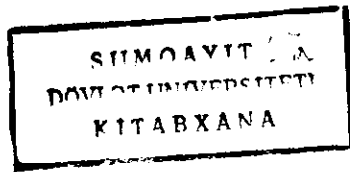


BƏRK CİSİM ELEKTRONİKASI CİHAZLARININ TEXNOLOGİYASI

(Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti)

*Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyinin
16 iyun 2006-cı il tarixli 484 sayılı
əmri ilə təsdiq olunmuşdur*

20568



Sumqayıt - 2006

Elmi redaktoru:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof. C.Ş. Abdinov

Rəyçilər:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof. F.C. Qasimov

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof. Ş.M. Əfəndiyev

Bərk cisim elektronikasi cihazlarının texnologiyası

Ali məktəblər üçün dərs vəsaiti.

Sumqayıt Dövlət Universitetinin

Nəşriyyatı, 2006, 208 s., şək.

Dərs vəsaiti "Bərk cisim elektronikasi cihazlarının texnologiyası" kursunun proqramına uyğun olaraq yazılmışdır.

Həmin vəsait fizika, radioelektronika, bərk cisim elektronikasi və fiziki elektronika üzrə ixtisaslaşan ali məktəb tələbələri üçün nəzərdə tutulmuşdur.

MÜNDƏRİCAT

GİRİŞ	7
F ə s i l 1. Bərk cisim elektronikasında istifadə olunan materiallar	12
§ 1.1. Materialların təsnifatı	12
§ 1.2. Yarımqeçirici materiallara qoyulan tələblər	13
§ 1.3. Bərk cisim elektronikasi cihazlarının istehsalında istifadə olunan əsas yarımqeçirici materiallar	14
1.3.1. <i>Germanium</i>	16
1.3.2. <i>Silisiyum</i>	17
1.3.3. <i>Qallium arsenid</i>	18
§ 1.4. Xəlitələr və onların hazırlanması üsulları	19
1.4.1. <i>Xəlitələr</i>	19
1.4.2. <i>Xəlitələrin hazırlanma üsulları</i>	22
F ə s i l 2. Materialların mexaniki işlənməsi	26
§ 2.1. Monokristalların kristalloqrafik oxlar istiqamətində yönəldilməsi üsulları	27
§ 2.2. Yarımqeçirici materialların lövhələrə və kristallara kəsilməsi	35
2.2.1. <i>Külçələrin lövhələrə kəsilməsi üsulları</i>	36
2.2.2. <i>Yarımqeçirici lövhələrin kristallara skrayblama üsulu ilə kəsilməsi</i>	40
2.2.3. <i>Lövhələrin kristallara birbaşa kəsilməsi və profiləşdirilməsi üsulları</i>	46
§ 2.3. Kəsilmiş lövhələrin cilalanması və hamarlanması	52
2.3.1. <i>Abraziv materiallar</i>	52
2.3.2. <i>Cilalama və hamarlama</i>	54
§ 2.4. Mexaniki işlənmədən sonra lövhə və kristalların keyfiyyətinə nəzarət üsulları	57

F ə s i l 3. Materialların səthinin kimyəvi və elektrokimyəvi işlənməsi	61
§ 3.1. Kimyəvi aşındırma prosesinin kinetikasi	62
§ 3.2. Aşındırma mexanizmləri	68
3.2.1. Aşındırmanın kimyəvi mexanizmi	68
3.2.2. Aşındırmanın elektrokimyəvi mexanizmi	69
§ 3.3. Aşındırıcılar, onların tərkibi və tətbiq xüsusiyyətləri	72
3.3.1. Germanium üçün aşındırıcılar	73
3.3.2. Silisium üçün aşındırıcılar	76
3.3.3. Qalium arsenid üçün aşındırıcılar	78
§ 3.4. Yarımqəçirici lövhə və kristalların mayeli aşındırılması	79
§ 3.5. Səthin elektrokimyəvi aşındırılması	80
§ 3.6. Buxar-qazlı aşındırma	83
§ 3.7. İon-plazmalı aşındırma	84
3.7.1. İonlu aşındırma	85
3.7.2. İon-kimyəvi aşındırma	86
3.7.3. Plazma-kimyəvi aşındırma	86
§ 3.8. Səthin təmizlənməsi üsulları	89
F ə s i l 4. Bərk cisim elektronikasi cihazlarının texnologiyasında fotolitoqrafiya prosesləri	95
§ 4.1. Fotorezistlərdə proseslər	95
§ 4.2. Fotoşablonlar	100
§ 4.3. Kontakt fotolitoqrafiyasının texnologiyası	102
§ 4.4. Bərk cisim elektronikasi cihazlarının istehsalında təsvirin keyfiyyətinin yüksəldilməsi üsulları	106
F ə s i l 5. Bərk cisim elektronikasi cihazlarının və integral mikrosxemlərin texnologiyasında epitaksiya prosesləri	111
§ 5.1. Epitaksiya proseslərinin təsnifatı	111
§ 5.2. Epitaksiya proseslərinin kinetikasi və mexanizmləri	113
§ 5.3. Avtoepitaksiya və heteroepitaksiya	118

5.3.1. Silisiunun avtoepitaksiyası	118
5.3.2. Silisiunun heteroepitaksiyası	121
§ 5.4. Epitaksial təbəqələrin defektləri	122
§ 5.5. Epitaksial təbəqələrin parametrlərinə nəzarət üsulları	124
F ə s i l 6. Elektron-deşik keçidinin diffuziya üsulu ilə alınması	126
§ 6.1. Bərk cisimlərdə diffuziya prosesinin mexanizmləri	126
§ 6.2. Diffuziya prosesində aşqarların paylanması	129
§ 6.3. Diffuziya prosesinin həyata keçirilməsi üsulları	132
§ 6.4. Diffuzion təbəqələrdə aşqarların paylanmasının anomaliyaları və defektlər	134
6.4.1. Aşqarların paylanmasında anomaliyalar	134
6.4.2. Makrodefektlərin yaranması	136
§ 6.5. Diffuzion təbəqələrin parametrlərinə nəzarət üsulları	138
F ə s i l 7. İon aşqarlanması üsulu ilə elektron-deşik keçidinin alınması	141
§ 7.1. İon aşqarlanması üçün avadanlıq	142
§ 7.2. İon aşqarlanması üsulunun fiziki əsasları	144
§ 7.3. Amorf bərk cisimlərdə və monokristallarda daxil edilmiş (yeridilmiş) ionların qaçışı və paylanma profili	145
§ 7.4. Radiasiya defektlərinin yaranma mexanizmləri və tipləri	150
7.4.1. Radiasiya defektlərinin yaranma mexanizmi	150
7.4.2. Radiasiya defektlərinin xarakteristikaları	151
§ 7.5. Aşqar atomlarının aktivləşdirilməsi	152
§ 7.6. Yarımkəçirici birləşmələrin ion aşqarlanmasının xüsusiyyətləri	153
§ 7.7. İon aşqarlanmasının yarımkəçiricilərdə aşqarların diffuziyası ilə birgə tətbiqi	155

F ə s i l 8. Omik kontaktlar və kontakt sistemləri	157
§ 8.1. Kontakt materiaları və kontakt sistemlərinin növləri	158
§ 8.2. Omik kontaktların və kontakt sistemlərinin yaradılması üsulları	161
8.2.1. Əridib yapışdırma üslu	161
8.2.2. Elektrokimyəvi və ya kimyəvi çökdürmə	162
8.2.3. Vakuumda çökilmə	163
8.2.4. Termokompressiya və ultrasəs vasitəsilə kontakt yaradılması	167
F ə s i l 9. Bərk cisim elektronikas cihazlarının səthinin stabilləşdirilməsi və mühafizəsi	170
§ 9.1. Bərk cisim cihazlarının səthinin stabilləşdirilməsi	170
§ 9.2. Səthin üzvi örtüklərlə mühafizəsi	174
§ 9.3. Səthin çökdürülmüş silisium dioksid təbəqələri ilə mühafizəsi	176
§ 9.4. Silisium nitrid və alüminium oksid örtükləri, kombine edilmiş örtüklər	178
§ 9.5. Asan əriyən şüşədən hazırlanan örtüklər	182
F ə s i l 10. Bərk cisim elektronikas cihazlarının korpusları	183
§ 10.1. Korpusların təyinatı və tipləri	183
§ 10.2. Metalla şüşənin birləşməsi	184
§ 10.3. Diodlar üçün korpuslar	188
§ 10.4. Tranzistorlar üçün korpuslar	192
§ 10.5. Cihazların mikromodul konstruksiyaları üçün korpuslar	195
§ 10.6. Korpusuz hermetikləşdirmə	197
§ 10.7. Plastik korpuslar	199
§ 10.8. Bərk cisim elektronikas cihazlarının korpuslarının hermetikliyinə nəzarət	201
Ədəbiyyat	207

GİRİŞ

Müasir elm və texnikanın inkişafı elektronikanın, və xüsusilə də onun aparıcı sahəsi olan bərk cisim elektronikasının inkişafı ilə sıx sürətdə bağlıdır. İstehsal olunan cihazların keyfiyyətinin yüksəldilməsi, çeşidinin artırılması, müasir tələblərə cavab verən yeni cihazların hazırlanması istehsalın texniki, texnoloji və təşkilati səviyyəsinin yüksəldilməsi ilə birbaşa bağlıdır.

Texnologiya - fiziki ideyaların reallığa çevrilməsi vasitəsi olaraq, hər biri ayrılıqda müstəqil elmi və texniki problem olan mürəkkəb proseslərin məcmusundan ibarətdir. Hal-hazırda tam əminliklə demək olar ki, texnologiya, və o cümlədən bərk cisim texnologiyası fizika, kimya, fiziki kimya, kvant fizikası, kvant kimyası və s. elm sahələrinin nailiyyətlərinin üzərində qurulan kompleks tipli elmi-texniki fəndir.

Müxtəlif bərk cisim elektronikasısı cihazlarının hazırlanması üsulları bir-birindən kifayət qədər fərqlənir. Lakin eyni zamanda, bununla yanaşı elə əsas ümumi texnoloji əməliyyatlar vardır ki, onlardan müxtəlif tip cihazların hazırlanmasında istifadə olunur. Bu əməliyyatların ardıcılığı *texnoloji marşrutu* təşkil edir.

Tipik texnoloji marşruta daxil olan belə ümumi əməliyyatlara başlanğıc materiallara giriş nəzarəti, materialların səthinin mexaniki, mexaniki-kimyəvi, fiziki, kimyəvi, elektrokimyəvi və fotokimyəvi üsullarla işlənməsi, elektron-deşik strukturlarının epitaksiya, diffuziya, ion implantasiyası üsulu ilə formalaşdırılması, omik kontaktların yaradılması, bərk cisim elektronikasısı cihazlarının səthinin mühafizəsi və parametrlərinin stabiləşdirilməsi, cihazların korpusa yerləşdirilməsi aiddir.

Texnoloji əməliyyatların səciyyəvi xüsusiyyətlərini qısaca olaraq nəzərdən keçirək.

1. İstənilən cihazın hazırlanmasının texnoloji prosesi istifadə olunan yarımkeçirici və digər materiallara *giriş nəzarətindən* başlanır. Materialların külçələri üçün elektrik keçiriciliyinin tipi, xüsusi müqavimətin qiyməti və paylanma xarakteri, yükdaşıyıcıların diffuziya uzunluğu və ya yaşama müddəti, dislokasiyaların sıxlığı müəyyən olunur.

2. *Mexaniki işlənmə* zamanı lazımi həndəsi ölçülərə, kristalloqrafik yönəlməyə (orientasiyaya) və tələb olunan səth təmizliyinə malik lövhələr alınır. Bu lövhələr sonradan cihazların hazırlanması üçün işçi material kimi və ya üzərinə epitaksial təbəqə çəkiləcək altlıq kimi istifadə oluna bilər.

3. *Kimyəvi işlənmə* mexaniki işlənmədən sonra yaranan mexaniki pozulmuş material qatını kənarlaşdırmaq və səthi təmizləmək məqsədilə aparılır. Bəzi hallarda kimyəvi və elektrokimyəvi işlənmə lövhənin səthini profiləşdirmək üçün, yəni onun üzərində müəyyən həndəsi ölçülərə malik girinti və çıxıntılar şəklində relyef almaq üçün aparılır. Kimyəvi işlənmənin bütün əməliyyatlarına istər aparıldığı müddət ərzində, istərsə də işlənmə başa çatdıqdan sonra ciddi nəzarət edilməlidir.

4. *Epitaksiya*. İstehsal olunan yarımkeçirici cihazların və inteqral mikrosxemlərin (İMS) əksəriyyəti epitaksial təbəqələrin əsasında yaradılır. Bu halda altlıq çox vaxt ancaq mexaniki daşıyıcı rolunu oynayır, cihazın və ya mikrosxemin strukturu isə 3÷20 mkm qalınlığa malik bir təbəqədə yaradılır. Çox vaxt epitaksiya prosesindən sonra epitaksiya təbəqəsinin üzərini oksid qatı ilə örtürlər.

5. Əgər oksid qatı bilavasitə epitaksiya prosesindən sonra alınmayıbsa, onda texnoloji prosesin növbəti əməliyyatı olan *maskalayıcı örtüyün alınması* həyata keçirilir. Bu əməliyyatdan əsas məqsəd yarımkeçiricinin səthini sonrakı aşqar-

lanma mərhələlərində lazım olmayan yerlərdə aşqarların daxil olmasından qorumaqdır. Eyni zamanda, çəkilən oksid təbəqəsi ayrılma sərhəddinin elektrik xassələrini stabilləşdirir və cihaz və ya mikrosxem işləyərkən onu xarici amillərin təsirindən qoruyur.

6. Maskalayıcı örtüyün *fotolitoqrafik işlənməsi* örtük qatında müəyyən həndəsi ölçülərə malik pəncərələr açmağa imkan verir ki, bu pəncərələrdən sonradan aşqarlar daxil edilir.

Əməliyyatın mahiyyəti aşağıdakından ibarətdir: əvvəlcədən kimyəvi işlənməyə məruz qalmış oksidin və ya digər qoruyucu materialın üzərinə fotorezist qatı çəkilir və bu qat üzərində identik təkrar olunan lazımi ölçü və konfigurasiyalı şəkillərin məcmusundan ibarət olan fotoşablon yerləşdirilərək işıqlandırılır (ekspozisiya olunur). Fotorezistin tipindən asılı olaraq alınan təsvir *pozitiv* və ya *neqativ* ola bilər. Gizli təsvir kimyəvi yolla aşqarlanır. Sonra pəncərələrdəki oksidi florid turşusu vasitəsilə həll edir və bundan sonra rezistiv maskanın qalıqlarını tərkibində oksigen olan plazmada yandırmaqla kənarlaşdırırlar.

Fotolitoqrafiya texnoloji prosesdə xüsusi yer tutur və böyük inteqral sxemlərin istehsalı zamanı 12-15 dəfə təkrar oluna bilər.

7. Prosesin sonrakı əməliyyatı *legirəedici aşqarın diffuziyası* əməliyyatıdır ki, onun vasitəsilə aktiv *p-n*-keçidlər, İMS-lərdə izoləedici sahələr (ayırıcı diffuziya), diffuzion rezistorlar, idarəolunan kondensatorlar və s. yaradılır.

Diffuziya prosesi yüksək temperaturlarda (1500-1600 K) uzun müddət ərzində (0,5 saatdan 10-20 saata qədər) aparılır və bu zaman çox vacibdir ki, lövhələr kənar aşqarlarla çirklənməsin.

Dayaz keçidlər (yerləşmə dərinliyi mikrometrin hissələri olan) almaq üçün və ya dəqiq müəyyən olunmuş miqdarda

aşqar daxil etmək üçün aşqarların *ion implantasiyası* üsulundan istifadə olunur ki, daha sonra bu üsulla alınmış struktur termik işlənmə və ya lazerlə şüalandırma vasitəsilə tablanır (bişirilir).

Diffuziya və ion implantasiyası prosesləri də hazırlanan cihaz və ya mikrosxemin mürəkkəbliyindən asılı olaraq bir neçə dəfə təkrar oluna bilər.

8. Texnoloji tsiklin əsas əməliyyatlarından biri də *kontaktların yaradılmasıdır*. Kontaktlar *p-n*-keçidlərinin çıxışlarının və passiv elementlərin yaradılma oblastlarının üstü oksid qatı ilə örtülmüş lövhə üzərində yaradılır. Buna görə də, hər şeydən əvvəl oksid qatında qabaqcadan yaradılmış güclü legirə olunmuş *n*⁺- və ya *p*⁺-tipli oblastlar üzərində fotolitoqrafiya üsulu ilə pəncərələf açmaq lazımdır. Daha sonra vakuumda uçurdulma üsulu ilə lövhənin bütün səthi metal təbəqə ilə örtülür. İkinci fotolitoqrafiya zamanı artıq metal kənarlaşdırılır və metal yalnız kontakt sahələri və bölüşdürücü (paylaşdırıcı) zolaqlar olan yerlərdə saxlanılır. Bu yolla alınmış kontaktlar kontakt materialının səthə adheziyasını yaxşılaşdırmaq və keçid müqavimətini azaltmaq üçün termik işlənilir.

Eyni qayda ilə inteqral mikrosxemlərin passiv nazik təbəqəli elementlərini (rezistor və kondensatorları) yaratmaq olar. Fərq yalnız onda olur ki, bu halda material birbaşa oksidin səthinə uçurdulur, uçurulan material kimi isə (rezistorlar üçün) xüsusi yüksək müqavimətli xəlitələrdən istifadə olunur.

9. *Yığıma əməliyyatlarına* aşağıdakılar daxildir: lövhənin kristallara kəsilməsi, kristalın lehimləmə və ya ultrasəs qaynaqlaması ilə kristal tutqacında montajı (quraşdırılması), çıxışların kristalın kontakt sahələrinə və korpusun (gövdənin) traverslərinə termokompressiya və ya qaynaqlama üsulu ilə

birleştirilməsi, kristalın kompaund və ya lakla mühafizə olunması, gövdənin hermetikləşdirilməsi.

10. Hazır cihazların elektrik parametrlərinin ölçülməsi və onların sınaqdan çıxarılması: Bu mərhələdə iqlim (klimatik), mexaniki və elektrik təsirlərinin öyrənilməsi nəticəsində texniki şərtlərə uyğun olmayan defektli cihazlar aşkar olunur.

Beləliklə, cihazların hazırlanmasının texnoloji tsikli məntiqi sürətdə bir-biri ilə bağlı olan əməliyyatların müəyyən ardıcılığından ibarətdir. Əməliyyatların ardıcılığı cihazın və ya mikrosxemin tipindən asılı olaraq dəyişə bilər, lakin baş verən fiziki-kimyəvi proseslərin vəhdətinə əsaslanan ümumi qanunauyğunluqlar dəyişməz qalır.

Bu kitabın məqsədi oxucuları bərk cisim elektronikasi cihazları texnologiyasının əsas prinsipləri, istiqamət və sahələri ilə tanış etməkdir.

**BƏRK CİSİM ELEKTRONİKASINDA İSTİFADƏ
OLUNAN MATERIALLAR**

§ 1.1. Materialların təsnifatı

Bərk cisim elektronika (BCE) cihazlarının istehsalında istifadə olunan materiallar *əsas* (və ya *konstruktiv*) və *köməkçi* (və ya *texnoloji*) materiallar olmaqla iki qrupa bölünür.

Əsas material dedikdə birbaşa cihazın konstruksiyasına daxil olan material nəzərdə tutulur.

Əsas materialları, öz növbəsində, aşağıdakı qruplara bölmək olar:

- *yarımkeçirici materiallar* - germanium, silisium, qallium arsenid və s.;
- *legirəedici (aşqarlayıcı) materiallar* – yüksək təmizliyə malik ayrı-ayrı elementlər və ya onların xəlitələri;
- *elektrod materialları* - qızıl, nikel, kövar, molibden (daxili və xarici çıxışları düzəltmək üçün);
- *izolyasiya materialları* - şüşə, keramika, üzvi laklar;
- *mühafizəedici korpus (gövdə) materialları* – mis, kövar, polad;
- *antikorroziya örtüklər* - xrom, nikel.

Materialların sərfiyyat norması 1000 ədəd yararlı cihaz hazırlamaq üçün tələb olunan materialın miqdarı ilə müəyyən olunur.

Yarımkeçirici materialın seçilməsi, onun təmizliyi və legirə olunma dərəcəsi, istehsalatda onların təkrarlanması cihazların xarakteristikalarına və onların istehsalında yararlı cihazların çıxımına həlledici təsir göstərir. Qeyd etmək la-

zımdır ki, yarımkəçiricinin elektrik müqaviməti onun təmizlənməsindən sonra onun tərkibində qalan və ya ona lazımi keçiricilik tipi vermək üçün xüsusi olaraq daxil edilmiş çox az miqdar aşqarlarla müəyyən olunur. Buna görə də, yarımkəçirici metallurgiyanın fərqli xüsusiyyətlərindən biri kimyəvi və spektral təhlil (analiz) üsullarının həssaslığından qat-qat yüksək təmizliyə malik olan maddələrdən istifadə olunmasıdır.

§ 1.2. Yarımkəçirici materiallara qoyulan tələblər

Müxtəlif yarımkəçirici cihazlar üçün müxtəlif xassələrə və keyfiyyətlərə malik materiallar lazımdır. Hal-hazırda ən ciddi tələblər tranzistorlar və inteqral mikrosxemlərin istehsalında irəli sürülür. Onların normal işləməsi üçün yarımkəçirici materiallar aşağıdakı tələblərə cavab verməlidir:

- monokristallik quruluş mükəmməl olmalıdır;
- yaxşı nəzərə çarpan donor və ya akseptor xassələrinə malik olmalıdır;
- qeyri-əsas yükdaşıyıcıların yaşama müddəti kifayət qədər böyük olmalıdır;
- tələb olunan xüsusi müqavimət əvvəlcədən təmizlənmiş başlanğıc materialına müəyyən aşqarların vurulması ilə alınmalıdır;
- qadağan olunmuş zolağın eni verilən temperatur diapazonunda cihazların stabil işini təmin etməlidir;
- yarımkəçiriciyə vurulman aşqarlar cihazın minimal işçi temperaturunda artıq tamamilə ionlaşmış olmalıdır;
- istilikkeçirmə əmsalı istiliyin kristalın daxili hissələrindən kənara aparılmasını təmin etməlidir;
- materialın alınma texnologiyası onun kütləvi istehsalı imkanını təmin etməlidir.

Yarımkəçirici materiallardan bu tələblərə germanium,

silisium və qallium arsenid cavab verdiyindən, onlar tranzistor və bərk cisimli sxemlərin istehsalında geniş tətbiq olunur.

§ 1.3. Bərk cisim elektronika cihazlarının istehsalında istifadə olunan əsas yarımkeçirici materiallar

Bərk cisim elektronika cihazlarının hazırlanmasında son zamanlara qədər ən çox işlənən yarımkeçirici materiallar germanium (Ge) və silisium (Si) olmuşdur. Lakin son illər qallium və indiumun arsenidləri, antimonidləri və fosfidləri daha geniş tətbiq olunmağa başlamışdır. Bu materialların içərisində elektron texnikası üçün, o cümlədən bərk cisim elektronika cihazlarının hazırlanması üçün ən perspektivli material qallium arseniddir (GaAs). Bu, bir tərəfdən onunla bağlıdır ki, germanium və silisiumun inteqral elektronikada istifadə imkanı get-gedə azalır, çünki elektron cihazlarının daha da miniatürləşdirilməsi bərk cisimlərdə cümlə effektləri ilə bağlı prinsipial məhdudiyyətlərlə qarşılaşır. Digər tərəfdən isə qallium arseniddə (GaAs) yükdaşıyıcıların yürüklüyünün böyük olması onun əsasında ifrat yüksək sürətlə işləyə bilən inteqral sxemlər, optoelektron qurğular, müxtəlif ifrat yüksək tezlik cihazları, yarımkeçirici lazerlər və s. yaratmağa imkan verir. Onu da qeyd etmək vacibdir ki, əgər germaniumdan hazırlanan tranzistorlar üçün maksimal işçi temperatur $+50 \div +70$ °C, silisiumdan hazırlanan tranzistorlar üçün $+85 \div +130$ °C -dirsə, GaAs əsasında hazırlanan tranzistorlar $+250$ °C -yə qədər temperaturalarda işləyə bilər.

Beləliklə, silisiumdan qallium arsenidə və yuxarıda sadalanan $A^{III}B^V$ birləşmələrinə keçid bu materiallarda yükdaşıyıcıların daha böyük yürüklüyə malik olması səbəbindən inteqral mikrosxemlərin işləmə sürətini artırmağa imkan yarada bilər. İnteqral mikrosxemlərin silisium üçün mümkün olan ən böyük işləmə sürəti əldə edildikdən sonra onun yerini GaAs tutacaq. Bu materialın əsasında artıq idarəedici keçidli və hetero-

keçidli sahə tranzistorları, yük rabitəli və s. cihazlar yaradılmışdır. GaAs əsasında yaradılan işıq enerjisi çeviricilərinin faydalı iş əmsalı Si əsasında yaradılan cihazlarınkindən yüksəkdir. Bundan başqa, GaAs yüksək temperaturlarda iş qabiliyyətini itirmir, radiasiyaya qarşı daha davamlıdır. Buna görə də GaAs əsasınca günəş batareyalarından kosmosda istifadə edilməsinin böyük perspektivləri vardır. Bütün bunlar onu deməyə imkan verir ki, Ge və Si XX əsrin əsas yarımkəçirici materialı olduğu kimi, GaAs də XXI əsrin aparıcı materialı olacaqdır.

Germanium, silisium və qallium arsenidin əsas fiziki-mexaniki xassələri aşağıdakı Cədvəl 1.1-də verilmişdir.

Cədvəl 1.1

Yarımkəçirici materialların fiziki-mexaniki xassələri

Xassə	Ge	Si	GaAs
Atom (molekul) kütləsi	72,6	28,09	144,63
Sıxlıq, kq/m ³	5,33· 10 ³	2,33· 10 ³	5,32· 10 ³
Moosa görə bərklik	6	7	4,5
Xrupa görə bərklik, N/m ²	(7,0-8,6)·10 ⁹	(9,5-11,5)·10 ⁹	(7,0-8,6)·10 ⁹
Kövrəklik meyarı	4,4	2,0	3,0
(111) müstəvisində Yunq modulu, N/m ²	13,7· 10 ¹⁰	16,9· 10 ¹⁰	1,13· 10 ¹⁰
(111) müstəvisində Puasson əmsalı	0,252	0,262	0,336
Ərimə temperaturu, °C	936	1420	1238
İstilikkeçirmə əmsalı, Vt/m·K	60	125	52
Xüsusi istilik tutumu, C/kq·K	310	750	300
İstidən xətti genişlənmə əmsalı, 1/K	5,75·10 ⁻⁶	2,33·10 ⁻⁶	5,74·10 ⁻⁶

1.3.1. Germanium

Germanium (Ge) 1886-cı ildə alınan kimyaçısı Vinkler tərəfindən kəşf olunmuşdur. Germanium yer qabığında ən az yayılmış elementdir (0,001%). Germanium əsas etibarilə daş və boz kömürün külündən və sink istehsalının tullantılarından alınır.

Germanium elementlərin dövri sisteminin IV qrupuna aiddir. Xarici elektron örtüyü həyəcanlanmamış halda $4s^24p^2$ quruluşuna malikdir, yəni neytral kriptonun örtüyünə qədər dolmaq üçün 4 elektronu çatışdırır. Kristal qəfəsi almaztiplidir. Hər bir atom düzgün tetraedrin təpələrində yerləşən digər dörd atomla kovalent rabitə ilə bağlıdır. Bütün bu quruluş kubun içərisinə cızılır. Germaniumun atom kütləsi 72,6, ərimə temperaturu 937°C , otaq temperaturunda sıxlığı $5,35 \cdot 10^3 \text{ kq/m}^3$ -dir. Qadağan olunmuş zolağının eni 300 K-də 0,85 eV-a bərabərdir.

Bərk halda germanium gümüşü rəngli, çox kövrək kristallik materialdır. Xlorid və duruldulmuş sulfat turşusu germaniuma təsir etmir, qatı sulfat turşusu təsir etdikdə germanium ikioksiddə çevrilir. Qələvilərdə yavaş-yavaş həll olur. $200\text{-}250^\circ\text{C}$ temperaturda germanium halogenlər və kükürdlə fəal surətdə reaksiyaya girir.

Stibium, arsen, qallium və qızıl ilə aşqarlanmış müxtəlif markalı monokristallik germanium nümunələrinin xüsusi müqaviməti 0,0004-lə 45 Om·sm arasında olur.

Rusiya istehsalı olan germanium materialları aşağıdakı kimi işarələnir: birinci hərf "Г" - germanium; ikinci hərf "Э" və ya "Д" - müvafiq olaraq elektron və ya dəşik keçiriciliyi; bir və ya bir neçə hərf - legirəddici elementlərin adının baş hərfi; ədədi kəsir - surətdə nominal xüsusi müqavimət, Om·sm, məxrəcdə - diffuziya uzunluğu və hansı qrupa daxil olmasını göstərir. Məsələn, ГДГ 0,75/0,5 lac markası belə

açıqları: deşik keçiriciliyinə malik germanium, qallium ilə aşqarlanıb, xüsusi müqaviməti 0,75 Om-sm, diffuziya uzunluğu 0,5 mm-dən az deyil, 1 ac qrupuna aiddir.

Monokristallik külçələr Çoxralski üsulu ilə göyerdilir və bu zaman maya kristalcığı [111] istiqamətində oxdan kənara çıxma $\pm 2^\circ$ -dən çox olmamaqla istiqamətləndirilir. Xüsusi sifarişlə [110] və [100] istiqamətlərində yönəldilmiş (istiqamətləndirilmiş) germanium monokristallarının da hazırlanması mümkündür.

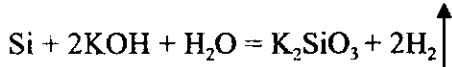
1.3.2. Silisium

Silisium (Si) elementlərin dövri sisteminin IV qrup elementidir. Oksigendən sonra təbiətdə ən çox yayılan elementdir: yer qabığında onun miqdarı 26% (kütləyə görə) təşkil edir. Sərbəst halda təbiətdə rast gəlinmir. Təbiətdə yalnız birləşmələr şəklində tapılır ki, bunlardan ən çox yayılan silisium ikioksiddir (SiO_2).

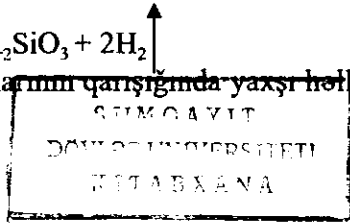
Təmiz SiO_2 -ni maqneziumla birgə gözərtməklə amorf şəkildə sərbəst silisium almaq mümkündür.

Silisium da germanium kimi almaz tipli kristallik qəfəsdə kristallaşır. Kristallik silisium metallik parlıltıya malik tünd boz rəngli, bərk və kövrək maddədir, kimyəvi cəhətdən kifayət qəcər ətalətlidir. Atom kütləsi 28,08, otaq temperaturunda sıxlığı $2,32 \cdot 10^3 \text{ kq/m}^3$ -dir. Qadağan olunmuş zolağının eni 300 K-də 1,10 eV-a bərabərdir.

Turşular silisiuma təsir etmir, qələvilər isə silisiumla güclü surətdə reaksiyaya girir, bu zaman hidrogen çıxır və silikat turşusunun duzları yaranır:



Silisium flüorid və azot turşularının qarışığında yaxşı həl olur.



Müxtəlif markalı silisium monokristallarının xüsusi müqaviməti 0,005-lə 250 Om-sm arasında olur.

Rusiya istehsalı olan silisium materialları aşağıdakı kəmi işarələnil: birinci hərf "K" - silisium; ikinci hərf "Э" və ya "Д" - müvafiq olaraq elektron və ya deşik keçiriciliyi; üçüncü və dördüncü hərlər - ligerəedici elementlərin adının baş hərfi; ədədi kəsir - surətdə nominal xüsusi müqavimət, Om-sm, məxrəcdə qeyri-əsas yükdaşıyıcıların diffuziya uzunluğunu və ya onların yaşama müddətini göstərir. Məsələn, КЭФ 7,5/0,1 markası belə açıqlanır: elektron keçiriciliyə malik silisium, fosforla aşqarlanıb, xüsusi müqaviməti 7,5 Om-sm, diffuziya uzunluğu 0,1 mm-dən az deyil.

Silisium monokristalları göyərdilən zaman maya kristalçıq [111] istiqamətində oxdan kənara çıxma $\pm 2^\circ$ -dən çox olmamaqla istiqamətləndirilir. Xüsusi sifarişlə [110] və [100] istiqamətlərində yönəldilmiş (istiqamətləndirilmiş) silisium monokristallarının da hazırlanması mümkündür.

1.3.3. Qallium arsenid

Qallium arsenid (GaAs) $A^{III} B^V$ tipli perspektiv materiallardan biridir. Qadağan olunmuş zolağının eni (1,45 eV) germanium və silisiumundakına nəzərən daha böyükdür. Qallium arsenidin üstün cəhətlərindən biri də elektron və deşiklərin yürüklüyünün böyük olmasıdır.

GaAs kvarts ampullarda təmiz arsen və qalliumun birgə əridilməsi yolu ilə alınır. Kristal öz-özünə yaranan rüşeym üzərində böyüyür. Molekulyar kütləsi 164,63, ərimə temperaturu normal şəraitdə 1237 $^\circ\text{C}$ -dir. GaAs sfalerit strukturunda kristallaşır və sıxlığı $5,4 \cdot 10^3 \text{ kq/m}^3$ -dir. Qadağan olunmuş zolağının eni 300 K-də 1,45 eV-a bərabərdir.

Aşqarlanmamış GaAs elektron tipli keçiriciliyə malikdir, yükdaşıyıcıların konsentrasiyası $5 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$, yürüklüyü isə $8000 \text{ sm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ -dir. Qallium arsenidi sinklə aşqarladıqda deşik tipli GaAs yaranır ki, onda yükdaşıyıcıların konsentrasiyası $10^{17} - 10^{20} \text{ sm}^{-3}$, deşiklərin yürüklüyü isə $200 \text{ sm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ olur. Yüksək müqavimətli GaAs ($10^4 \div 10^9 \text{ Om} \cdot \text{sm}$) almaq üçün qallium arsenidin ərintisini dəmir və ya xromla 10^{17} sm^{-3} konsentrasiyasına qədər legirə edirlər.

Rusiya istehsalı qallium arsenid materialları belə işarələnilir: АГЭ, АГЭТ, АГДЦ və АГП. “АГ “ - qallium arsenid; “Э “ və “Д “ - elektron və ya deşik tipli keçiricilik; “Т “ və “Ц “ - aşqar materialı tellur və ya sinkdir; П - yarımizoləedici. Daha sonra iki rəqəm əlavə edilir ki, bunlardan birincisi əsas yükdaşıyıcıların nominal konsentrasiyasını göstərir, ikincisi isə əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının onluq tərtibinin üstünü (dərəcəsinə) göstərir. Məsələn, АГДЦ 6-19.

GaAs monokristalları 12 mm diametrlili külcələr şəklində Çoxralski üsulu və ya istiqamətlənmiş kristallaşma üsulu ilə alınır.

§ 1.4. Xəlitələr və onların hazırlanması üsulları

1.4.1. Xəlitələr

Təcrübə göstərir ki, heç bir təmiz elementdən kontakt materialı kimi istifadə etmək mümkün deyil. Çünki onlardan bəziləri germanium və silisiumda pis həll olur, digərləri yarımkeçirici ilə əriyib yapışmır, qeyri-hamar əriyib yapışma cəbhəsi verir və ya yarımkeçiricinin cəthinin pis isladır. Bu səbəbdən hal-hazırda kontakt materialı kimi *xəlitələrdən* istifadə olunur. İstifadə olunan xəlitələri aşağıdakı əsas qruplara bölmək olar: 1) əritmə üsulu ilə *p-n*-keçidi yaratmaq üçün

yarımkeçiriciyə əridələrək yapışdırılmaq üçün nəzərdə tutulan; 2) omik kontaktlar almaq üçün işlədilən; 3) ayrı-ayrı aşqarların diffuziyasını həyata keçirmək üçün istifadə edilən; 4) cihazın ayrı-ayrı detallarını birləşdirmək üçün nəzərdə tutulan xəlitələr.

Germanium cihazlarının istehsalında *p-n keçidlərini almaq üçün* əsasən aşağıdakı xəlitələrdən istifadə olunur:

1. In + (1÷2%) Ga

Qallium xəlitənin akseptor xassələrini gücləndirmək üçün əlavə olunur.

2. In + 1% Zn

Sink qalliumu əvəz etmək üçün götürülür, çünki bəzi hallarda qalliumdan istifadə etdikdə xəlitənin qocalması müşahidə olunur.

3. In + 35 Au + 1% Ga

Qızılın əlavə edilməsi germaniuma əriyib yapışmanın cəbhəsini yaxşılaşdırır.

4. Pb + 3% Au + 1% Ga

5. In + (1÷5%)Sb + 3% Au + 1% Ga

Xəlitədə stibiumun olması xəlitəni nazik *n*-tip germanium qatına əridib yapışdıranda onun diffuziyasına gətirir və onun əriməsinin qarşısını alır. Tam tərkibdə ərinti akseptor xassələrinə malikdir.

6. Pb + (1÷4%) As

7. Pb + (1÷4%) Sb

8. Sn + (1÷4%) Sb

Bu xəlitələrdən *p*-tip germaniumun üzərində yenidən kristallaşmış (rekristalizə olunmuş) *n*-tip oblast yaratmaq

üçün istifadə olunur. Qurğuşun əsasında yaradılan xəlitələr yüksək ərimə temperaturuna malik olsalar da, daha asan və bir bərabərdə deformasiya olunur. Qalay daha alçaq ərimə temperaturu xəlitələr versə də, onlar pis və qeyri-bərabər deformasiya olunur.

9. $Pb + 5\% Bi + 3\% Sb + 3\% Ga$

Akseptor tipli xəlitədir. Ona bismutun əlavə edilməsi onun ərimə temperaturunu $210^{\circ}C$ -yə qədər endirir.

Germanium üçün əsas (baza) xəlitə aşağıdakıdır:

10. $In + 40\% Sn$

İndiuma qalayın əlavə olunması ərimə temperaturunu $117^{\circ}C$ -yə qədər azaldır. Bu imkan verir ki, başqa xəlitələrin köməyi ilə elektron-deşik keçidi yaradıldıqdan sonra omik kontakt yaradılsın.

11. $Pb + 10\% Sn$

12. $Sn + 5\% Sb$

13. $Pb + 5\% Sb$

14. $Pb + 30\% Sn + 5\% Sb$

Qurğuşun germaniumun səthini pis isladır. Qalayın əlavə olunması islatmanı yaxşılaşdırır, çünki qalay germaniumun maye ərintidə həll olmasını artırır, xüsusilə də çox da yüksək olmayan temperaturlarda.

Bir sıra hallarda xəlitənin germanium və ya silisiumun səthinə əriyib yapışma cəhəsinin xarakterini yaxşılaşdırmaq üçün xəlitənin tərkibinə bir neçə faiz miqdarında yarımkeçirici materialın özünü əlavə edirlər. Bu halda xəlitənin əriyib yapışması daha yüksək temperaturda başlayır.

Silisium üçün kontakt xəlitələrinin seçimi daha məhduddur. Xəlitələr üçün əsas kimi ancaq qalay və qızıldan isti-

fadə olunur. Keçidlər almaq üçün təmiz alüminiumdan başqa kontakt xəlitələri kimi aşağıdakı tərkiblərdən istifadə olunur:

1. Au + 1% Ga
2. Sn + 0,2% P
3. Sn + 5% As + 0,5 Ga.

Sonuncu xəlitə donor xassələrinə malikdir. Əlavə edilən qallium arsenə nisbətən daha sürətlə diffuziya etdiyindən p -tipli nazik silisiumun təbəqələrin əriməsinin qarşısı alınır.

Au + 1% Ga xəlitəsindən başqa, baza xəlitələri aşağıdakılar ola bilər:

1. Au + 1% Sb
2. Sn + 1% Ni + 1% Sb

Nikelin əlavə olunması silisiumun səthinin isladılmasını yaxşılaşdırır, çünki bu zaman $NiSi$; Ni_2Si ; Ni_3Si tipli silisidlər əmələ gəlir. Bu birləşmələr səthdə yayılır və islatmanı yaxşılaşdırır.

1.4.2. Xəlitələrin hazırlanma üsulları

Xəlitələr *birfazlı* və *çoxfazlı* ola bilər. Bu zaman xəlitənin legirəedici komponentləri əsasən ya bərk məhlula daxil ola, ya müstəqil faza şəklində ayrılı, ya da kimyəvi birləşmənin tərkibinə daxil ola bilər. Ən yaxşı hal odur ki, legirəedici əlavə bərk məhlula daxil olsun.

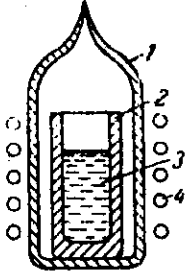
Xəlitənin bircinsliyini yaxşılaşdırmaq üçün aşağıdakı üsullardan istifadə olunur: 1) mexaniki qarışdırma, xüsusilə də ultrasəsli; 2) yüksək temperatura qədər qızdırma; 3) tez (sürətlə) soyudulma.

Xəlitənin və ondan əridilib yapışdırılma üçün işçi materialın hazırlanmasına aşağıdakı əməliyyatlar daxildir: 1) şixta-

nin hazırlanması; 2) xəlitenin hazırlanması; 3) külçələrin hazırlanması; 4) təzyiqlə işlənmə; 5) işçi materialların kəsilməsi.

Xəlitenin özünün hazırlanması zamanı aşağıdakıları nəzərə almaq lazımdır: 1) ayrı-ayrı komponentlərin, məsələn, arsenin zəhərli və uçucu olmasını; 2) oksidləşmənin mümkünlüyünü; 3) komponentlərin putanın materialı ilə reaksiyaya girə bilməsini; 4) tez (sürətlə) soyudulmanın zəruriliyini.

Zəhərli və ya uçucu komponentləri olan xəlitaləri ağzı əridilib yapışdırılaraq bağlanmış kvars ampullarda hazırlayırlar. Qızdırılmanı ya müqavimət sobasında, ya da yüksək tezlikli (450 kHs) cərəyan vasitəsilə aparırlar. Yüksək tezlikli qızdırılma xəlitenin daha yaxşı qarışdırılmasını təmin edir. Ampulu soyuq suya batırmaqla soyudurlar. Daha yaxşı olar ki, xəlité su ilə soyudulan polad qəlibə tökülsün; bu zaman xırda (narın) dispersli struktur alınır.

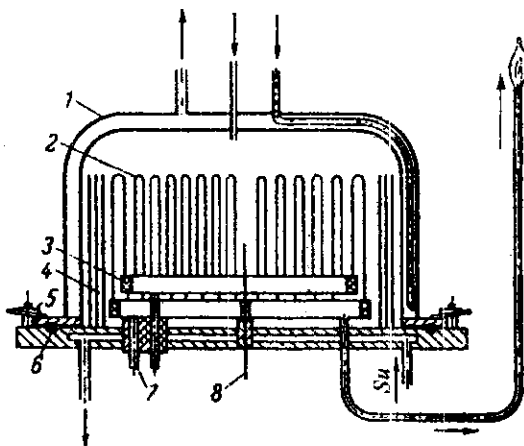


Şek. 1.1. Qızılı əritmək üçün puta və ampul:
1 - kvars ampul; 2 - qrafit puta; 3 - qızıl; 4 - yüksək tezlikli induktor

Qızıl əsasında xəlitalərin alınmasının müəyyən xüsusiyyətləri var. Qızıl kvars ampulun divarlarına yapışdığından, onu qrafitdən düzəldilmiş putalarda əridirlər, putanın isə ağzı əridilib yapışdırılmaqla bağlanan kvars ampulun içərisinə yerləşdirirlər (şəkil 1.1)

Uçucu olmayan, lakin tərkibində havada oksidləşən komponentlər olan xəlitaləri hidrogen sobasında əridirlər. Belə sobanın sxemi şəkil 1.2-də göstərilmişdir. Bu üsulun

çatışmayan cəhəti ondan ibarətdir ki, alınan xəlitəni tez soyutmaq mümkün olur. Xəlitənin oksidləşməsinin qarşısını almaq üçün onu soba ilə birlikdə soyutmaq lazım gəlir, bu isə xəlitənin bircinsliliyini pisləşdirir.



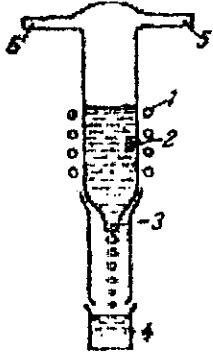
Şək. 1.2. Hidrogen sobası:

1 - qalpaq; 2 - qızdırıcı; 3 - həlqəvi cərəyan qoşucuları; 4 - ekran;
5 - sıxac; 6 - kipləşdirici; 7 - cərəyan qoşucusu; 8 - termocüt

Bircinsliliyi yaxşılaşdırmaq üçün xəlitənin homogenləşdirilməsi aparılır: $500 \div 1000$ °C temperatur intervalında 24 saat və ya daha artıq müddət ərzində bişirilir. Alınmış xəlitə sonrakı təyinatından asılı olaraq bu və ya digər formalı polad qəliblərə tökülür.

Cihazların istehsalında işlədilən xəlitələr məftil, lent və ya kürəcik şəklində olur.

Ən çətin əməliyyat kürəciklərin alınmasıdır. 100 mkm-ə qədər diametrlə kürəciklər almaq üçün "fəvvarə" metodundan istifadə olunur. Bu üsul üçün qurğu şəkil 1.3-də göstərilmişdir.



Şek. 1.3. Fəvvarə üsulu ilə kürəciklər hazırlamaq üçün qurğu:
1- induktor; 2 - ərimiş metal; 3 - kapilyar; 4 - soyuducu maye; 5 - arqon buraxmaq üçün deşik; 6 - vakuum sisteminə birləşdirmək üçün deşik

Qabda vakuum yaradılır və metal əridilir. Vakuumba əridilmə onu qazsızlaşdır və oksidləşməkdən qoruyur. Sonra qaba arqon buraxılaraq kapilyardan kürəciklər sıxılıb çıxarılır və onlar soyuducu mayenin (silikon yağının) içərisinə düşür.

Kiçik diametrlı (30 mkm-ə qədər) kürəciklər almaq üçün nazik folqadan lazımı diametrlı disklər kəsilir və sonra onları islatmayan səthdə əridirlər (məsələn, qrafitin səthində). Bu zaman onlar damcı şəklində düşür.

MATERİALLARIN MEXANİKİ İŞLƏNMƏSİ

Bərk cisim elektronikasi cihazlarında istifadə olunan yarımkeçirici materialların əksəriyyəti (germanium, silsiüm, qallium arsenid və qallium fosfid) silindrik monokristallik külçələr şəklində alınır. Məsələn, silisiüm külçələrinin diametri 50 mm, uzunluğu isə 1000 mm-ə qədər ola bilər.

Diskret yarımkeçirici cihazlar və ya İMS hazırlanarkən başlanğıc material kimi monokristallardan disklə kəsilmiş *lövhələrdən* və ya onlardan kəsilib hazırlanmış kvadrat, dairəvi və ya daha mürəkkəb formalı *kristal* adlandırılan detallardan istifadə olunur.

Lövhələrin və kristalların qalınlığı təmiz halda 0,2÷0,7 mm, kristalın sahəsi isə 0,1÷30 mm² ola bilər.

Cihazların istehsalında mexaniki işlənmənin məqsədi lazımı ölçülərə, forma, profilə və səth keyfiyyətinə malik ilkin işçi materialların əldə edilməsidir. Bu problem külçələrin lövhələrə kəsilməsi, lövhələrin cilalanması və hamarlanması, onların səthinin müxtəlif mexaniki, mexanik-ikimyəvi və ya fiziki üsullarla profiləşdirilməsi yolu ilə həll olunur.

Yarımkeçiricilər texnologiyasında lövhələrin və kristalların keyfiyyətinə çox ciddi tələblər qoyulur ki, bunlardan aşağıdakıları qeyd etmək olar:

1. Lövhələrin qalınlığı orta qalınlıq 200 mm olduqda nominaldan ± 3 mkm-dən çox fərqlənməməlidir.

2. Lövhənin kristalloqrafik müstəvisinin yönəldilməsinin dəqiqliyi 30-60' arasında olmalıdır, çünki bundan oksidləşdirmə, diffuziya, aşqarların implantasiyası və s. proseslərin təkrarlanması asılıdır. Bipolyar texnologiyada {111} müstəvisi, metal-dielektrik-yarımkeçirici (MDY) texnologiyasında

isə {100} müstəvisi üzrə kəsilmiş kristallardan istifadə olunur.

3. Lövhələrin müstəvi-paraalleliyi tələbinə görə lövhənin bütün diametri boyu müstəvidən kənara çıxma ± 1 mkm-dən artıq olmamalıdır. Lövhənin diametri 80-100 mm-dən böyük olduqda bu tələbin ödənilməsi ciddi çətinliklərlə üzləşir.

4. Mexaniki pozuntulu qatın minimuma endirilməsi və ya tamamilə olmaması. Bu tələb diffuzion və implantasiya olunmuş *p-n*-keçidlərinin yerləşmə dərinliyinin kiçik olması ilə bağlıdır.

5. Səthin relyefinin dərinliyi $\pm 0,025$ mkm-dən çox olmamalıdır ki, bu da səthin 14-cü sinif təmizliyi tələbindən yüksəkdir.

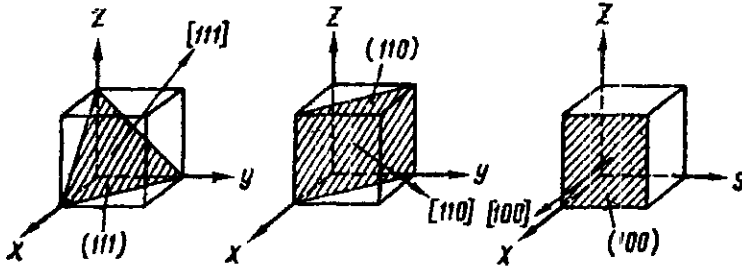
§ 2.1. Monokristalların kristalloqrafik oxlar istiqamətində yönəldilməsi (istiqamətləndirilməsi) üsulları

Külçələr kristallara iki cür kəsilə bilər: *istiqamətləndirilmiş* və *istiqamətləndirilməmiş* şəkildə.

İstiqamətləndirmə əməliyyatının məqsədi külçənin həndəsi oxu ilə verilən *kristalloqrafik istiqamət* arasında uyğunsuzluğu tapmaq, eləcə də külçələrin lövhələrə istiqamətləndirilmiş şəkildə kəsilməsi zamanı istifadə ediləcək düzəlişləri hesablamaq üçün lazımdır.

Məlum olduğu kimi, monokristallik materiallarda fiziki, elektrik və mexaniki xassələr anizotropiyaya malikdir, yəni bu xassələr müxtəlif *kristalloqrafik müstəvilər* və istiqamətlər üzrə fərqlənir. Hər bir müstəvidə müəyyən miqdarda atom yerləşir və onların qablaşması materialın elektrofiziki və mexaniki xassələrinə təsir göstərir.

Kristalloqrafik oxları və onlara perpendikulyar olan kristalloqrafik müstəviləri **Miller indeksləri** ilə işarə edirlər. Oxları göstərmək üçün Miller indekslərini kvadrat mötərizəyə alırlar, məsələn, $[111]$, $[110]$, $[100]$ və s., uyğun müstəviləri göstərmək üçün isə Miller indekslərini kiçik mötərizəyə alırlar, məsələn, (111) , (110) , (100) və s.



Şək. 2.1. Kubik qəfəslə kristallar üçün kristallik müstəvilərin və istiqamətlərin şərti işarələri (*Miller indeksləri*)

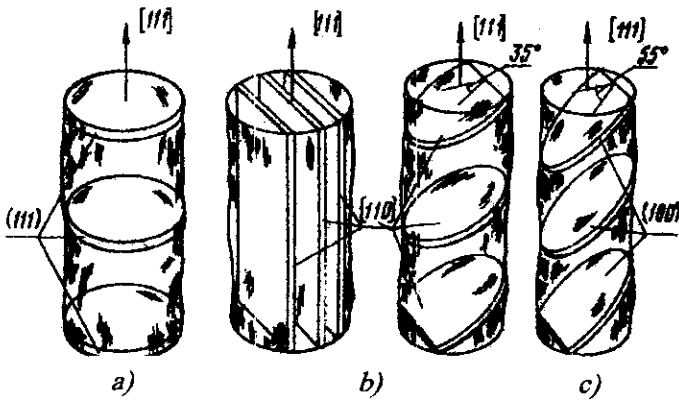
Miller indekslərinin mənşəyi şək. 2.1-də sadə kubik qəfəs üçün göstərilmişdir. Baxılan müstəvinin koordinat oxlarından kəsdiyi parçaları qəfəs sabitinin vahidləri ilə ölçürlər: $x = la$; $y = ma$; $z = na$, burada l , m , n - tam ədədlərdir. Daha sonra ters qiymətləri: l^{-1} ; m^{-1} ; n^{-1} -i ən kiçik ortaq məxrəcə gətirir və məxrəci atırlar; onda surətlər baxılan müstəvi üçün **Miller indekslərini** verir.

Əgər müstəvinin oxla kəsişmə nöqtəsi oxun mənfi istiqamətindədirsə, onda müvafiq indeksin üstünə mənfi işarəsi qoyulur, məsələn, $(1\bar{1}0)$ müstəvisi belə oxunur: bir, mənfi bir, sıfır. Kubik qəfəslə kristallarda (100) , (010) və (001) müstəviləri, eləcə də (110) , (101) və (011) müstəviləri xassələrinə görə fərqlənir, yəni onlar ekvi-

valentdir. Ekvivalent müstəvilər ailəsini işarələmək üçün fiqurlu mötərizədən istifadə olunur, məsələn, (100), (010), (001), ($\bar{1}00$), ($0\bar{1}0$), ($00\bar{1}$) müstəvilər qrupu üçün {100} simvolundan (işarəsindən) istifadə olunur.

Kristalloqrafik istiqamətləri kvadrat mötərizə içərisində indekslərlə göstərilir, məsələn [111]. Ekvivalent istiqamətlərin məcmusunu qırıq mötərizə ilə işarələyirlər, məsələn, $\langle 111 \rangle$. Kubik sistemdə eyniadlı istiqamətlər və müstəvilər qarşılıqlı perpendikulyardır.

Hər bir kristalloqrafik müstəvidə müəyyən sayda atom yerləşir, onların qablaşma sıxlığı monokristalın elektrofiziki və mexaniki xassələrinə təsir edir. Yarımqeçirici əsasında hazırlanan bərk cisim elektronikasısı cihazının təyinatından asılı olaraq müxtəlif kristalloqrafik müstəvilərdə istiqamətlənmiş kristallik lövhələrdən istifadə olunur.



Şək. 2.2. [111] istiqamətində göyərdilmiş külçədən kəsilən müxtəlif kristalloqrafik istiqamətli lövhələrin forması:
a - (111) istiqamətli lövhələr, b - (110) istiqamətli lövhələr,
c - (100) istiqamətli lövhələr

(111) müstəvisində istiqamətləndirilmiş lövhələr, demək olar ki, dairəvi formaya malikdir (şək. 2.2, a). Kristalda müstəvilərin qarşılıqlı yerləşməsinə baxsaq (şək. 2.2, b) görürük ki, {111} müstəvilərindən biri (111) müstəvisinə perpendikulyar olacaq, digəri isə ona nəzərən 35°-li bucaq altında yerləşəcək. Buna görə də, [111] istiqamətində göyərdilmiş külçədən kəsilən {110} istiqamətli lövhələr düzbucaqlı və ya ellips formasında olacaq. {100} müstəviləri (111) müstəvisinə nəzərən təqribən 55°-li bucaq altında yerləşir və {110} istiqamətli lövhələr də həmçinin ellips formasında olacaq (şək. 2.2, c).

Külçələri lövhələrə kəsməkdən qabaq onu istiqamətləndirmək, yəni külçənin uc tərəfinin müstəvisinin verilən kristalloqrafik müstəvidən kənara çıxmasının qiymətini və istiqamətini təyin etmək lazım olur. Bəzən kəsmə, cilalama və ya hamarlamadan sonra da lövhələrin səthinin istiqamətlənməsini yoxlamaq zərurəti meydana çıxır.

Külçələri və lövhələri istiqamətləndirmək üçün iki üsuldən - *rentgenoqrafik (difraktometrik və Laue)* və *optik (ışığıqları)* üsullardan istifadə olunur.

İstiqamətləndirmənin rentgenoqrafik üsulu ona əsaslanır ki, rentgen şüalarının kristal səthində səpilmə intensivliyi hər bir səthdə atomların yerləşməsinin sıxlığından asılıdır. Daha sıx yerləşməyə malik (111) müstəvisindən səpilmə də daha güclü olacaq. Eyni zamanda, hər bir maddə üçün xarakteristik rentgen şüalanması müvafiq kristalloqrafik müstəvidən çox dəqiq müəyyən bir bucaq altında əks olunur. Məsələn, Ge və Si-da xarakteristik şüalanmanın (CuK_α) səpilmə bucağı müxtəlif müstəvilər üçün aşağıdakı qiymətlərə malikdir:

(111) müstəvisi üçün 17° 14' (Ge) və 17° 56' (Si);

(110) müstəvisi üçün: 28° 56' (Ge) və 30° 12' (Si);

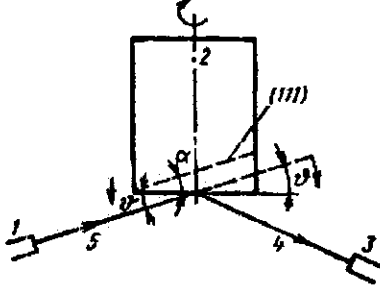
(100) müstəvisi üçün: 43° 10' (Ge) və 45° 23' (Si).

Rentgen şüalarının difraksiyası hadisəsi Vulf-Breqlər şərtinin ödənilməsi halında müşahidə olunur:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (1.1)$$

burada d - müstəvilər arasındakı məsafə; θ - düşən şüa dəstəsi ilə kristalloqrafik müstəvi arasındakı bucaq; n - əks olunanın tərtibi; λ - Rentgen şüalanmasının dalğa uzunluğudur.

Külçənin rentgenoqrafik üsulla istiqamətləndirilməsinin mümkün variantlarından biri şəkil 2.3-də göstərilmişdir.



Şək. 2.3. Külçənin rentgen üsulu ilə istiqamətləndirilməsinin sxemi:
1 - rentgen borusu; 2 - külçə; 3 - şüa qəbuledicisi;
4 - əks olunmuş dəstə; 5 - düşən dəstə

Yarımkəçirici materialın uc tərəfi elə kəsilir və cilalanır ki, onun müstəvisi külçənin hündəsi oxuna ciddi perpendikulyar olsun. Sonra külçəni rentgenostruktur analizi (təhlili) qurğusunun əşya masasının üzərinə, uc tərəfi şüaya doğru yönəldərək qoyurlar. Rentgen şüaları dəstəsini külçəyə axtarılan müstəviyə uyğun olan θ səpilmə bucağı altında yönləndirlər. Düşən şüa ilə eyni müstəvidə 2θ bucağı altında əks olunan şüanın qəbuledicisi yerləşdirilir. Külçənin hündəsi oxu həmçinin düşən və əks olunan şüalarla bir müstəvidə