmsalı  $\mu < 1$  olan və xarici maqnit sahəsinin qiymətindən asılı olmayan maddələrdir.

Xarici maqnit sahəsi təsir etməyən diamaqnit maddənin təşkil olunduğu atomların hər bir elektronunun nüvə ətrafında fırlanması zamanı yaranan uyğun maqnit momentləri istiqamət-cə xaotik olduğundan bir-birini kompensə edir və buna görə də ümumilikdə həmin cismin maqnit momenti sıfıra bərabər olur. Bu səbəbdən də xarici maqnit sahəsi olmadıqda diamaqnit material maqnit xassəsinə malik olmur.

Xarici maqnit sahəsinin təsiri altında atomun daxilindəki hər bir elektronun yaratdığı mikromaqnitlərin istiqaməti dəyişir. Bu isə öz növbəsində əlavə maqnit momentinin yaranmasına səbəb olur. Lens qanununa görə bu maqnit momentləri onu yaradan xarici maqnit sahəsinin əksinə yönəlir.



**Şəkil 6.1**

Xarici maqnit sahəsində yerləşdirilmiş diamaqnitin sxematik təsviri

Diamaqnit xassəsi maddələrin hamsına xasdır. Amma bir çox hallarda güclü maqnit effektləri fonunda o hiss olunmur. Diamaqnit maddələrə təsirsiz qazlar, hidrogen, azot, mayelər, o cümlədən su, neft və onun törəmələri, metallar (berillium, bismut, qallium, qızıl, indium, kadmium, mis, qurğuşun, gümüş,

tallium, sink), yarımkeçiricilərin böyük əksəriyyəti (silisium, germanium,  $A^{III} B^V$  və  $A^{II} B^{VI}$  birləşmələri), üzvi birləşmələr, qələvi-holloid kristalları, qeyri-üzvi şüşələr daxildir. Kovalent kimyəvi rabitəyə malik və ifratkeçirici halında olan maddələr də diamaqnit xüsusiyyətə malikdir.

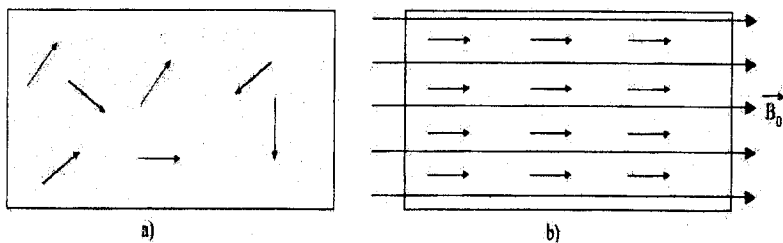
Diamaqnit materiallar üçün maqnitlənmə əmsalının qiyməti  $(10^{-6} \div 10^{-7})$  aralığında dəyişir. Diamaqnitlərin maqnit nüfuzluğu temperaturdan asılı deyil. Bu xüsusiyyət bir daha diamaqnit effektin atomdaxili proseslə əlaqədar olduğunu və zərrəciklərin istilik hərəkətinin ona təsir göstərə bilmədiyini sübut edir.

Verilmiş materialın diamaqnit xassəsinə malik olması onun qeyri-bircins maqnit sahəsindən itələnməsi ilə müəyyən edilir.

**Paramaqnitlər** – xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən asılı olmayan müsbət maqnitlənmə əmsalına malik olan maddələrdir. Paramaqnitlərdə atomlar, hətta xarici sahə olmadıqda belə, maqnit momentinə malik olur. Lakin istilik hərəkəti nəticəsində həmin maqnit momentləri xaotik düzülüşə malik olduqlarından, ümumilikdə maddənin maqnitlənməsi sifirə bərabər olur. Xarici maqnit sahəsinin təsiri altında maqnit momentləri sahə istiqamətində düzülüş olur (şəkil 6.2). Amma istilik enerjisinin təsiri altında maqnit momentlərinin nizamlı düzülüşü pozulur. Bu səbəbdən də paramaqnitin maqnitlənmə əmsalı  $\chi$  - temperaturdan kəskin asılı olur. Bərk paramaqnit maddələrin əksəriyyəti üçün maqnitlənmə əmsalı Kuri qanununa tabedir:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta}. \quad (6.7)$$

Burada  $C$ -və  $\theta$ -verilmiş maddə üçün sabit kəmiyyətlərdir. Otaq temperaturunda paramaqnitlərin maqnitlənmə əmsalı  $10^{-3} \div 10^{-6}$  tərtibindədir. Bu səbəbdən də onların maqnit nüfuzluğu vahiddən bir qədər fərqli olur.



**Şəkil 6.2**

Paramaqnit xarici maqnit sahəsi təsir etmədikdə (a) və etdikdə (b)

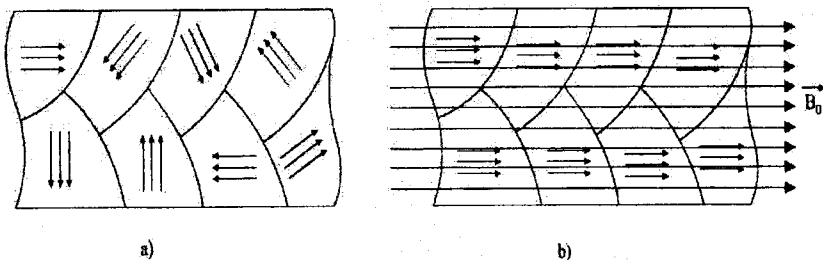
Güclü maqnit sahəsində və aşağı temperaturalarda paramaqnitdə bütün maqnit momentləri maqnit induksiya vektoru istiqamətində düzülür və paramaqnitin maqnitlənməsi doymuş hala keçir.

Paramaqnit materiallara oksigen, azot oksidi, qələvi, qələvi-torpaq və keçid metalları, dəmir duzları, kobalt, nikel və nadirtorpaq elementləri daxildir.

Paramaqnit effekti fiziki təbiəti etibarlı ilə dielektriklərin dipol-relaksasiya polyarlaşmasına bənzəyir.

**Ferromaqnitlər.** Çox böyük müsbət maqnitlənmə əmsalına ( $10^6$ -ya kimi) malik olan və maqnitlənmə əmsalı xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən, eləcə də temperaturdan kəskin asılı olan maddələrdir.

Ferromaqnitlərin maqnitlənmə mexanizmi prinsip etibarlı ilə dia- və paramaqnitlərinkindən fərqlənir. Xarici maqnit sahəsi olmadıqda onların daxilində ölçüləri  $10^{-3}$  mm-ə qədər olan spontan maqnitləşmiş oblastlar mövcuddur. Belə oblastlara domenlər deyilir. Domenlərin yaranmasını kvant mexanikası anlayışları əsasında izah etmək olur. Bu anlayışlara görə, müəyyən anda yaranan mübadilə qüvvələrinin təsiri altında elektronlara məxsus maqnit momentləri bir domen daxilində eyni istiqamətə yönəlir (şəkil 6.3). Bu hal maddənin ən dayanıqlı halıdır, çünki o, mübadilə enerjisinin minimal qiymətinə uyğun gəlir.



Şəkil 6.3

Ferromağnit xarici maqnit sahəsi təsir etmədikdə (a) və xarici maqnit sahə təsir etdikdə (b)

Ferromağnitin atomlarının birlikdə malik olduqları maqnit sahəsi tək atomun maqnit sahəsindən min dəfələrlə böyük olduğundan onun xarici maqnit sahəsinə təsiri həddindən artıq güclü olur.

Ferromağnitlər qızdırılarkən müəyyən temperaturda domen daxilində maqnit momentlərinin düzülüşü pozulduğundan onlar paramağnit halına keçir. Bu keçid halına uyğun temperatur **Kuri nöqtəsi (Küri temperaturu)** adlanır. Məsələn, nikel üçün  $T_k=638.15$  K, dəmir üçün isə  $T_k=1041,15$ K-dır. Ferromağnitin maqnitlənmə əmsalının temperaturdan asılılığı Küri-Veys qanununa tabedir.

Küri temperaturunda ferromağnitlərin maqnit nüfuzluğu vahidə bərabər olur. Bu temperatura görə, mübadilə qarşılıqlı təsir enerjisinin qiymətini təyin etmək olar:

$$T=1000\text{K-də } E_m=4,3 \cdot 10^{-2} \text{ eV olur.}$$

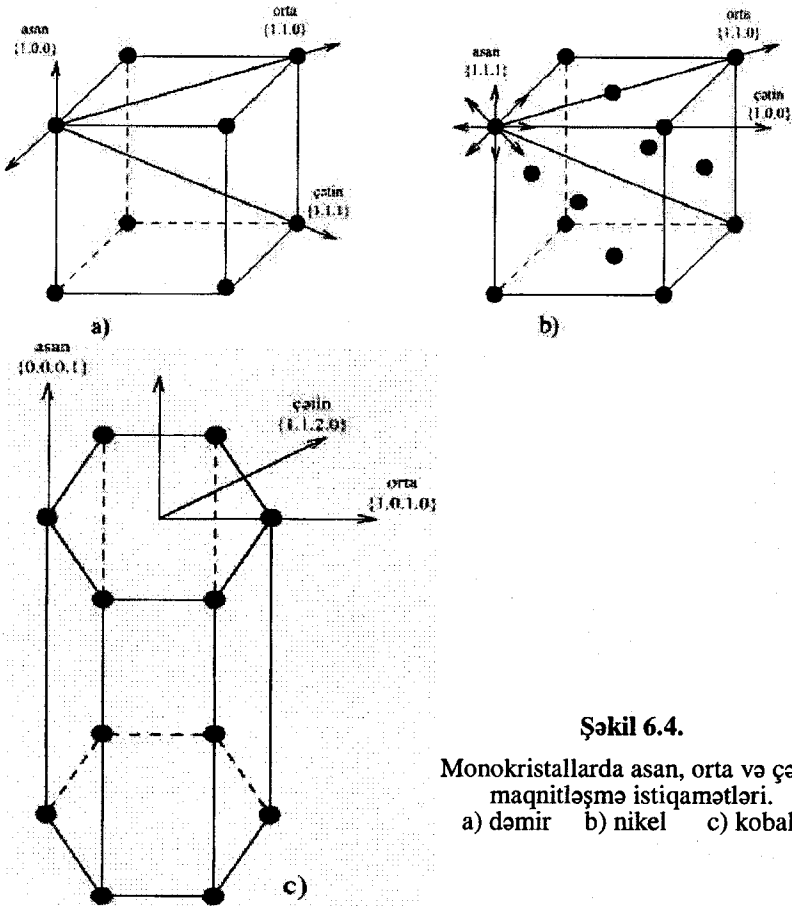
Bu isə kristalloqrafik anizotropiya və maqnitostriksiya deformasiyasına uyğun enerjiden 2 ÷ 5 tərtib böyükdür.

Ferromağnit kristallar üçün **asan və çətin maqnitlənmə istiqamətləri** mövcuddur. Belə istiqamətlərin sayı kristal qəfəsin simmetriyası ilə müəyyən olunur. Maqnit sahəsi olmadıqda domenlərin maqnit momentləri asan maqnitləşən ox istiqamətində yönəlmiş olur. Bütün bu proses **maqnit anizotropiyası** adlanır və onun mübadilə qarşılıqlı təsiri ilə heç bir əlaqəsi yoxdur. Spin momentlərinin, eyni zamanda kristalloqrafik oxlara nəzərən istənilən bucaq qədər dönməsi, mübadilə enerjisinin

dən asılı deyil. Şəkil 6.4-də monokristallarda asan, orta və çətin maqnitlənmə istiqamətləri göstərilmişdir.

Ferromaqnitin həcmində maqnit induksiyasının xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən asılılıq əyrisinə **maqnitlənmə əyrisi** deyilir.

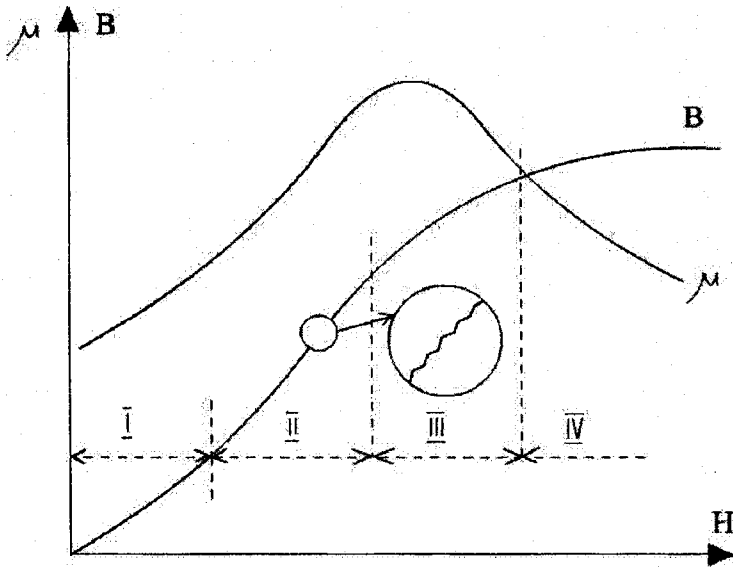
Polikristal ferromaqnitin maqnitlənmə əyrisi şəkil 6.5-də təsvir edilmişdir. Xarici maqnit sahəsinin təsiri altında maqnit induksiyasının artması domen sərhədlərinin yerdəyişməsi və momentlərinin dönməsi ilə əlaqədardır.



**Şəkil 6.4.**

Monokristallarda asan, orta və çətin maqnitləşmə istiqamətləri.

a) dəmir b) nikel c) kobalt

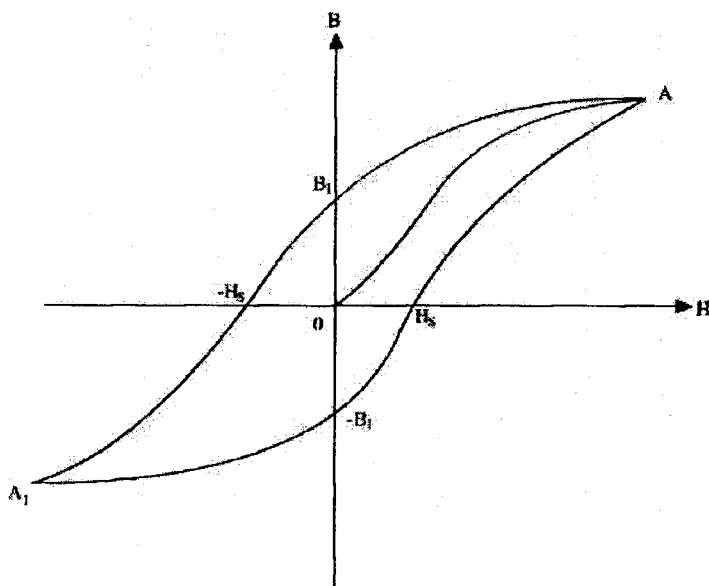


Şəkil 6.5.

Polikristal ferromağnitdə B-mağnit induksiyasının və  $\mu$  - maqnit nüfuzluğunun xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən asılılığı.

Əyrinin birinci oblastı domenlərin sərhədlərinin elastiki sürüşməsinə uyğun gəlir. Xarici sahənin təsiri kəsildikdə yox edilmiş domenlərin sərhədi yenidən əvvəlki vəziyyətə qaydır. İkinci oblast güclü maqnit sahəsində domenlərin sərhədlərinin sürüşməsinə uyğun gəlir. Bu zaman proses sıçrayışlı xarakter daşıyır. Maqnitlənmənin pilləvari dəyişməsi **Barkhausen effekti** adlanır və bu halda əyri ən böyük dikliyə malik olur. Sahənin sonrakı artmasında, (əyrinin III oblastında) maddə ən asan maqnitlənmə halından ən çətin maqnitlənmə halına keçir. IV oblastda bütün maqnit momentləri sahə isti-qamətində yönəlir və birinci texniki doyma baş verir.





Şəkil 6.6

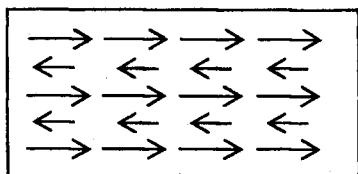
Ferromaqnit A doyma halına gətirildikdən (şəkil 6.6) sonra, xarici maqnit sahəsinin qiymətini sıfır qədər azaltdıqda maqnitlənmə sıfırdan fərqli müəyyən  $B_1$  qiymətinə malik olur. Bundan sonra sahənin istiqamətini dəyişib yenidən qiymətini artırıdıqda müəyyən  $H_s$  qiymətində maqnit induksiyaının qiyməti sıfır bərabər olur. Ferromaqnitə maqnitləndirmək üçün lazım olan xarici sahənin ən kiçik qiyməti koyerstiv ( $-H_s$ ) qüvvə adlanır. Maqnit sahəsinin qiymətini əks istiqamətdə artırmağı davam etdirdikdə əvvəlkinin əksi istiqamətdə maqnitlənmə baş verdiyindən  $B(H)$  asılılığını təsvir edən əyrinin (qrafikin) xarici maqnit sahəsinin əks istiqamətindəki gedişi düzünə istiqamətdəki ilə simmetrik olur. Bu cür qapalı əyri «**histerizis ilgəyi**» adlanır. Histerizis ilgəyi ensiz olan ferromaqnitlər **yumşaq**, histerizis ilgəyi enli olan ferromaqnitlər isə **sərt ferromaqnitlər** adlanır.

Maqnitlənmə prosesində ferromaqnitin xətti ölçülərinin və formasının dəyişməsi müşahidə olunur. Bu hadisəyə **maqnitostriksiya** deyilir. Maqnitostriksiya xətti və spontan olmaqla iki növə malikdir.

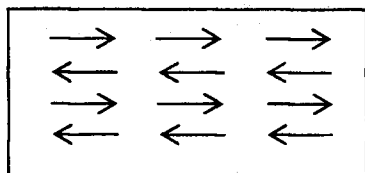
Maddəni Küri temperaturundan aşağı temperatura qədər soyutduqda onun paramaqnit halından ferromaqnit halına keçdiyi zaman spontan maqnitostriksiya baş verir. Xarici maqnit sahəsinin təsiri altında kristal qəfəsin pozulması ilə əlaqədar olan deformasiyaya xətti maqnitostriksiya deyilir. Xətti maqnitostriksiya xarici maqnit sahəsi istiqamətindəki nisbi deformasiya ilə təyin olunur:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta l}{l} \quad (6.10)$$

Burada  $\varepsilon_s$ - maqnitostriksiya zamanı baş verən nisbi deformasiya,  $\Delta l$  - xarici maqnit sahəsi istiqamətində nümunənin xətti ölçüsünün mütləq dəyişməsi,  $l$  - isə nümunənin ilkin uzunluğudur.  $\varepsilon_s$  - həm müsbət, həm də mənfi ola bilər.



Şəkil 6.7.



Şəkil 6.8.

Əgər kristal müxtəlif maqnit momentlərinə malik olan iki tip atomdan, təşkil olunubsa, belə maddə **ferrimaqnit** adlanır (şəkil 6.7).

Şəkil 6.7-də maqnit momentlərini təsvir edən oxların uzunluğu onların qiymətlərinə ekvivalentdir. Bu növ kristallar özələrini sabit maqnit kimi aparırlar.

Elə maqnit maddələri mövcuddur ki, onların qonşu atomlarının maqnit momentləri qiymətcə bərabər olub, istiqamətcə antiparallel yönəlidir (Şəkil 6.8).

Belə maddələrə **antiferromaqnitlər** deyilir. Bu tip maddələr xarici maqnit sahəsi təsir etmədikdə maqnit momentinə malik olmur.

### § 6.3. Maqnit materialların təsnifatı

Elektron texnikasında istifadə olunan maqnit materialları **yumşaq** və **sərt maqnitlər** olmaqla, iki növə ayrılır. Kiçik koyersitiv qüvvəyə və yüksək maqnit nüfuzluğuna malik olan maqnit maddələri **yumşaq maqnit** materialları adlanır.

Bu maddələr zəif maqnit sahəsində doyma halına qədər maqnitlənmə xüsusiyyətinə, nazik histerezis ilgəyinə və kiçik maqnitlənmə itkisinə malikdir. Yumşaq maqnit materiallarından müxtəlif maqnit naqillərinin, eləcə də drossellərdə, transformatorlarda, elektromaqnitlərdə içliklərin hazırlanmasında istifadə olunur. Yumşaq maqnit materialları üçün koyersitiv qüvvə 800 A/M-dən kiçik olmalıdır. Ən yaxşı yumşaq maqnit materialları üçün  $H_s=1$  A/M.

Transformatorlarda burulğanlı cərəyanlar hesabına baş verən itkini azaltmaq məqsədilə yumşaq maqnit materiallarından istifadə olunur. Bu məqsədlə bir-birindən təcrid edilmiş nazik lövhələr götürülür. Belə maqnit lövhələri yüksək elastikliyə malik olmalıdır. Yumşaq maqnit materiallarına qoyulan əsas tələb onların xassələrinin zamana görə sabit qalması, temperatur və mexaniki gərginliyə davamlı olmasıdır.

Bir çox maqnit materialların əsas komponenti dəmirdir. Dəmir tipik yumşaq maqnit materialıdır. Bu maddənin maqnit xassəsi onda aşqarların həll olma dərəcəsiindən, maddənin quruluşundan, dənələrin ölçülərindən və mexaniki gərginliyin mövcudluğundan asılıdır. Cədvəl 6.1-də bəzi yumşaq ferro-maqnit maddələrin xassələri verilmişdir.

*Cədvəl 6.1.*

Materiallar	Maqnit nüfuzluğu		Koyersitiv qüvvə (A/M)	İnduksiyanın doyma qiyməti (Tl)	Xüsusi müqavimət (MkOmM)
	Başlanğıc qiymət	Maksimal qiymət			
Texniki təmiz dəmir	250-400	3500-4500	10-100	2,18	0,1
Elektrolitik dəmir	600	15000	30	2,18	0,1

Karbonlaşdırılmış dəmir	200-3000	20000-21500	6,4	2,18	0,1
Monokristal təmiz dəmir	>20000	1430000	0,8	—	0,097
Elektrotexniki polad	200-600	3000-8000	10-65	1,95-2,02	0,25-0,6
Az miqdarda nikelli permaloy	1500-4000	15000-60000	5-32	1,0-1,6	0,45-0,9
Yüksək miqdarda nikelli permaloy	7000-10000	50000-300000	0,65-5	0,65-1,05	0,16-0,85
Superpermaloy 79% Ni, 5% Mo, 15% Fe, 0,5% Mn	100000	1500000 Kimi	0,3	0,8	0,6

Maqnit materiallardan geniş istifadə olunması, müxtəlif maqnitlənmə əyrisinə və xarakteristikalarına malik yeni maddələrin alınmasını tələb edir. Bu səbəbdən də nanoquruluşlu həcmi maqnit materialların alınmasını irəliyə doğru uğurlu addım hesab etmək olar. Həcmi nanoquruluşlu materiallara misal olaraq  $Fe_{73.5}C_4Nb_3Si_{13.5}B_9$  —u göstərmək olar. Bu ərintinin maqnitlənməsi zamanı doyma halına uyğun maqnit induksiyası 1,24 Tl, qalıq induksiyası 0,67 Tl, koyersetiv qüvvəsi isə çox kiçik olub,  $-0,53$  A/m-ə bərabərdir. Tərkibindəki nanozərrəciklərin ölçüsü  $10\div 15$ nm olan  $Fe_{69}Ni_9CO_2$  amorf materialın maqnitlənmə histerezis əyrisi, demək olar ki, yoxdur. Hər bir zərrəciyi yalnız bir domendən ibarət, histerizis ilgəyi olmayan maqnit materiallarına **superparamaqnitlər** deyilir. Ən güclü sabit maqnit neodim, dəmir və bor əsasında hazırlanmış xəlitədən düzəldilir. Maqnit materialların başqa bir növü karbonlu nanoborucuqlarla əlaqədardır. Piroliz prosesi zamanı karbonlu nanoborucuqların formalaşması və böyüməsi ferromaqnit (dəmir, kobalt) zərrəciklərinin olmasını tələb edir. Ftalosiyanid dəmirin ( $FePc$ ) pirolizi zamanı eyni istiqamətli karbonlu nanoborucuqların əmələ gəlməsi üçün iki dəmir nanozərrəciyin olması vacibdir. Bunlardan biri nanoborucuqların əmələ gəlməsində başlanğıc özək rolunu oynayır, onların böyüməsində əsas

rol oynayan ikincisi isə borucuğun digər ucunda yerləşir. Eyni istiqamətli karbon nanoborucuqlar FePc-in arqon-hidrogen mühitində pirolizi prosesində kvars şüşə üzərində alınır.

Temperaturun 5K-nə qədər azalması maqnit nanoborucuqlarda koyersetiv qüvvələrin üç dəfə artmasına səbəb olur. Nanoborucuğun uclarında yerləşən dəmir nanozərrəcikləri yüksək sıxlığa malik maqnit yazma qurğusunun əsasını təşkil edə bilər. Bu zamanı nanoborucuqlar dəmirin nanozərrəcikləri arasında ayırddedici element rolunu oynayaraq, onların maqnit qarşılıqlı təsirini kifayət qədər azalda bilər. Ferromaqnit nanozərrəciklər arasında güclü qarşılıqlı təsir olduqda onların maqnit momentlərinin istiqamətlənməsi üçün güclü maqnit sahəsi tələb olunur.

Nanomaqnit materialların yaradılmasının başqa bir yolu da baxılan materialın daxilindəki məsələlərə nanozərrəciklərin daxil edilməsidir. Təbiətdə molekulyar aralıqları maqnit nanozərrəciklərlə dolmuş materiallar mövcuddur. Belə materiallara misal olaraq ferritini göstərmək olar. **Ferritin** daxili diametri 7,5 nm, xarici diametri isə 12,5 nm olan sferik formalı zülaldən ibarətdir. Onun kütləsinin 25% -ni dəmir təşkil edir. Belə molekul bioloji sistemdə  $Fe^{3+}$  saxlayan obyektədir. İnsan orqanizmində olan dəmirin dörd-də-bir hissəsi ferritin molekullarında, 70%-i isə hemoqlobində olur. Normal şəraitdə ferritinin boşluğu  $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$  dəmir oksidi kristalı ilə dolur. Daxilində məsələləri olan materiallara misal olaraq seoliti göstərmək olar. Bu material nanozərrəcikləri yerləşdirmək üçün matrisa rolunu oynaya bilər. Seolite daxil edilmiş dəmir zərrəciklərinin temperaturdan asılılığı onların paramaqnit xüsusiyyətə malik olmasını göstərir. Maqnit həssaslığının temperaturdan asılılığı Kuri qanununa tabedir. Belə materiallarda ferromaqnit əlamətləri müşahidə olunur.

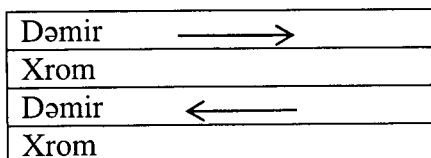
## § 6.4. Böyük və hədsiz böyük maqnit müqaviməti

İlk dəfə materialların elektrik keçiriciliyinə maqnit sahəsinin təsirini ingilis alimi Uilyam Tomson (Lord Kelvin) tədqiq edərək müəyyənləşdirmişdir ki, maqnit sahəsinin istiqamətini dəyişməklə elektrik müqavimətinin qiymətini dəyişmək olar. Elektrik cərəyanının istiqaməti maqnit sahəsinin istiqaməti ilə eyni olduqda müqavimət artır, perpendikulyar yönəldikdə isə, azalır. Bu hadisə maqnit müqavimətin antizotropiyası adlanır və onun əsasında praktikada geniş istifadə olunan maqnitorezistiv material-permaloyid (dəmir və nikelin xəlitəsi) yaradılmışdır.

1977-ci ildə «Maqnit və nizamsız sistemlərin elektron quruluşunun fundamental nəzəri təhlilinə» görə Nobel Mükafatı almış ingilis fiziki Nevill Mott, ferromaqnitlərdə elektrik yüklərinin daşınmasında müşahidə olunan anomallığı elektronun elektrik yükündən əlavə, spinə də malik olması ilə əlaqələndirmişdir.

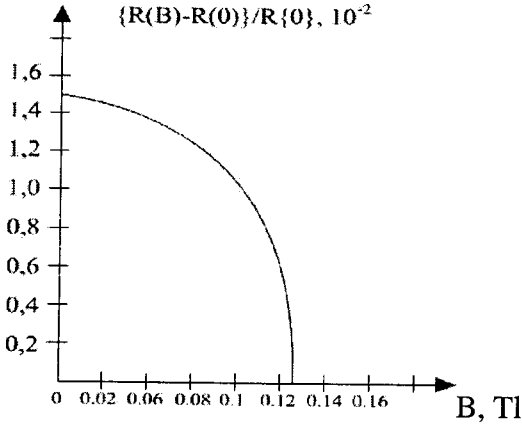
Metallarda maqnit müqaviməti aşağı temperaturalarda güclü sahədə müşahidə olunur. Məsələn, təmiz misin elektrik keçiriciliyi 4K-də 10T induksiya maqnit sahəsinin təsiri altında 10 dəfə dəyişir. Bununla belə, temperaturun belə çox aşağı, maqnit sahəsinin isə böyük olması maqnit müqavimətlərinin tətbiq sahəsini məhdudlaşdırırdı. Lakin 1988-ci ildə çox böyük maqnit müqavimətinin kəşf olunması vəziyyəti xeyli dəyişdi. Çox böyük maqnit müqaviməti (CBMM) bir-birini əvəz edən ferromaqnit və qeyri-maqnit qatlarından təşkil olunmuş çoxlaylı materiallarda müşahidə olunur.

Laylar süni çökdürmə yolu ilə əldə edilir və onlar ardıcıl olaraq ferromaqnit və qeyri-ferromaqnit metaldan ibarət olur. Bu effekt ilk dəfə dəmir və xromun nazik lövhələrindən ibarət olan laylı materiallarda (Şəkil 6.9), sonradan isə digər kombinasiyalarda da müşahidə edilmişdir.



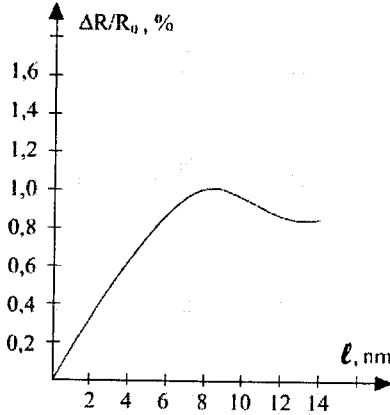
Şəkil 6.9

Sonuncularda (məsələn, kobalt-mis laylarında) maqnit müqavimətinin qiyməti daha böyük olmuşdur. Şəkil 6.10-da sabit maqnit sahəsinin çoxlaylı dəmir-mis sisteminin müqavimətinin qiymətinə təsiri göstərilmişdir.



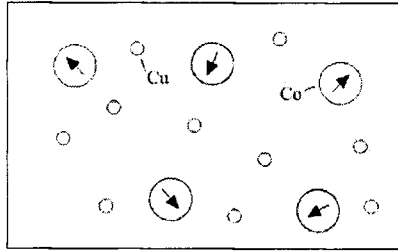
Şəkil 6.10

Şəkil 6.11-dən görüldüyü kimi, müqavimətin dəyişməsi özünün maksimum qiymətini dəmir qatının qalınlığı 7 nm olduqda alır.



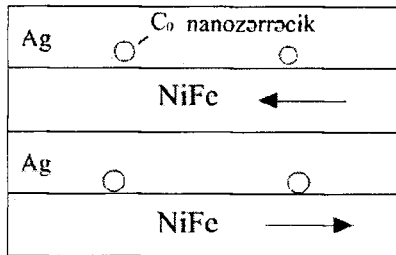
Şəkil 6.11

Qeyri-mağnit matrisada xaotik istiqamətlənmiş maqnitlənmə vektoruna malik birdomenli nanozərrəcikli materiallar da çox böyük (nəhəng) maqnit müqavimətinə malik olur. Belə bir sistem sxematik olaraq şəkil 6.12-də təsvir edilmişdir.



Şəkil 6.12

Laylı quruluşdan fərqli olaraq, belə sistemin maqnit müqaviməti bütün istiqamətlərdə eyni qiymətə malikdir. Onu xarici maqnit sahəsində yerləşdirdikdə ferromağnit nanozərrəciyin maqnitlənmə vektorunun sahə istiqamətində dönməsi nəticəsində, elektrik müqaviməti kiçilir. Sahənin intensivliyinin artması və nanozərrəciyin ölçüsünün kiçilməsi müqavimətə təsiri artırır. İki ferromağnit layı arasında yerləşən metal matrisadakı nanozərrəciklərdən ibarət hibrid sistemdə (Şəkil 6.13) maqnitorezistiv xüsusiyyət müşahidə olunur.



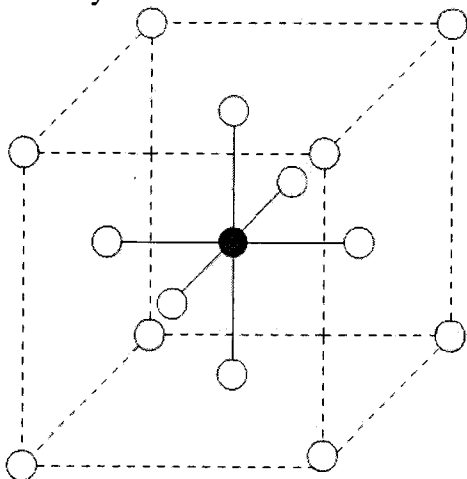
Şəkil 6.13

Aşkar edilmiş belə sistemlər laylı sistemlərə nisbətən hədsiz böyük (supernəhəng) maqnit müqavimətə malik olur.



Belə materiallardan yazan maqnit başlıqlarının və həssas maqnitometr elementlərinin hazırlanmasında istifadə olunur.

Perovskit  $\text{LaMnO}_3$  tipli materiallarda marqanes üçvalentlidir.  $\text{La}^{3+}$  zərrəciyini ikivalentli ionlarla (Ca, Ba, Sr, Pb, Cd) əvəz etdikdə elektroneytrallığı saxlamaq üçün marqanesin bəzi ionları  $\text{Mn}^{3+}$  halından  $\text{Mn}^{4+}$  halına keçməlidir. Bu zaman sistemdə kifayət qədər çəvik müsbət elektrik yükləri əmələ gəlir və sistem hədsiz böyük (supernəhəng) maqnit müqavimətinə malik olur. Baxılan kristalın elementar qəfəs quruluşu şəkil 6.14-də təsvir edildiyi kimidir.



Şəkil 6.14

$\text{La}_{0,67} \text{Ca}_{0,33} \text{MnO}_x$  sisteminin müqaviməti 6Tl-yə bərabər sabit maqnit sahəsində min dəfəyə qədər dəyişir.



*Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,  
professor*

### **Qüdrət Əli oğlu Axundov**

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor Qüdrət Əli oğlu Axundov 1932-ci ildə Ordubad şəhərində anadan olmuşdur. Orta təhsilini Ordubad şəhərindəki 1 saylı orta məktəbdə, ali təhsilini isə Azərbaycan Dövlət Universitetinin (indiki Bakı Dövlət Universitetinin) fizika-riyaziyyat fakültəsində almışdır. Hələ tələbəlik illərindən elmi-tədqiqat işinə böyük maraq göstərərək, akademik H.B.Abdullayevin rəhbərliyi ilə bir sıra yarımkeçiricilərin, o cümlədən Azərbaycan Respublikası ərazisində ehtiyatları olan təbii qalenit kristallarının fiziki xassələrinin tədqiqi ilə məşğul olmuş və 1955-ci ildə «Bəzi yarımkeçiricilərin elektrik keçiriciliyinin və termoelektrik hərəkət qüvvəsinin tədqiqi» mövzusunda ilk elmi əsərini çap etdirmişdir. Universiteti bitirdikdən sonra o, Azərbaycan EA-nın Fizika İnstitutunda laborant, kiçik elmi işçi (1955–1960), baş elmi işçi (1960–1970), laboratoriya müdiri (1970–1971) vəzifələrində çalışmış, elmdə qazandığı uğurları ilə qısa bir müddət ərzində nüfuzlu Qüdrət müəllim kimi tanınmışdır.

Hələ 1955-ci ildən prof. Q.Ə.Axundov tərəfindən Respublikada ilk dəfə olaraq, böyük praktiki əhəmiyyətə malik olan bir üsulla – yarımkeçiricilərdə radioaktiv izotoplar üsulu ilə diffuziya proseslərinin tədqiqinə dair elmi-tədqiqat işləri başlanılmış, bu üsulla selen düzləndiricilərində fiziki proseslərin xüsusiyyətləri öyrənilmişdir.

Alimin elmi fəaliyyəti əsasən  $A^3B^6$  tipli yarımkeçirici birləşmələrin monokristallarının alınması və tədqiqi ilə əlaqədardır. Bu tip yarımkeçirici birləşmələr, onların monokristalları respublikada ilk dəfə olaraq Q.Ə.Axundov tərəfindən hələ 1957-ci ildə alınmış, onların laylı və zəncirvari quruluşa malik olduğu göstərilmişdir. Prof. Q.Ə.Axundov həmkarları ilə birlikdə bu birləşmələrin iriölçülü mükəmməl monokristallarının göyərilməsi üçün texnoloji rejim işləyib hazırlamış, mahiyyətə yeni texnoloji üsulun – külçə boyunca sabit temperatur qradiyenti şəraitində asta soyudulmadan istifadənin müm-

künlüyünü təklif etmiş və onu reallaşdırmışdır. Onun rəhbərliyi altında göstərilən kristalların elektrik, optik, fotoelektrik, lüminessensiya və kontakt xassələrinin kompleks tədqiqi nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, müxtəlif istiqamətlərdə kimyəvi rəbitənin fərqlənməsi və kristal quruluşun anizotropluğu sayəsində bu kristallarda fiziki xassələrin anizotropluğu və bir sıra maraqlı fiziki hadisələr müşahidə olunur. Müəyyən edilmişdir ki,  $A^3B^6$  sinfinə daxil olan hər bir birləşmənin qadağan olunmuş zolağının eni uyğun  $A^3B^6$  və  $A^2B^6$  izoelektron birləşmələrinin qadağan olunmuş zonasının eninin orta qiymətinə bərabərdir. İlk dəfə olaraq qallium selen kristallarında sürətli elektronların təsiri ilə lazer şüalanması müşahidə edilmiş və Nobel Mükafatı Laureatı, akademik N.Q.Basovla birgə aparılan bu iş 1965-ci ildə «SSRİ EA-nın Məruzələri» jurnalında çap olunmuşdur. Prof. Q.Ə.Axundov həmkarları ilə birlikdə bu tədqiqatları davam etdirərək  $A^3B^6$  sinfinə daxil olan bir sıra yarımkeçiricilərdə və onların əsasındakı bərk məhlullarda elektrolüminessensiya, müxtəlif təsirlərlə induksiyanmış şüalanma, çeviricilik hadisəsi müşahidə etmişdir. Bu tədqiqatlar nəticəsində aşkar edilmişdir ki, həmin materiallar optoelektronika və funksional mikroelektronika üçün böyük əhəmiyyət kəsb edir. Aparılan kompleks tədqiqat işlərini ümumiləşdirərək Q.Ə.Axundov 1958-ci ildə namizədlik, 1967-ci ildə isə doktorluq dissertasiyası müdafiə etmişdir.

Hələ 1960-cı ildən başlayaraq BDU-nun fizika fakültəsində yarımkeçiricilər fizikası sahəsində müxtəlif ixtisas kursları üzrə yüksək səviyyədə mühazirələr oxuyan, kurs, diplom işlərinə, namizədlik dissertasiyalarına rəhbərlik edən yarımkeçiricilər fizikasının tədrisi metodikası sahəsində böyük əmək tutumlu işlər aparan prof. Q.Ə.Axundov elmi-pedaqoji ictimaiyyətə yüksək təfəkkürə malik tədqiqatçı alim olmaqla yanaşı, həm də bacarıqlı müəllim kimi tanınmışdır. Elmi-pedaqoji işə olan marağı onu 1970-ci ildə yenidən təhsil aldığı doğma universitetə gətirmişdir. Lakin bu dəfə başqa missiyada – o, müsabiqə yolu ilə BDU-nun «Yarımkeçiricilər fizikası» kafedrasının müdiri vəzifəsinə seçilmiş və ömrünün sonuna qədər həmin vəzifədə çalışmışdır.

Prof. Q.Ə.Axundov «Yarımkeçiricilər fizikası» kafedrasına müdirlik etməyə başladıqdan sonra çox qısa müddət ərzində kafedranın elmi və metodiki fəaliyyətində ciddi dönüş baş vermiş, kafedranın elmi istiqaməti əsasən Mendeleyev cədvəlinin I, III və VI

qrup elementləri əsasında birləşmələrin və bərk məhlulların alınması, onların elektrik, optik, fotoelektrik və lüminessensiya xassələrinin öyrənilməsi ilə əlaqədar olmuşdur. Sonralar kafedrada  $A^3B^6$  birləşmələrinin üçqat analoqlarının alınmasına və tədqiqinə başlanılmış, bu birləşmələrdə baş verən elektron və fonon prosesləri haqqında ətraflı məlumat əldə edilmişdir.

Bakı Dövlət Universitetində çalışdığı müddətdə prof. Q.Ə. – Axundov ümumi fizika kursu, yarımqeçiricilərin və yarımqeçirici cihazların fizikası, eləcə də başqa ixtisas kurslarından mühazirələr oxumaqla yanaşı, həm də yarımqeçiricilər fizikası sahəsində sözün əsl mənasında böyük elmi məktəb yaratmışdır.

Prof. Q.Ə.Axundov daima gənclərə qayğı ilə yanaşmış, onların tədqiqatçı, alim kimi formalaşmasında gərgin əmək sərf etmişdir. Onun elmi rəhbərliyi ilə 10-dan çox elmlər namizədi hazırlanmışdır. Qısa ömrü ərzində o, respublika və xarici ölkələrdə dərc olunan elmi jurnallarda 100-dən çox elmi məqalə çap etdirmiş, dəfələrlə Beynəlxalq Elmi Konfranslarda onun məruzələri dinlənilmişdir.

Prof. Q.Ə.Axundov 1973-cü ildə – ömrünün yetkin və fəaliyyətinin çiçəkləndiyi bir vaxtda dünyasını dəyişmişdir.

*Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,  
professor*  
**Əhməd Şahvələd oğlu Abdinov**



30 may 1945-ci ildə Ordubad rayonunun Behrud kəndində anadan olub. 1963-cü ildə Ordubad şəhərində 1 saylı orta məktəbi, 1968-ci ildə isə Azərbaycan Dövlət Universitetinin fizika fakültəsini «Fərqlənmə diplomu» ilə bitirib. Hələ tələbə ikən «Ученые записки АГУ» (Bakı), «Журнал физической химии» (Moskva), «Высокомолекулярные соединения» (Moskva) jurnallarında 3 elmi məqalə dərc etdirib. 1969–1971-ci illərdə SSRİ EA-nın Fizika-Texnika İnstitutunda (Leninqrad – indiki Sankt-Peterburq şəhəri) əyani aspirant olub və 1972-ci ildə «Germanium kristallarında qızmar qeyri-əsas yükdaşıyıcıların təbiəti» mövzusunda namizədlik dissertasiyası müdafiə edib.

Prof. Ə.Ş.Abdinov 1972-ci ildən başlayaraq selen, germanium, bor kimi elementar yarımkeçiricilərdə, laylı quruluşlu  $A^{III}B^{VI}$  və halkoprit quruluşlu  $CuInSe_2$  birləşmələrində,  $Ge_{1-x}Si_x$ ,  $Cb_{1-x}Sn_xSe$ ,  $Cd_{1-x}Zn_xS$ ,  $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ,  $Cd_{1-x}Zn_xS_{1-y}Se_y$ ,  $As_{1-x}S_xTe$  tipli bərk məhlulların monokristallarında və nazik təbəqələrində, eləcə də onların əsasındakı strukturlarda tarazlıqda olmayan elektron proseslərinin (qızmar yükdaşıyıcılarla bağlı effektlərin, fotoelektrik hadisələrinin, qeyri-adi fotoelektrik və elektrik effektlərinin, foto- və elektrolüminessensiyanın, çeviricilik effektlərinin, injeksiya cərəyanlarının, elektrik dayanıqsızlıqlarının və s.) kompleks tədqiqini aparmaqla həmin tip qismən nizamsız yarımkeçiricilərdə elektron proseslərinin xüsusiyyətlərini aşkar etmiş, nizamsızlıq dərəcəsinin idarə olunması yollarını müəyyənləşdirmişdir.

O, «Physical Status Solidi» (Berlin), «Proc.SPIE» (Vaşinqton), «Thin Solid Films» (London), «J.of Yap.Appl.Phys» (Tokio), «Surface Engineering and Applied Electrochemistry» (Vaşinqton), «Неорганические материалы» (Moskva), «Высокомолекулярные соединения» (Moskva), «Прикладная физика» (Moskva), «Жур-

нал физической химии» (Moskva), «Микроэлектроника» (Moskva), «Физика и техника полупроводников» (Sankt-Peterburq), «Оптика и спектроскопия» (Sankt-Peterburq), «Вестник Бакинского Университета» (Bakı), «Проблемы энергетики» (Bakı), «Fizika» (Bakı), «Известия НАНА» (Bakı), «Доклады НАНА» (Bakı) jurnallarında çar olunmuş 300-dən çox elmi əsərin müəllifidir ki, bunlardan da 110-a qədəri «SCI» indeksli elmi jurnalların payına düşür.

Prof. Ə.Ş.Abdinovun müxtəlif yarımkeçirici materiallar əsasında elektron cihazlarının düzəldilməsinə dair çoxlu praktiki təklifləri və 2 ixtirası var.

Onun Rusiya Federasiyası, Fransa, Almaniya, Rumıniya, İngiltərə, Yaponiya, Tayvan, Ukrayna, İran İslam Respublikası, Belarus, Litva, Moldova, Gürcüstan, Qazaxıstan, Özbəkistan, Türkmənistan və Türkiyə Respublikasında keçirilən 100-dən çox Beynəlxalq miqyaslı elmi konfrans və simpoziumlarda məruzələri dinlənilmişdir.

Ə.Ş.Abdinov 1979-cu ildə «Laylı quruluşa malik  $A^{III}B^{VI}$  birləşmələrinin monokralları tipli qeyri-bircins yarımkeçiricilərdə elektron hadisələri» mövzusunda doktorluq dissertasiyası müdafiə edib, 1981-ci ildən isə professorudur.

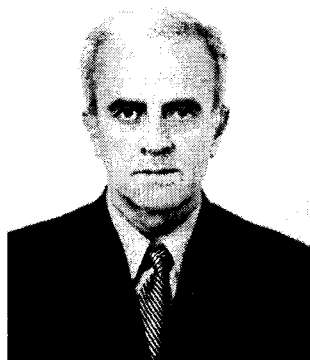
Elmi-pedaqoji fəaliyyəti dövründə prof. Ə.Ş.Abdinov BDU-da tələbələrə «Yarımkeçiricilərin fizikası», «Bərk cisim fizikası», «Yarımkeçirici cihazların fizikası», «Yarımkeçirici cihazların texnologiyası», «Bərk cisim elektronikasısı» kurslarından mühazirələr oxumaqla yanaşı, həm də 30-dan çox namizədlik və 6 doktorluq dissertasiyasına elmi rəhbər olmuşdur.

O, ali məktəblər üçün «Bərk cisim elektronikasısı», «Optoelektronika», «Fiziki elektronikanın tarixi və metodologiyası», «Elektron texnikasının materialları və nanotexnologiyanın əsasları» dərslilik və dərslər vəsaitlərinin müəllifidir.

Prof. Ə.Ş.Abdinov BDU-da «Bərk cisim elektronikasısı» Elmi-Tədqiqat laboratoriyasının (1989–2007-ci illər) elmi rəhbəri, «Fizika fakültəsi»nin dekanı (1988–1989) olmuş, 1992-ci ildən isə «Fiziki elektronika» kafedrasına rəhbərlik edir.

O, 1993–2000-ci illərdə Azərbaycan Respublikası Təhsil nazirinin müavini və nazir əvəzi vəzifələrində çalışmış, bu dövrdə müstəqil respublikanın təhsil sisteminin normativ-hüquqi bazasının yaradılmasında xeyli işlər görmüşdür.

Prof. Ə.Ş.Abdinov tanınmış tədqiqatçı alim kimi ictimaiyyət arasında və beynəlxalq aləmdə nüfuza malikdir. O, 1977-ci ildə Elm və Texnika sahəsində Komsomol Mükafatı Laureatı, 1993-cü ildə Elm sahəsində Beynəlxalq Soros Fondu müsabiqəsi qalibi olmuş, 1995-ci ildə Nyu-York Elmlər Akademiyasının həqiqi üzvü, 2009-cu ildə Beynəlxalq Bioqrafiya Mərkəzi (İngiltərə-Kembridc Universiteti) tərəfindən «İlin 100 Birinci Tədqiqatçısı» və Amerika Birləşmiş Ştatlarının Bioqrafiya İnstitutu tərəfindən «İlin adamı» élan olunmuş, həmin nominasiyaların medal və sertifikatlarını almışdır.



*Fizika-riyaziyyat elmləri  
namizədi, dosent*

### **Vaqif Hüseynqulu oğlu Səfərov**

5 mart 1941-ci ildə Şamaxı şəhərində anadan olub, 1958-ci ildə oradakı 1 saylı orta məktəbi bitirib və Azərbaycan Dövlət Universitetinin (indiki Bakı Dövlət Universitetinin) fizika fakültəsinə qəbul olunub. 1958–1963-cü illərdə həmin fakültənin əyani şöbəsində təhsil alıb və 1963-cü ildə Universiteti bitirdikdən sonra 1964-cü ilədək Şamaxı şəhərindəki 1 saylı orta ümumtəhsil məktəbində fizika müəllimi işləmişdir. 1964–1965-ci illərdə hərbi xidmətdə olmuşdur. Hərbi xidməti başa çatdırdıqdan sonra 1967-ci ilə qədər Şamaxı rayonunun Çuxuryurd kəndindəki orta ümumtəhsil məktəbində və Şamaxı şəhərindəki 2 saylı orta ümumtəhsil məktəbində fizika müəllimi vəzifəsində çalışmışdır.

1967–1969-cu illərdə Bakı Dövlət Universitetində laborant, 1969–1972-ci illərdə isə həmin Universitetin «Yarımqeçiricilərin fizikası» kafedrasının əyani aspirantı olmuşdur.

V.H.Səfərov aspiranturamı bitirdikdən sonra 1972–1982-ci illərdə Bakı Dövlət Universitetinin fiziki elektronika kafedrasında laboratoriya müdiri, 1982–1984-cü illərdə assistent, 1984–1990-cı illərdə baş müəllim, 1990-cı ildən etibarən isə dosent vəzifəsində çalışır.

O, 1979-cu ildə «Alçaq və yüksək həyəcanlaşmada qallium halkogenidlərinin və onların vismut, itterbium halkogenidləri əsasında alınmış bərk məhlullarının optik və fotoelektrik xassələrinin tədqiqi» mövzusunda namizədlik dissertasiyası müdafiə etmiş, 1991-ci ildə dosent elmi adı almışdır.

Universitet tələbələrinə ümumi fizika, radiofizika, elektron texnikasının materialları, bərk cisim fizikası, materialşünaslıq, mikro- və nanoelektronikanın əsasları fənlərindən yüksək səviyyədə mühazirələr oxuyan dos.V.H.Səfərov, həm də elektron texnikası üçün perspektivli olan mürəkkəb yarımqeçirici materialların alınması, tədqiqi, tətbiq imkanlarının müəyyənəşdirilməsi sahəsində dəyərli tədqiqat işləri aparır.



O, çox nüfuzlu beynəlxalq və regional nəşrlərdə çap olunmuş 60-dan çox elmi məqalənin, o cümlədən ixtira üçün alınmış 9 patentin müəllifidir.

Dos.V.H.Səfərov həm Respublikada, həm də müxtəlif xarici ölkələrdə keçirilmiş bir neçə beynəlxalq əhəmiyyətli elmi konfrans və simpoziumlarda məruzələrlə çıxış etmişdir.

## Ə D Ə B İ Y Y A T

1. **Abdinov Ə.Ş., Məmmədov H.M.** Bərk cisim elektronika-sı. Bakı, «Təhsil», 2004.
2. **Abdinov Ə.Ş., Mehdiyev N.M.** Optoelektronika. Bakı, «Maarif», 2005.
3. **Abdinov Ə.Ş., Kazımsadə A.H.** «Q.Ə.Axundovun Bakı Dövlət Universitetindəki fəaliyyətinin Azərbaycanda fizi-kanın inkişafındakı rolu». Fizika, 2007, XIII, № 4, səh.5–7.
4. **Əsgərov Ş.Q., Sadıqzadə G.M., Ağayev M.N.** Vakuum texnikasının əsasları. Bakı, «BDU», 2007.
5. **Məmmədov N.Ə.** İfrat yüksək tezliklər elektronika-sı. Ba-kı, «Ti-media», 2008.
6. **Пасынков В.В.** Материалы электронной техники. Мо-сква, «Высшая школа», 1983.
7. **Sadıqov O.M., Nəsənova M.S.** Elektron texnikasının ma-terialları və komponentləri. Bakı, «AzTU», 2002.
8. **Кривошеева Г.Б., Тарасов В.В., Герасимов А.П.** Ма-териаловедение. Владивосток, «ДВГМА», 1999.
9. **Пасынков В.В., Сорокин В.С.** Материалы электрон-ной техники. Москва, «Высшая школа», 1986.
10. **Казаринский Д.М., Яманов С.А.** Радиотехнические материалы. Москва, «Высшая школа», 1972.
11. **Кабаяси Н.** Введение в нанотехнологии. Москва, «Би-ном», 2005.
12. **Пуль Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. Москва, «Техно-сфера», 2007.
13. **Məhərrəmov A.M., Ramazanov M.Ə., Vəliyeva L.İ.** Nanotexnologiya. Bakı, «Çaşıoğlu», 2007.
14. **Рыжанков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури.** Наномате-риалы. Москва, «Бином», Лаборатория знаний, 2008.
15. **Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Агул-ло-Руедо Ф.** Нанотехнология для микро- и оптоэлек-троники. М., «Техносфера», 2007.

16. **Чаплыгин Ю.А.** Нанотехнологии в электронике. М. «Техносфера», 2005.
17. **Zərbəliyev M.M.** Yarımqeçiricilər fizikası. Bakı, «Təhsil», 2008.
18. **Eyvazov E.Ə.** Vərk cisimlər fizikası. Bakı, «Çinar-çap», 2007.
19. **Баранский П.И., Ключков В.П., Потыкевич И.В.** Полупроводниковая электроника. Киев, «Науково Думка», 1975.
20. **Barxalov B.Ş., Hüseynov Y.Y., İsmayılov R.M.** Elektron texnikasının materialları, Sumqayıt, «SDU», 2007.

*Əhməd Şahvələd oğlu Abdinov*  
*Vaqif Hüseynqulu oğlu Səfərov*

**ELEKTRON TEXNİKASININ MATERIALLARI VƏ  
NANOTEKNOLOGİYANIN ƏSASLARI**

*Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti*

Bakı, «Təhsil», 2010.

---

Çapa imzalanmışdır 17.01.2010. Kağız formatı 60x90<sup>1/16</sup>.

Fiziki çap vərəqi 11,5. Sifariş 141. Tiraj 200.

Qiyməti müqavilə yolu ilə.

«Təhsil Nəşriyyat-Poliqrafiya» MMC  
Bakı, AZ 1052, F.Xoyski küç. 121<sup>A</sup>