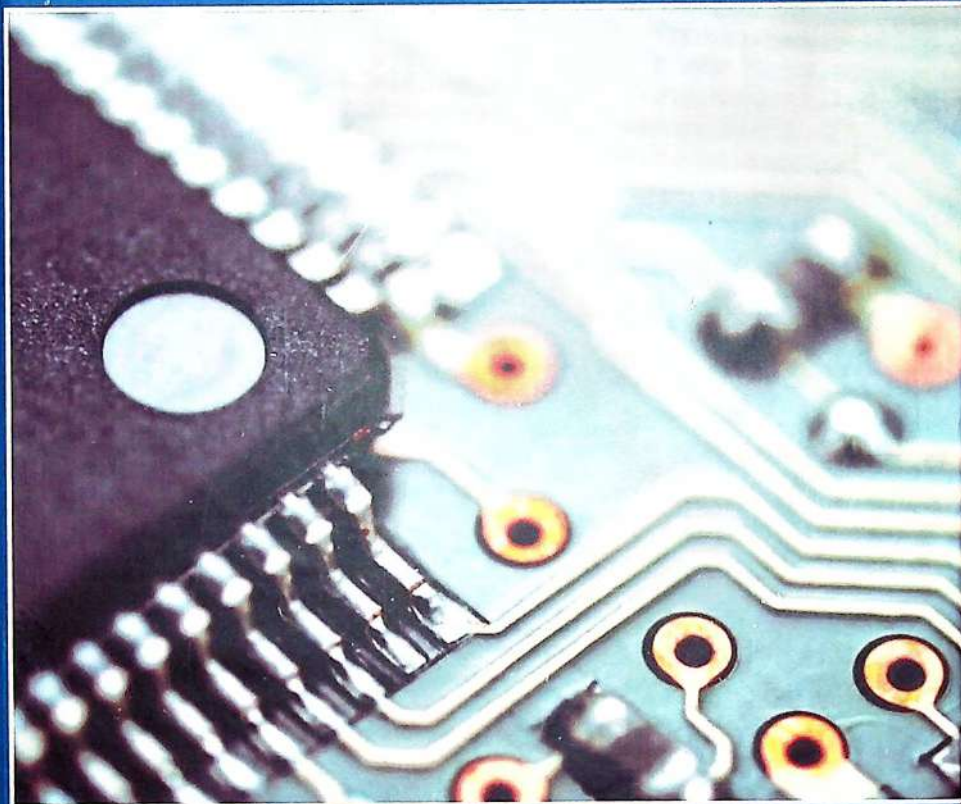


SAITOV E.B., ZAXIDOV N.M. ZIKRILLAYEV X.F.,
YULDOSHEV I.A., ABDURAXMONOV B.A



**YARIMO'TKAZGICHLI
MATERIALLARNING OPTIK VA
FIZIK XOSSALARI**

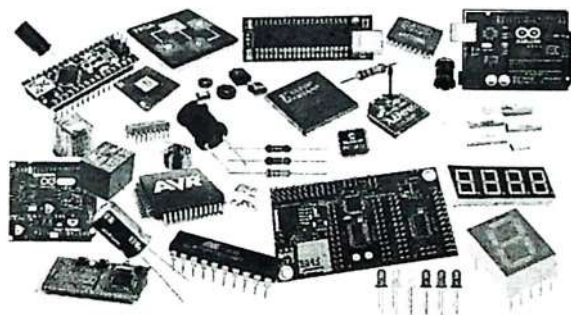
62.204
50-82

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIV VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI**

**SAITOV E.B., ZAXIDOV N.M. ZIKRILLAYEV X.F.,
YULDOSHEV I.A., ABDURAXMONOV B.A**

YARIMO'TKAZGICHLI MATERIALLARNING OPTIK VA FIZIK XOSSALARI

*O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim muassasalari 5312400-Muqobil
energiya manbalari (turlari boyicha), 5310800-Elektronika va
asbobsozlik (elektronika sanoatida) ta'lim yo'nalishlari talabalari
uchun darslik sifatida tavsiya etilgan*



«BOOK TRADE 2022»

Toshkent - 2022



UDK: 621.3

KBK: 34.73.20

Saitov E.B., Zaxidov N.M. Zikrillayev X.F., Yuldoshev I.A., Abduraxmonov B.A «Yarimo'tkazgichli materiallarning optik va fizik xossalari» – T: 2022 y. – 240 b.

Ushbu darslikda yarim o'tkazgichli quyosh elementlarining quyosh elementlarining fizikaviy asoslari va zamonaviy texnologiyalari keltirilgan. Bundan tashqari yetarlicha e'tibor yarim o'tkazgichli quyosh elementlarini tayyorlash texnologiyasiga va ularning optik va fizik xususiyatlarini o'rganish usullariga qaratilgan.

В этом учебнике охватывает физические основы и современные технологии полупроводниковых солнечных элементов. Кроме того, достаточное внимание уделяется технологии изготовления полупроводниковых солнечных элементов и методам исследования их оптических и физических свойств.

In this textbook covers the physical foundations and modern technologies of semiconductor solar cells. In addition, sufficient attention is paid to the technology of manufacturing semiconductor solar cells and methods of studying their optical and physical properties.

Taqrizchilar:

K.S.Ayupov– ToshDTU professori, texnika fanlari doktori.

N.Norqulov – O'zMU dotsenti, fizika – matematik fanlari nomzodi;

ISBN 978-9943-8561-1-0

© Toshkent davlat texnika Universiteti, 2022.

© «BOOK TRADE 2022» nashriyoti, 2022.

MUNDARIJA

Kirish	7
I-BOB. YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASINING ASOSLARI	9
1-§. Yarimo‘tkazgichlar	9
1.1. Materiallarning elektr va magnit xossalari ko‘ra sinflanishi ...	11
1.2. Yarim o‘tkazgichlarning tuzilishi	13
1.3. Yarimo‘tkazgichlarning ichki o‘tkazuvchanligi	19
1.4. O‘tkazgichlar, yarim o‘tkazgichlar, izolyatorlar.....	23
1.5. O‘tkazgichlar, dielektriklar va yarim o‘tkazgichlar.....	24
2-§ Yarimo‘tkazgichlarda nuqsonlarning turlari.	29
2.1. Kristallardagi nuqsonlar	32
2.2. Yarimo‘tkazgichlardagi kirishma atomlarining o‘tkazuvchanligi	34
3-§. Yarimo‘tkazgichlarda elektron va kovaklar statistikasining asoslari	38
3.1. Yarim o‘tkazgichlarda kiritmali elektr o‘tkazuvchanlik.....	39
3.2. p-n o‘tish: tuzilishi va ishlash printsiplari	41
4-§. Yarimo‘tkazgichlarda uzluksizlik tenglamasi	45
4.1. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi	46
4.2. Diffuziya koeffitsienti	46
5-§ Dielektrlarda zaryad ko‘chish jarayonining xususiyatlari ..	48
5.1. Dielektrlarning fizik xususiyatlari.....	50
5.2. Asosiy dielektriklar	51
5.3. Dielektrik suyuqlik.....	51
II-BOB. YARIMO‘TKAZGICHLARDA ELEKTRON VA KOVAKLAR STATISTIKASINING ASOSLARI	54
6-§ Yarimo‘tkazgichli materiallar olish texnologiyasi	54
6.1. Zamonaviy elektronika elementlarini tigel yordamida o‘stirish usullari	55
6.2. Zamonaviy elektronika elementlarini tigelsiz o‘stirish usullari ..	57
6.3. Zamonaviy elektronika elementlari plenklarini eritmalardan o‘stirish usullari	61
7-§ Yarimo‘tkazgich materiallarga ishlov berish	68
7.1. Yarim o‘tkazgichli materiallar sirtini kimyoviy emirish jarayoni	68
7.2. Yarim o‘tkazgichli materiallarni kesish jarayoni.....	69

UDK: 621.3

KBK: 34.73.20

Saitov E.B., Zaxidov N.M. Zikrillayev X.F., Yuldoshev I.A., Abduraxmonov B.A «Yarimo'tkazgichli materiallarning optik va fizik xossalari» – T: 2022 y. – 240 b.

Ushbu darslikda yarim o'tkazgichli quyosh elementlarining quyosh elementlarining fizikaviy asoslari va zamonaviy texnologiyalari keltirilgan. Bundan tashqari yetarlicha e'tibor yarim o'tkazgichli quyosh elementlarini tayyorlash texnologiyasiga va ularning optik va fizik xususiyatlarini o'rganish usullariga qaratilgan.

В этом учебнике охватывает физические основы и современные технологии полупроводниковых солнечных элементов. Кроме того, достаточное внимание уделяется технологии изготовления полупроводниковых солнечных элементов и методам исследования их оптических и физических свойств.

In this textbook covers the physical foundations and modern technologies of semiconductor solar cells. In addition, sufficient attention is paid to the technology of manufacturing semiconductor solar cells and methods of studying their optical and physical properties.

Taqrizchilar:

K.S.Ayupov– ToshDTU professori, texnika fanlari doktori.

N.Norqulov – O'zMU dotsenti, fizika – matematik fanlari nomzodi;

ISBN 978-9943-8561-1-0

© Toshkent davlat texnika Universiteti, 2022.

© «BOOK TRADE 2022» nashriyoti, 2022.

MUNDARIJA

Kirish	7
I-BOB. YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASINING ASOSLARI.....	9
1-§. Yarimo‘tkazgichlar	9
1.1. Materiallarning elektr va magnit xossalari ko‘ra sinflanishi ...	11
1.2. Yarim o‘tkazgichlarning tuzilishi	13
1.3. Yarimo‘tkazgichlarning ichki o‘tkazuvchanligi	19
1.4. O‘tkazgichlar, yarim o‘tkazgichlar, izolyatorlar.....	23
1.5. O‘tkazgichlar, dielektriklar va yarim o‘tkazgichlar.....	24
2-§ Yarimo‘tkazgichlarda nuqsonlarning turlari.....	29
2.1. Kristallardagi nuqsonlar	32
2.2. Yarimo‘tkazgichlardagi kirishma atomlarining o‘tkazuvchanligi	34
3-§. Yarimo‘tkazgichlarda elektron va kovaklar statistikasining asoslari	38
3.1. Yarim o‘tkazgichlarda kiritmali elektr o‘tkazuvchanlik.....	39
3.2. p-n o‘tish: tuzulishi va ishlash printsiplari	41
4-§. Yarimo‘tkazgichlarda uzluksizlik tenglamasi	45
4.1. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi	46
4.2. Diffuziya koeffitsienti	46
5-§ Dielektriklarda zaryad ko‘chish jarayonining xususiyatlari ..	48
5.1. Dielektrlarning fizik xususiyatlari.....	50
5.2. Asosiy dielektriklar	51
5.3. Dielektrik suyuqlik	51
II-BOB. YARIMO‘TKAZGICHLARDA ELEKTRON VA KOVAKLAR STATISTIKASINING ASOSLARI.....	54
6-§ Yarimo‘tkazgichli materiallar olish texnologiyasi	54
6.1. Zamonaviy elektronika elementlarini tigell yordamida o‘stirish usullari	55
6.2. Zamonaviy elektronika elementlarini tigelsiz o‘stirish usullari ..	57
6.3. Zamonaviy elektronika elementlari plenkalarini eritmalardan o‘stirish usullari	61
7-§ Yarimo‘tkazgich materiallarga ishlov berish	68
7.1. Yarim o‘tkazgichli materiallar sirtini kimyoviy emirish jarayoni	68
7.2. Yarim o‘tkazgichli materiallarni kesish jarayoni.....	69

8-§. Yarimo'tkazgich materiallarga kimyoviy va elektrkimyoviy ishlov berish	75
8.1. Yarimo'tkazgichli plastinalarni kimyoviy-dinamik qayta ishlash	77
8.2. Yarimo'tkazgichli plastinalarni elektrokimyoviy tozalash.....	78
8.3. Yarimo'tkazgichli plastinalarni plazma-kimyoviy tozalash.....	79
III-BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA OPTIK XODISALAR	81
9-§. Yarimo'tkazgich materialga termik ishlov berish.....	81
9.1. Metall va qotishmalarni issiqlik va kimyoviy issiqlik bilan ishlov berish	83
9.2. Haroratga qarab ta'tilning uch turi mavjud: past, o'rta, yuqori...	84
10-§. Yuqori vakuum olish. Vakuum va vakuum nasoslari haqida umumiy tushunchalar	88
10.1. Yuqori vakuum olishda eksperimental o'rnatish tavsifi	92
10.2. Yuqori vakuum olishda natijalarni muhokama qilish.....	92
11-§. Yarimo'tkazgichlarda diffuziya jarayonlari va usullari	95
11.1. Eynshteynning diffuziya nazariyasi.....	96
11.2. Diffuziya va rekombinatsiya	97
11.3. Diffuzion qatlamlar xususiyatlarini o'rganish	101
11.4. Diffuzion texnologiya asosida quyosh elementlarini tayyorlash imkoniyatlari.....	102
IV-BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA	
FOTOOTKAZUVCHANLIK XODISALARI	104
12-§. Yarimo'tkazgichlarda omik kontakt hosil qilish.....	104
12.1. Omik kontakt tushunchasi.....	104
12.2. Omik kontakt olish usullari	106
12.3. Omik kontaktlarning parametrlarini ishlab chiqarish va nazorat qilish	107
12.4. Kontaktlarning texnologik jihatdan muhim turlari	108
13-§. Yarimo'tkazgichlarda ion legirlash texnologiyasi.....	112
13.1. Tajribalar o'tkazish vaqtida amalga oshiriladigan texnologik jarayonlar	114
14-§. p-n o'tish sirtini himoyalash usullari.....	117
14.1. p-n o'tishning hosil bo'lishi	117
14.2. p-n o'tish toklari	118
15-§. Yarimo'tkazgich asboblarni konstruktiv shakllantirish	122
15.1. Yarimo'tkazgichli diodlar	123
15.2. Transistorlar.....	125

16-§ Yarimo'tkazgich integral sxemalarni tayyorlash	130
16.1. Integral mikrosxema (IMS)	130
16.2. Pardali va gibrid mikrosxemalar	131
16.3. Kondensatorlar	133
17-§ Germaniy epitaksiyasi	136
18-§ Epitaksiya usuli	138
18.1. Epitaksial qatlamlarning profil bo'yicha kimyoviy tarkibi	138
19-§ Bug'latgichlar. Omik kontaktlar uchun eritmalar. Germaniy bilan kontakt hosil qiluvchi qotishmalar	140
20-§ Geteroo'tishlar va ularning xossalarini o'rganish	145
20.1. Geteroo'tishlarning energetik diagrammasi	149
V-BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA FOTOEFFEKT XODISALARI.....	
21-§. Yarimo'tkazgichli materiallar orasidagi geterojuftliklar ..	152
21.1. Yarimo'tkazgichlar materiallar asosidagi geterojuftliklar	152
22-§ Quyosh elementlariga kontakt olish jarayoni marshruti	154
23-§ Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish texnologiyasi ..	159
23.1. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlarning xususiyatlari	159
23.2. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish usullari	162
23.3. Pirofiz usuli bilan akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish.	162
23.4. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlarni termik yo'l bilan olish usuli	162
24-§ Quyosh elementlari texnologiyasida fotolitografiya usulining qo'llanilishi.....	164
24.1. Fotolitografiya usuli va uning mohiyati	164
24.2. Fotolitografiya usulida qo'llaniladigan materiallar	165
24.3. Fotoshablon yordamida rasm tushirish	165
24.4. Metall va dielektrik qatlamlarda shakl hosil qilish.....	166
25-§ Kristall kremniyli quyosh elementlari	168
25.1. Mono va polikristalli quyosh panellari	170
26-§ Yupqa qatlamli quyosh elementlari	174
26.1. Yassidan silindrsimon gacha bo'lgan quyosh elementlari.....	176
26.2. Ko'p qatlamli quyosh batareyalari	177
26.3. Yupqa plyonkali modullar dunyosidagi eng qiziqarli yutuqlar	178
27-§. Quyosh elementlarida qo'llaniladigan yupqa qatlamlarning fizik xossalari	180
28-§ Amorf kremniy asosidagi quyosh elementlari	187
29-§. Amorf kremniy asosidagi quyosh elementlari	192

29.1. Yangi turdagi mikro va nanostrukturaga ega bo'lgan quyosh elementlari	197
30-§ Yarim o'tkazgichli fotoelektron asboblarning fizikaviy asoslari. Yarim o'tkazgichli asboblarning fizikaviy asoslari. Yarim o'tkazgichli asboblarning fizikaviy asoslari.....	202
30.1. Foto qabul qilgich asboblarning ishlash tamoyili	202
30.2. Foto qabul qilgichlarning tavsiflari va parametrlari	205
30.3. Foto qabul qilgichning opto juftlik elementi sifatidagi parametrlari.....	210
30.4. p-n o'tish asosidagi fotodiodlar.....	211
30.5. Shottki fotodiodi.....	215
30.6. Fototranzistor.....	218
30.7. Fototiristor	221
30.8. Fotorezistor.....	223
30.9. Fotorezistorlarning asosiy tavsiflari va parametrlari	225
30.10. Optronlarning sinflanishi va asosiy vazifasi	228
30.11. Rezistorli optojuftliklar	232
30.12. Diodli optojuftlik.....	234
Xulosa.....	236
Adabiyotlar	238

KIRISH

Yarimo'tkazgichli materiallarning optik va fizik xossalari fan va texnikaning rivojlanish tarixida radiotexnika va elektronika sohalarining o'zaro qo'shilishidan vujudga kelgan va fotoenergetikani rivojlantirish orqali mukallashmoqda.

Yarim o'tkazgichlarning aralashmali elektr o'tkazuvchanligi. Tabiatda sof yarimo'tkazgich bo'lmaydi, ya'ni oz miqdorda bo'lsa, ham begona element atomlari aralashgan bo'ladi. Bu aralashmalar yarimo'tkazgichlarda qanday o'zgarishlarni vujudga keltirishi mumkin:

To'rt valentli Si (kremniy) da yoki Ge (germaniy) dan tuzilgan kristall panjara-ning bazi tugunlarida besh valentli atomlar, masalan P (fosfor) yoki As (mish-yak) joylashgan bo'lsin. Bu holda aralashma atomlardan to'rtta elektron Si (kremniy) yoki Ge (germaniy) atomlari bilan kovalent bog'lanishda bo'ladi, beshinchi elektron esa atom bilan juda zaif bog'langan, shuning uchun issiqlik harakat energiyasi ham bu elektronni atomdan ajratib ozod elektron bo'lishiga etarlidir. Bu elektronlar tok tashuvchilik vazifasini bajaradi.

Yarimo'tkazgichli materiallarning optik va fizik xossalari – o'zgarmas yoki sanoat chastotasi (50 Gs) ga teng bo'lgan chastotadagi o'zgaruvchan tok energiyasini yuqori chastotali (10^5 ÷ 10^7 Gs) o'zgaruvchan tok energiyasiga aylantirib berish, elektromagnit tebranish va to'lqinlarni hosil qilish ularni tarqatish hamda qabul qilish, yorug'lik hodisalari hamda ularni optik yutulishi shuningdek biror axborotni radioto'lqinlar orqali uzatish va qabul qilishdagi jarayonlarni o'rganadi.

Yarimo'tkazgichli materiallarning optik va fizik xossalari – elektrovakuum va yarim o'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarish hamda ularni hozirgi zamon radioapparatlarida ishlatishlarni o'rganadi.

Yarimo'tkazgichli materiallarning optik va fizik xossalarining rivojlanishida XIX asrda fizika sohasida qilingan ko'pgina kashfiyotlar katta ahamiyatga ega bo'ldi, ularga Faradey tomonidan kashf etilgan elektr va magnit maydonlarining o'zaro ta'sir hodisalari, Maksvellning elektromagnit maydon xususiyatlarini ochib beruvchi tenglamalarini ko'rsatish mumkin. Maksvell nazariyasining to'g'riligini birinchi marta nemis olimi Gers (1886-1888 yillarda) amalda isbotladi, lekin elektromagnit to'lqinlarni amalda hosil qilinsada, ulardan texnikada

foydalanish mumkin emas deb hisoblagan edi. Chunki, elektromagnit to'liqlarni qayd etadigan vibratorda hosil bo'ladigan uchqunni qorong'u xonada faqat lupa yordamidagina kuzatish mumkin edi xolos. Mana shu kuchsiz uchqunda kelajakdagi aloqa vositasini ko'ra olish uchun tadqiqotchi buyuk olim bo'lish kerak edi. Bu ixtiroga rus olimi A.S.Popov musharraf bo'ldi. Popov 1895 yil 7 may kuni Peterburg rus fizik va kimyogarlari jamiyatida o'zining ixtirosi haqida ma'ruza qildi. Popovning ixtirosidan bir yil o'tgach, italyan injeneri Markoni radio aloqa ishlarini amalga oshirib ko'rsatdi.

I-BOB. YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASINING ASOSLARI.

1-§. Yarimo'tkazgichlar.

Yarimo'tkazgichlar - o'tkazuvchanligi jihatidan metall va dielektriklar orasidagi moddalar bo'lib, o'z fizik xususiyatlarini turli tashqi ta'sirlar (masalan yoritish, isitish va hokazo) natijasida keng intervalda o'zgartira olish xususiyatiga ega. Yarimo'tkazgichlar elektronika va mikroelektronikada juda keng qo'llanilib, zamonaviy elektr jihozlarning deyarli hammasi - kompyuterlardan tortib to uyali aloqa telefonlarigacha barchasi yarimo'tkazgichli texnologiyaga asoslangan. Eng keng qo'llaniladigan yarimo'tkazgich modda kremniy bo'lib, boshqa moddalar ham keng qo'llaniladi.

Yarimo'tkazgichlar— elektr tokini yaxshi o'tkazuvchi moddalar (o'tkazgichlar, asosan, metallar) va elektr tokini amalda o'tkazmaydigan moddalar (dielektriklar) orasidagi oraliq vaziyatni egallaydigan moddalar. Mendeleyev davriy sistemasida II, III, IV, V va VI guruhlarda joylashgan ko'pchilik elementlar. ularning bir qator birikmalari yarimo'tkazgichlar jumlasiga kiradi. Yarimo'tkazgichlarda ham metallardagi kabi elektr o'tkazuvchanlik elektronlarning harakati tufayli yuzaga keladi. Biroq elektronlarning harakatlanish sharoitlari metallar va Yarimo'tkazgichlarda turlicha bo'ladi. Yarimo'tkazgichlar quyidagi asosiy xususiyatlarga ega: Yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi temperatura ko'tarilishi bilan ortib boradi (mas, temperatura 1 K ga ortganda Yarimo'tkazgichlarning solishtirma o'tkazuvchanligi 16—17 marta ortadi); Yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligida erkin elektronlardan tashqari atom bilan bog'langan elektronlar ham ishtirok etadi (ba'zi hollarda bog'langan elektronlar asosiy rol o'ynaydi); sof Yarimo'tkazgichlarga oz miqdorda qo'shilma kiritib, uning o'tkazuvchanligini keskin o'zgartirish mumkin (mas, 0,01% qo'shilma kiritilganda Yarimo'tkazgichlar ning o'tkazuvchanligi 10000 marta ortib ketadi).

Past tralarda Yarimo'tkazgichlarning solishtirma qarshiligi juda katta bo'ladi va amalda ular izolyator hisoblanadi, lekin temperatura ortishi bilan ularda zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi keskin ortadi. Mas, sof kremniyda 20° trada erkin elektronlar konsentratsiyasi $\sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$ bo'lsa. 700° da 10^{24} m^{-3} gacha, ya'ni million martadan ko'proq ortadi. Yarimo'tkazgichlarda erkin elektronlar konsentratsiyasining

traga bunday keskin bog'likligi o'tkazuvchanlik elektronlari issiqlik harakati ta'sirida hosil bo'lishini ko'rsatadi. Yarimo'tkazgich kristallda atomlar valent elektronlari yordamida o'zaro bog'langan. Atomlarning issiqlik tebranishlari vaqtida issiqlik energiyasi valent elektronlar orasida notekis taqsimlanadi. Ayrim elektronlar o'z atomi bilan bog'lanishni uzib, kristallda erkin ko'chib yurish imkonini beradigan yetarli miqdordagi issiqlik energiyasiga ega bo'lib qolishi va erkin elektronlarga aylanishi mumkin.

Tashqi elektr maydon bo'lmaganda bu erkin elektronlar tartibsiz harakat qiladi. Elektr maydon ta'sirida esa maydonga qarshi yo'nalishda tartiblangan harakatga kelib, Yarimo'tkazgichlarda tok hosil qiladi. Erkin elektronlar yuzaga keltirgan o'tkazuvchanlik elektron yoki p-tip o'tkazuvchanlik deb ataladi.

Bog'langan elektronning o'z atomini "tashlab ketishi" atomning elektr neytralligini buzadi. unda "ketib qolgan" elektron zaryadiga miqdoran teng musbat zaryad — teshik vujudga keladi. Tashqi elektr maydon bo'lmaganda elektronlar ham, teshiklar ham tartibsiz harakatlanadi, tashqi maydon bo'lganda esa elektronlar maydonga qarshi, teshiklar maydon bo'ylab ko'chadi. Teshiklarning ko'chishi bilan bogliq o'tkazuvchanlik teshikli yoki r-tip o'tkazuvchanlik deyiladi. Erkin elektronlar soni bilan teshiklar soni bir-biriga tengligi 'ushunarli. Aniklanishicha, ularning harakatlanish tezligi ham bir xil 'kan. Demak, yarimo'tkazgichlardagi tok ayni vaqtda ham elektron, 'am teshikli o'tkazuvchanlikdan vujudga keladi. Bunday elektronteshikli o'tkazuvchanlik yarimo'tkazgichlarning xususiy o'tkazuvchanligi deyiladi. Xususiy o'tkazuvchanlik sof yarimo'tkazgichlarda kuzatiladi. Biroq tabiatda sof yarimo'tkazgichlar yo'q. Ba'zi qo'shilmalar yarimo'tkazgichlarni erkin elektronlar bilan boyitsa, boshqa ba'zi qo'shilmalar teshiklar bilan boyitadi. Yarimo'tkazgichlarda yuzaga keladigan bunday o'tkazuvchanlik qo'shilmali o'tkazuvchanlik deb ataladi.

Agar asosiy yarimo'tkazgichlar atomi o'miga elementlar davriy sistemasida undan keyingi guruhda turgan element atomi kiritilsa, bu qo'shilma atomning bitta valent elektroni atomlararo bog'lanishda ishtirok etmaydi va erkin elektronlar safiga qo'shiladi, binobarin, itip o'tkazuvchanlik ortadi. Aksincha, undan oldingi o'rinda turgan element atomi kiritilsa, atomlararo to'la bog'lanishda 1 ta elektron yetishmaydi, teshik hosil bo'ladi. Bunda r-tip o'tkazuvchanlik ortadi. Qo'shimcha

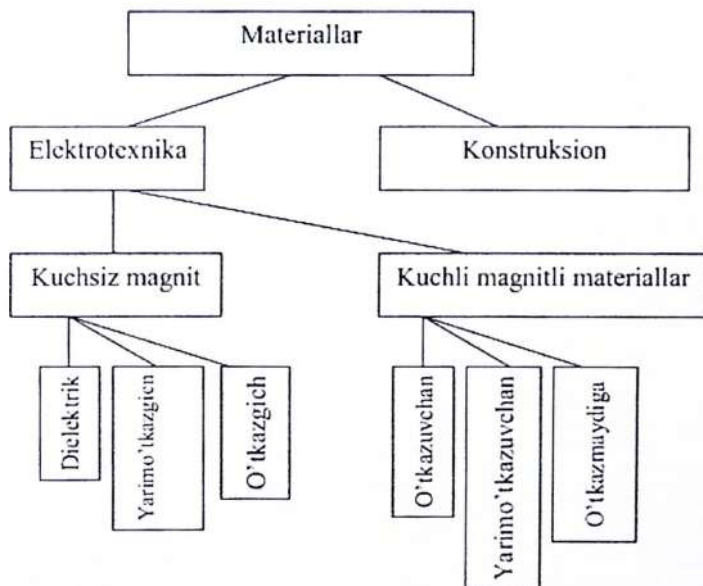
birinchi holda donor (elektron beruvchi) qo'shilma, ikkinchi holda esa akseptor (elektron oluvchi) qo'shilma deb ataladi.

Shunday qilib, yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi xususiy va aralashmali o'tkazuvchanliklar yig'indisidan iborat bo'ladi. Yuqori tralarda xususiy o'tkazuvchanlik, past tralarda esa qo'shilmali o'tkazuvchanlik asosiy rol o'ynaydi.

1.1. Materiallarning elektr va magnit xossalariga ko'ra sinflanishi.

Materiallar o'zaro bir-biridan fizik hamda kimyoviy xususiyatlari bilan farq qiladi. Elektron texnikasida ishlatiladigan materiallar 3 qismga bo'linadi:

1. Elektrotexnik
2. Konstruksion
3. Maxsus materiallar



Elektrontexnika materiallari bu elektr va magnit maydonida ma'lum bir xususiyati bilan tavsiflanadi, bular amaliyotda elektr va magnit maydon ta'siri berilishiga qarab qo'llaniladi.

Elektrontexnik materiallar magnit maydonida 2 guruhga bo'linadi: kuchli va kuchsiz magnit materiallar.

Elektr maydonida ular 3 guruhga bo'linadi:

1. O'tkazgichlar.
2. Yarimo'tkazgichlar.
3. Dielektriklar.

Metallar - bu materiallarning xona haroratida solishtirma o'tkazuvchanligi

$\sigma = 10^{-6} \div 10^{-4} \text{ (Om} \cdot \text{sm)}$ ni tashkil etadi.

Yarim o'tkazgich materiallar - solishtirma o'tkazuvchanligi xona haroratida $\sigma = 10^{-4} \div 10^{10} \text{ (Om} \cdot \text{sm)}$ ni tashkil etib, ularning elektrofizik xossasi metallardan farqli holda tashqi ta'sirga: yorug'lik, bosim, elektr maydon hamda haroratga juda ta'sirchan bo'ladi.

Dielektrik materiallar - bu odatda solishtirma o'tkazuvchanligi juda kichik bo'lib, $b = 10^{10} \div 10^{15} \text{ (Om} \cdot \text{cm)}$ bo'lgan va elektr xususiyati qutblangan qonuniyatiga bo'ysunuvchi material hisoblanadi.

O'tkazuvchan material deb - elektr o'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan materiallarga aytiladi. Ularni texnikada qo'llanilishiga sabab, normal haroratda juda yuqori solishtirma elektr o'tkazuvchanlikka egaligidir.

Yarim o'tkazgich materiallar deb - o'tkazuvchan va o'tkazmaydigan (dielektrik) materiallar oralig'idagi materiallarga aytiladi.

Bularni boshqa materiallardan farqi solishtirma o'tkazuvchanligi tok tashuvchilarning konsentrasiyasiga hamda tashqi energetik xolatiga, haroratga va yorug'likka bog'liqligidir.

Dielektrik materiallar deb - elektr xususiyati qutblanishga bo'ysinuvchi va solishtirma o'tkazuvchanligi juda kichik bo'lgan materiallarga aytiladi. Dielektrik materiallar 2 turga bo'linadi:

1. Passiv
2. Aktiv (faol).

Passiv dielektrik materiallar ko'pincha elektro - izolyasiya sifatida qo'llaniladi. Bunga misol qilib, oddiy kondensatorni olish mumkin. Aktiv dielektriklar ko'pincha lazer texnikasida qo'llaniladi. O'tkazuvchan materiallarning solishtirma qarshiligi $\rho < 10^{-5} \text{ Om} \cdot \text{m}$ dielektrik materiallar qarshiligi esa $\rho < 10^8 \text{ Om} \cdot \text{m}$.

1.2. Yarim o'tkazgichlarning tuzilishi.

Misol uchun yarim o'tkazgichning tipik vakili bo'lgan germaniyni qaraylik. Uning tartib nomeri 32 va to'rtta elektron qobig'i mavjud: 1-qobiqda 2 ta; 2-qobiqda 8 ta, 3-qobiqda 18 ta, 4-qobiqda esa 4 ta elektron joylashgan. Uchta ichki qobiqdagi elektronlar turg'un bo'lib, kimyoviy reaksiya-larda ishtirok etmaydi. Oxirgi to'rtinchi qobiqdagi elektronlar esa atom yadrosi bilan juda kuchsiz bog'langan. Aynan shu elektronlar elementning boshqa atomlarining nechitasi bilan kimyoviy bog'lanishga kira olish qobiliyatini ko'rsatib, mazkur elementning valentligini aniqlaydi. Shuning uchun ham oxirgi qobiqdagi elektronlarga tashqi yoki valentli elektronlar deyiladi. Tashqi qobig'ida to'rtta elektroni mavjud bo'lgan germaniyning valentligi to'rtga teng. Mazkur atomga boshqa atomlar yaqinlashganida valent elektronlar boshqa atomning valent elektronlari bilan oson ta'sirlashadi va kimyoviy bog'lanish hosil qiladi. Atom qobig'iga ma'lum energiya berilganda atomnig ionlashuvi ro'y berishi mumkin. Aynan so'nggi qobiqdagi elektronni ozod qilish uchun eng kam energiya taqozo qilinadi. Germaniy, kremniy va yarim o'tkazgichlarning boshqa bir qancha vakillari kristall moddalar hisoblanadi. Ularning atomlari ma'lum qonuniyatlarga muvofiq joylashgan bo'ladi¹.

Yarimo'tkazgichlar - elektr o'tkazuvchanligi jihatidan o'tkazgichlar va izolyatorlar o'rtasida oraliq pozitsiyani egallaydigan moddalarning katta guruhi. Yarimo'tkazgichlarga kremniy (silisiy), germaniy, selen, galyum arsenidi va boshqalar kiradi.

Har bir atom musbat elektr zaryadli yadrodan iborat bo'lib, uning atrofida manfiy zaryadlangan zarralar - elektronlar aylanadi.

Vodorod, kremniy (kremniy) va germaniy atomlari 1 -rasmda sxematik tarzda ko'rsatilgan. Yadroning musbat zaryadi yadro atrofidagi orbitadagi elektronlarning umumiy manfiy zaryadiga teng va shuning uchun atom umuman elektr neytraldir.

Elektronlar yadro atrofida murakkab dumaloq va elliptik orbitalarda harakatlanadi. Ularning birinchi (yadroga eng yaqin) orbitadagi maksimal soni ikkitadan, ikkinchisida - 8, uchinchisida - 18, to'rtinchisida - 32 va boshqalar bo'lishi mumkin.

¹ <https://radio-samodel.ru/poluprovodnik.html>

Tashqi orbitadagi elektronlar molekular va kristallarning shakllanishida eng katta rol o'ynaydi. Ularni valentlik deb atashadi, chunki ularning soni kimyoviy elementlarning valentligini aniqlaydi va ular yadrodan eng uzoqda va unga zaif bog'langan.

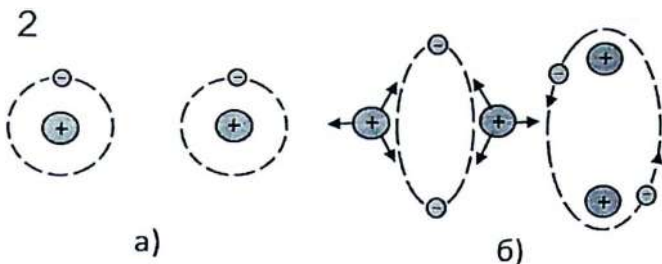


1-rasm. Vodorod, kremniy (kremniy) va germaniy atomlari sxematik tarzda ko'rsatilgan.

Muayyan sharoitlarda (masalan, zarrachalarning issiqlik harakati, elektr maydoni, turli nurlar bilan nurlanish va boshqalar tufayli zarbalari) elektronlar atomni tark etishi mumkin. Bunday holda, yadroning musbat zaryadi elektronlarning manfiy zaryadi bilan to'liq zararsizlantirilmaydi va atom musbat elektrlashtiriladi. Nafaqat ajratish mumkin, balki elektronga atomni birlashtirish ham mumkin va u manfiy zaryadga aylanadi. Elektronlarning sinishi va qo'shilishi ionlanish deb ataladi va atom yadrolarining tuzilishi o'zgarganda, atomning parchalanishiga aloqasi yo'q. Ionlanish bilan bir vaqtda, moddada teskari jarayon - rekombinatsiya kuzatiladi, bunda musbat ionlar elektronlar bilan bog'lanadi, manfiylari esa ularni yo'qotib, elektr neytral atomlarga aylanadi.

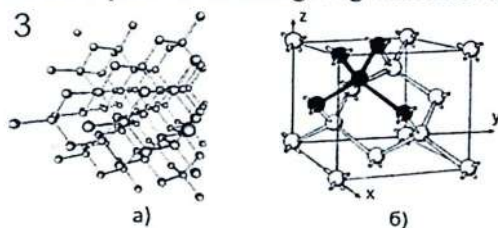
Kristal tuzilishi. Bir qator moddalar, masalan, shakar, quyma temir, granit va boshqalar bir -biriga mahkam bog'langan kichik kristallardan iborat. Bu struktura polikristal deb ataladi. Tabiatda bitta monokristaldan tashkil topgan moddalar ham bor. Bunday struktura monokristal deb ataladi va uning shakllanishi uchun maxsus shartlar talab qilinadi. Yarimo'tkazgichli texnologiyalar ehtiyojlari uchun sun'iy ravishda olingan germaniy va kremniy kristallari tabiatda mavjud bo'lmagan yagona kristallardir.

Alohida atomlar bir -biri bilan qanday bog'langanligini va materiyani qanday hosil qilishini ko'rib chiqing.



2 –rasm. Ikkita bog‘lanmagan vodorod atomlari.

2a -rasmida ikkita bog‘lanmagan vodorod atomlari ko‘rsatilgan. Ikkala atom ham bir -biriga yaqinlashganda, ularning elektronlari bir xil orbitada aylana boshlaydi, bu ikki atom uchun umumiydir (2b -rasm). Shunday qilib, ular yadrolar o‘rtasida mustahkam bog‘lanish hosil qiladi, chunki yadrolar orasidagi itarish kuchi ularning bir -biriga juda yaqinlashishiga to‘sqinlik qiladi va har bir elektron va har bir yadro orasidagi tortishish kuchi ularni "tarqalishiga" to‘sqinlik qiladi. Olingan molekula barqaror va bu turdagi bog‘lanish kovalent deyiladi².

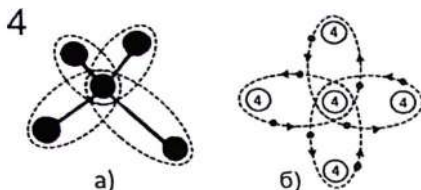


3 –rasm. Kremniy panjarasi.

Kristallarda alohida atomlar bir -biriga bog‘langan va barcha yarimo‘tkazgichlarga ega bo‘lgan kristall tuzilishini hosil qiladi. Bundan tashqari, aniqroq va ravshanroq bo‘lish uchun, biz germaniy va boshqa yarimo‘tkazgichlarda hamma narsa xuddi shunday sodir bo‘lishini eslab, kremniydagi hodisalarni ko‘rib chiqamiz.

² <https://radio-samodel.ru/poluprovodnik.html>

3a -rasmda kremniy panjarasi ko'rsatilgan, va 3b -rasmda uning markaziy va to'rtta qo'shni atomlardan tashkil topgan kristalli birligi ko'rsatilgan.



4-rasmda umumiy elektronlarning orbitalari bo'lgan bir xil atom hujayrasini

4a-rasmda umumiy elektronlarning orbitalari bo'lgan bir xil atom hujayrasini ko'rsatadi. Kosmik modelning bu proektsiyasi vizual emas, shuning uchun biz 4b -rasmdagi kabi oddiy modeldan foydalanamiz. Bu shuni ko'rsatadiki, markaziy atom to'rtta qo'shni atom bilan umumiy elektronlar bilan bog'langan.

Sizning e'tiboringizni quyidagi xususiyatga qaratmoqchimiz. Aslida, kremniy yadrosining orbitasi atrofida atigi 14 elektron bor, lekin tashqi orbitada to'rttasi bor (1-rasmga qarang). Ichki orbitalarning elektronlari moddaning elektr o'tkazuvchanligida ishtirok etmasligi sababli, qulaylik uchun biz silisiyning atigi to'rt valentli salbiy zarrachasini ifodalaymiz va biz yadroda har bir yadroda 14 ta emas, faqat to'rtta musbat zaryadli birlik bor deb taxmin qilamiz. elektronlarni orbitada ushlab turish uchun (4b -rasm).

Hozirgi vaqtda yarimo'tkazgichli qurilmalar ishlab chiqarish uchun kremniy va germaniya eng ko'p ishlatiladi.

Nazariy tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, silisium ko'p jihatdan germaniyadan ustun. Ammo amalda foydalanish uchun uni germaniyaga qaraganda ancha yuqori darajada tozalash kerak.

Kimyoviy faolligi yuqori bo'lganligi sababli, sof kremniy ishlab chiqarish texnologiyasi germaniyaga qaraganda ancha qimmat edi. Shuning uchun boshida asosan germaniy tranzistorlar ishlab chiqarildi. Endi tozalash texnologiyasi ishlab chiqilgan va shuning uchun ko'pchilik kremniy tranzistorlar ishlab chiqariladi.

Yarimo'tkazgichlarni ikkita katta guruhga bo'lish mumkin:

a) elementar yarimo'tkazgichlar - kremniy (Si), germaniy (Ge), selen (Se), tellur (Te), uglerod (C), bor (B), oltingugurt (S), fosfor (P), mishyak (As) va boshqalar;

b) yarimo'tkazgichli birikmalar - mis oksidi (Cu_2O), kadmiy sulfidi (CdS), kremniy karbid (SiC), galiy arsenidi (GaAs), indiy antimonidi (InSb), qo'rg'oshin sulfidi (PbS) va boshqalarni o'z ichiga olishi mumkin. yarimo'tkazgich xususiyatiga ega organik birikmalar.

Barcha yarimo'tkazgichlar bir qator xususiyatlarga ega:

5



5—rasm. Yarimo'tkazgichlarni o'tkazgichlar va izolyatorlar o'rtasida o'rta joyni egallashi

1. Elektr o'tkazuvchanligi nuqtai nazaridan (barqaror haroratda), toza yarimo'tkazgichlar o'tkazgichlar va izolyatorlar o'rtasida o'rta joyni egallaydi (5 -rasm), shuning uchun ularning nomi.

2. Kam miqdordagi aralashmalarning qo'shilishi yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligini ancha oshiradi.

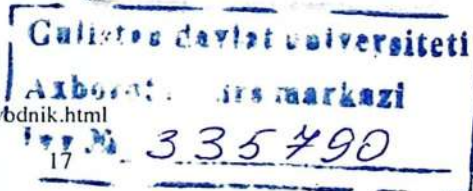
3. Harorat yarimo'tkazgichlarning elektr qarshiligiga ayniqsa kuchli ta'sir ko'rsatadi, masalan, qarshilik kuchayishi bilan ularning qarshiligi pasayadi, metallarda esa ortadi. Shuning uchun metallardan farqli ravishda ular salbiy harorat koeffitsientiga ega.

4. Yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanlik mexanizmi metallardan sifat jihatidan farq qiladi. Metallarda elektr o'tkazuvchanligi faqat elektron, yarimo'tkazgichlarda esa elektron va teshikdir.

Kremniy, germaniy va selenning xususiyatlari.

Yuqorida aytib o'tilganidek, yarimo'tkazgich texnologiyasida ko'p sonli kimyoviy elementlar va moddalar ishlatiladi. Keling, kremniy, germaniy va selenning fizik -kimyoviy xossalari qisqacha ko'rib chiqaylik³.

³ <https://radio-samodel.ru/poluprovodnik.html>



Kremniy (silisiy).

Bu eng keng tarqalgan kimyoviy elementlardan biri - uning er qobig'idagi tarkibi taxminan 25%ni tashkil qiladi.

U 1824 yilda Berzelius tomonidan kashf etilgan va davriy jadval elementlarining IV guruhiga mansub, ya'ni. u IV valentlikka ega. Uning seriya raqami 14 va atom massasi 28.06.

Silisiy ikki holatda bo'lishi mumkin - amorf va kristalli, lekin yarimo'tkazgich texnologiyasida faqat kristal ishlatiladi. Tabiatda kremniy asosan kvarts, qum, loy, granit va boshqalarni hosil qiluvchi oksidlar shaklida uchraydi.

Kristalli kremniy - quyuq kulrang, qattiq metalli, yaltiroq, 1687°K (yoki 1414°S) haroratda eriydi. Havoda toza silikiy oksidli qatlam bilan qoplangan.

Xona haroratida sof kremniyning o'ziga xos qarshiligi: $\rho = 105\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, lekin erigan holatda faolligi yuqori bo'lgani uchun uni mukammal darajada sof olish qiyin.

Yarimo'tkazgichli elementlardagi kremniy uchun aralashmalarning ulushi $10^{-11}\%$ dan oshmasligi kerak.

Germaniy.

1871 yilda Mendeleyev mavjudligini bashorat qilib, hali ochilmagan ekasilicium kimyoviy elementining batafsil tavsifini berdi.

O'n besh yil o'tgach, Vinkler ushbu kimyoviy moddaga ega bo'ldi va uni germaniya deb atadi.

Germaniya – noyob kimyoviy element – uning er qobig'idagi tarkibi atigi $7 \div 10^{-4}\%$. Germaniya rudasi tarkibida temir, mis va rux bor, u germaniyaga qaraganda ancha yuqori va u rux chiqarishning yon mahsuloti sifatida olinadi.

Bu yarimo'tkazgich metallga o'xshaydi, lekin uning qarshiligi $\rho = 65\Omega(\text{mm}^2/\text{m})$, ya'ni. O'tkazuvchanligi eng past bo'lgan metallardan ming marta ko'p. Masalan, misning qarshiligi $\rho = 1,7 \div 10^{-6}\Omega(\text{mm}^2/\text{m})$. Germaniyaning o'tkazuvchanligi misga qaraganda 38 million baravar kam ekanligini hisoblash oson.

Germaniya qattiq, mo'rt va ishlov berish qiyin. U 1231°K (yoki 958°C) haroratda eriydi va osonlikcha bir qancha metallar bilan qotishmalar hosil qiladi. Havoda u ingichka oksid qatlami bilan qoplangan bo'ladi.

Uni ishlab chiqarishda, asosan, ikkita qiyinchilik paydo bo'ladi.

Birinchisi, ruda germaniyning ozgina foizini o'z ichiga oladi va murakkab kimyoviy ishlovdan so'ng, odatda, 19 ata miqdordagi aralashmalari bo'lgan granüler (polikristalli) tuzilishga ega bo'ladi.

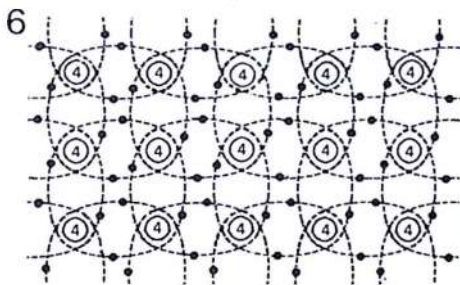
Ikkinchi qiyinchilik, germaniyni tozalash bilan bog'liq, bu erda zonani eritish usuli eng ko'p ishlatiladi. Bu holda, ifloslanishlar foizi taxminan $5 \div 10^{-9}\%$ ni tashkil qiladi.

Selen. Selenning yarimo'tkazgichli xususiyatlari tuzatish moslamalarida selen disklari to'plami (ustunlari) ko'rinishida yuz yildan ko'proq vaqt oldin ishlatila boshlangan. Uning er qobig'ida tarqalganligi germaniynikidan ham kam (7 10-6%), lekin uni ishlab chiqarish texnologiyasi oddiy va aralashmalarning ulushi germaniyga qaraganda million marta ko'p bo'lishi mumkin. Rektifikatorlardagi selen disklari monokristal emas, balki alohida mayda donalardan iborat.

1.3. Yarimo'tkazgichlarning ichki o'tkazuvchanligi.

Hech qanday iflosliksiz toza yarimo'tkazgich ichki yarimo'tkazgich deb ataladi. Keling, uning xususiyatlarini kristalli nuqsonlarsiz ko'rib chiqaylik.

0° K haroratda (mutlaq nol), yarimo'tkazgichning barcha elektronlari o'z orbitalarida, ya'ni. erkin manfiy tashuvchilar yo'q (6 - rasm). Agar yarimo'tkazgichlarda elektr maydoni yaratilsa, unda tok bo'lmaydi. Shuning uchun, mutlaq nolida ular ideal dielektrlardir.

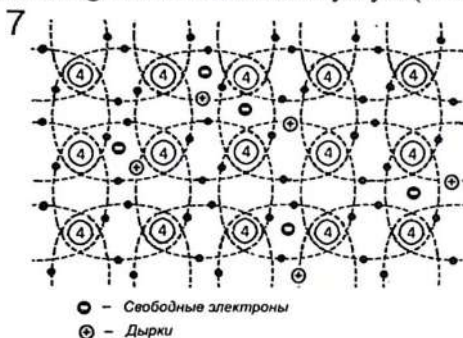


6 –rasm. 0° K haroratda (mutlaq nol), yarimo'tkazgichning barcha elektronlari o'z orbitalarida, ya'ni. erkin manfiy tashuvchilar yo'q tasviri.

Harorat ko'tarilgach, zarrachalarning issiqlik harakati kuchayadi va valentlik elektronlarining bir qismi atomlardan ajralib, erkin bo'ladi. Biroq, bunday ajratish atomning elektr neytralligini buzilishiga olib keladi, chunki uning musbat zaryadi manfiy elektron bilan kompensatsiyalanmaydi va atom musbat ionga aylanadi.

Yarimo'tkazgichlarda yirtilib ketgan elektron ikkita qo'shni atom uchun odatiy holdir va manfiy zarracha o'rnida paydo bo'ladigan musbat zaryad har qanday atomga emas, balki bog'lanishning o'ziga tegishli.

Olingan musbat zaryad tuynuk deb ataladi va yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi uchun muhim rol o'ynaydi (7 -rasm).



7 -rasm. Yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi.

Teshiklarning paydo bo'lish mexanizmining o'zi shuni ko'rsatadi, toza yarimo'tkazgichda issiqlik harakati paytida olingan erkin manfiy zarrachalar soni teshiklar soniga teng. Boshqacha aytganda, erkin elektronlarning n konsentratsiyasi paydo bo'lgan teshiklarning p konsentratsiyasiga teng. U o'z konsentratsiyasi deb ataladi va mos ravishda n_i va p_i sifatida belgilanadi (i indeksi - inglizcha intrinsic - o'ziga xos, ajralmas, o'ziga xos so'zidan).

Shubhasiz, kim yozishi mumkin:

$$n_i = p_i$$

Xulosa qilish mumkinki, haroratning oshishi erkin oqim tashuvchilar konsentratsiyasini va elektr o'tkazuvchanligini oshiradi.

Bu munosabatlar quyidagi formulada ko'rsatilgan:

$$n_i = p_i = a \cdot T^{3/2} \cdot e^{-(dW_3 / 2kT)}$$

qayerda:

a - ma'lum bir yarimo'tkazgichning doimiy xarakteristikasi;

T - ma'lum bir vaqtda yarimo'tkazgichning mutlaq harorati;

e = 2.718 - natural logarifmaning asosi;

ΔW_z - yarimo'tkazgichning taqiqlangan zonasining kengligi;

k = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J / K - Boltzman konstantasi.

Bu formuladan kelib chiqadiki, ichki konsentratsiya haroratning oshishi bilan katta (eksponentli) oshadi. Katta haroratga bog'liqlik $T^{3/2}$ faktoridan emas, balki u e darajasining kattaligidan kelib chiqadi, ularda DW_z va T mavjud, shuning uchun taqiqlangan zonalar kengligidagi kichik farqlar (germaniyada 0,72 eV va 1.12 eV selitsiy) yarimo'tkazgichlarning ichki konsentratsiyasida sezilarli farqqa olib keladi.

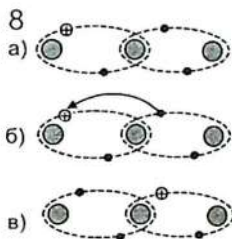
Yuqoridagi formuladan foydalanib, siz o'z konsentratsiyangizni xona haroratida topishingiz mumkin:

- kremniy: $n_i = 2,0 \times 10^{10}$ l sm³;

- Germaniya: $n_i = 2,5 \times 10^{13}$ l sm³

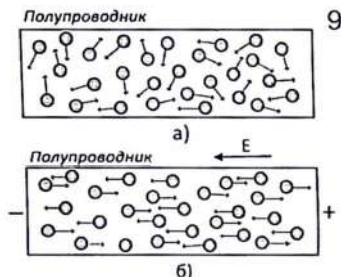
... Bu misol shuni ko'rsatadiki, xona haroratida kremniyning tashuvchi konsentratsiyasi germaniynikiga qaraganda kattaligidan 3 baravar past bo'ladi, bu esa kremniyning kengroq diapazoni bilan bog'liq.

Haroratning oshishi bilan bir vaqtda erkin oqim tashuvchilar soni ko'payadi, lekin elektronlar teshiklar bilan o'zaro ta'sirlashganda va ikkala zaryad bir -birini neytrallashganda rekombinatsiya ham oshadi. Shunday qilib, yarimo'tkazgichda dinamik muvozanat o'rnatiladi - erkin tashuvchilar konsentratsiyasi ma'lum bir harorat uchun o'zgarmaydi.



8 -rasm. Teshik qo'shni atomdan valentlik elektronini tortsa, birinchi atom neytral bo'ladi, ikkinchisida teshik paydo bo'lishi.

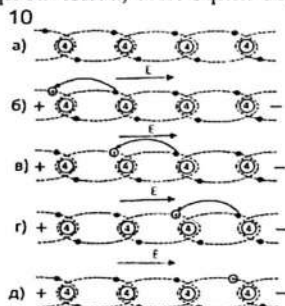
Teshikni elektronni jalb qila oladigan musbat zaryad bilan solishtirish mumkin. Agar teshik qo'shni atomdan valentlik elektronini tortsa, birinchi atom neytral bo'ladi, ikkinchisida teshik paydo bo'ladi (8 -rasm). Shunday qilib, xona haroratida sof yarimo'tkazgichda barcha tok tashuvchilarning tartibsiz harakati mavjud deb taxmin qilishimiz mumkin (9a -rasm).



9 –rasm. Kristalga tashqi elektr maydon E qo'llanilganda, erkin tok tashuvchilarning xotik harakati.

Kristalga tashqi elektr maydon E qo'llanilganda, erkin tok tashuvchilarning xotik harakati yo'nalishli xarakterga ega bo'ladi (9b -rasm).

Teshiklar ijobiy bo'lgani uchun ular maydon yo'nalishi bo'yicha, elektronlar esa manfiy bo'lib, maydonga qarshi harakat qiladi. Olingan tok, diffuz tokdan farqli ravishda, drift oqimi deyiladi.



10 –rasm. Har xil vaqtda yarim o'tkazgichli kristall panjaradan gorizontall qatorni.

Bu 10 -rasmida batafsilroq tushuntirilgan bo'lib, u yarim o'tkazgichli kristall panjaradan gorizontall qatorni ko'rsatadi, lekin har xil vaqtda.

Dastlab, elektr maydoni kristallga ta'sir qilmaydi va barcha valentlik elektronlari joyida a).

Hozirgi vaqtda v) teshik allaqachon ishg'ol qilingan va kristallning oxirida emas, balki o'ngga siljigan.

D) teshik teshikdan ham o'ng tomonga siljidi va e) u kristallning o'ng tomoniga yetdi.

Bundan ma'lum bo'ladiki, yarimo'tkazgichda elektr maydoni mavjud bo'lganda, elektronlarning yo'naltirilgan 23 lection harakati (metallardagi kabi), balki teshiklarning yo'naltirilgan harakati ham bor. Shunday qilib, yarimo'tkazgichlar ham 23 lection, ham teshik o'tkazuvchanligiga ega.

Elektron o'tkazuvchanlik N o'tkazuvchanlik (manfiy – manfiy), teshik – P o'tkazuvchanlik (pozitivdan – musbat) deb ataladi.

Bundan tashqari, b) vaqtida, elektr maydon E kristalga chapdan o'ngga qo'llanilganda, eng chap 23 lection musbat qutbga o'tadi. Bu joyda teshik paydo bo'ladi, uni 23 lectr qo'shni 23 lection egallaydi.

Biz bu erda muhim narsani ta'kidlamoqchimiz. Qat'iy aytganda, toza yarimo'tkazgich aslida faqat 23 lection o'tkazuvchanlikka ega. U, harakatiga ko'ra, ikki toifaga bo'lingan.

Ulardan birinchisi erkin elektronlarni o'z ichiga oladi, ular sezilarli energiyaga ega va atomlar o'rtasida erkin harakatlanadi. Ikkinchi toifaga past energiyali valentli elektronlar kiradi, ular atomdan atomga keskin harakat qiladi.

Nazariya va amaliyot shuni ko'rsatadiki, sakrashga o'xshash 23 lection harakatini e'tiborsiz qoldirish va aksincha, teskari yo'nalishda harakatlanadigan teshiklar deb nomlangan xayoliy musbat zarralarni kiritish qulayroqdir. Bunday almashtirish yarimo'tkazgichlardagi hodisani tushunish va o'rganishni ancha osonlashtiradi.

1.4. O'tkazgichlar, yarim o'tkazgichlar, izolyatorlar.

Elektronni valent zonadan o'tkazish zonasiga o'tkazish uchun tashqaridan malum energiya berish kerak. Elektron turg'un holatdan (to'ldirilgan holatdan) . erkin holatga (o'tkazish zonasiga) o'tishda

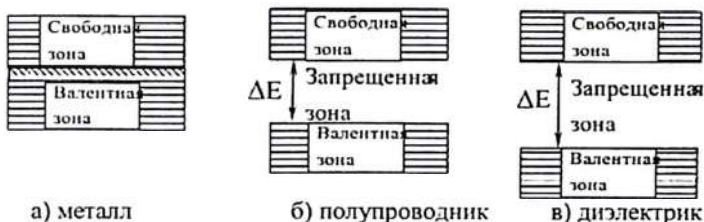
yengish kerak bo'lgan man qilingan zonaniroq kengligi qattiq jismlarni metallar, yarim o'tkazgichlar va izolyatorlarga ajratishning asosiy mezonlaridan biridir. Bunga keltirilgan sxemalardan osongina ishonch hosil qilish mumkin. Zonalarning elektronlar bilan to'ldirilganligi va man qilingan zonaning kengligiga qarab to'rtta hoi bo'lishi mumkin. Eng yuqori zona elektronlar bilan qisman to'ldirilgan, ya'ni unda bo'sh sathlar mavjud. Bu holda elektron juda kam energiya olganda ham shu zonaning yuqoriroq energetik sathiga o'tishi, ya'ni erkin bo'lib, tok o'tkazishda ishtirok etishi mumkin. Demak, qattiq jismda qisman to'ldirilgan zona mavjud bo'lsa, bu jism elektr tokini o'tkazadi. Aynan shu xususiyat metallarga xosdir. Agar valent zona va o'tkazish (erkin) zonasi bilan qisman ustma-ust tushsa ham, qattiq jism elektr tokini o'tkazuvchi bo'ladi. Bu Mendeleyev elementlar davriy sistemasidagi II guruh elementlari Be, Mg, Ca, Znlarga xos xususiyatdir. Energetik sathlari faqat valent zona va o'tkazish zonasidan iborat qattiq jismlar, man qilingan zonasining kengligiga qarab dielektriklar va yarim o'tkazgichlarga ajratiladi. Agar kristallning man qilingan zonasining kengligi bir necha elektron-volt bo'lsa, issiqlik harakati elektronni valent zonadan o'tkazish zonasiga sakrata olmaydi va bunday kristallarga dielektriklar deyiladi. Agar man qilingan zona uncha katta bo'lmasa ($AE \sim 1$ eV), elektronni valent zonadan o'tkazish zonasiga issiqlik yoki biror boshqa ta'sir bilan ko'chirish mumkin. Bunday kristallarga yarim o'tkazgichlar deyiladi. Masalan, germaniy uchun $AE = 0,72$ eV, kremniy uchun $AE = 1,11$ eV ni tashkil qiladi. Shunday qilib, o'tkazgichlar uchun man qilingan zonaning kengligi no'lga teng, yarim o'tkazgichlar uchun 2eV dan oshmaydi, dielektriklar uchun esa 2eV dan katta bo'ladi.

1.5. O'tkazgichlar, dielektriklar va yarim o'tkazgichlar.

O'zlarining elektr o'tkazuvchanlik xossalariga qarab qattiq jismlar metallarga (o'tkazgichlarga), yarim o'tkazgichlarga va dielektriklar (izolyatorlar)ga bo'linadi.

Metallar energetik zonali elektron bilan to'la band qilinmagan bo'ladi (11a-rasm) va ularga tashqaridan kuchsiz elektr maydon ta'sir etsa, elektronlar yuqorida joylashgan uzluksiz bo'sh o'tkazuvchanlik zonalariga o'tib olib, ma'lum yo'nalishda harakat qiladi va elektr toki hosil bo'ladi. Sababi metallarda valent va o'tkazuvchanlik energetik

zonalar bir-birlari bilan “chaplashib” uzluksiz zona hosil qilgan bo‘ladi.



11-rasm. Materiallarda energetik zonalar.

Yarim o‘tkazgichlarga esa valent zona elektronlar bilan to‘lgan bo‘lib, agar elektronlar o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tmasa, ular erkin bo‘lmaydi (11b-rasm). Bu zona valent zonadan $\Delta E \sim 0,1 \div 2eV$ energetik masofada joylashgan bo‘ladi, unda ΔE – taqiqlangan zonaning eni. Agar elektronlar valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonaga o‘tmasalar, tashqi elektr maydon ta’siri bilan tok hosil bo‘lmaydi. Yarim o‘tkazgichda elektr toki hosil bo‘lishi uchun, ma’lum tashqi faktor (temperatura, yorug‘lik va h.k.) yordamida elektronlar valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonaga o‘tgan bo‘lishi kerak.

Dielektriklarda esa o‘tkazuvchanlik zonasi bilan valent zonasi orasidagi energetik masofa eng kamida $\Delta E = 2eB$ va undan ko‘proq bo‘lib, umuman erkin elektronlar bo‘lmaydi (11v-rasm).

Yarim o‘tkazgichlarga asosan kristall strukturaga ega bo‘lgan juda ko‘p qattiq jismlar kiradi. Yarim o‘tkazgichlar atomlar (germaniy, kremniy, tellur, selen va h.k.) shaklida va kimyoviy birlashmalar shaklida (sulfidlar, selenidlar va h.k.) uchraydi.

Elektr tokini yaxshi o‘tkazadigan, ya’ni yuqori elektr o‘tkazuvchanlik xususiyatiga ega bo‘lgan moddalar o‘tkazgichlar deyiladi. Elektr o‘tkazuvchi moddalar solishtirma qarshiligining katta kichikligiga qarab elektr tokini yaxshi o‘tkazadigan elektr o‘tkazgichlar ($\rho = 10^{-6} \div 10^{-4} \text{ Om}\cdot\text{sm}$), izolyatorlar ($\rho = 10^5 \div 10^{18} \text{ Om}\cdot\text{sm}$) va yarim o‘tkazgichlar ($\rho = 10^{-4} \div 10^5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$)ga bo‘linadi. Metallar, elektrolitlar va plazmalar elektr o‘tkazuvchidir.

Elektr o‘tkazuvchanligi yuqori bo‘lgan modda yoki jism o‘tkazgich deb ataladi. O‘tkazgichlar ikki xil bo‘ladi: birinchi tur o‘tkazgichlari va ikkinchi tur o‘tkazgichlari.

Erkin elektronlarni soni nihoyatda ko'p bo'lgan mis, alyuminiy kabi materiallar birinchi tur o'tkazgichlar deb aytiladi.

Amaliyotda keng qo'llaniladigan o'tkazgich elektr simi. Bitta yoki bir necha tomirli simlardan iborat bo'lgan metall o'tkazgich elektr simi deyiladi. Tovar sifatida ishlab chiqarilgan va servis sohasida keng foydalanadigan elektr simlar quyidagi turlarga bo'linadi: izolyatsiyalangan, izolyatsiyalanmagan elektr simi; cho'lg'ambop elektr simi; montaj simlari, elektr shnurlari, uzaytirgich (udlinitel) va boshqa turlarga bo'linadi.

Elektr simi elektr energiyasini o'zatisht va taqsimlash, elektr va radio signallarini uzatish hamda elektr mashinalar, transformatorlar, o'lchash asboblari va boshqa asbob-uskunalar cho'lg'amlarini tayyorlashda qo'llaniladi.

Hozirgi zamonda simli aloqa katta ahamiyatga ega. Axborotni sim orqali elektr signallar vositasida uzatish va qabul qilish simli aloqa deb aytiladi. Simli aloqa elektr aloqaning bir turi bo'lib, undan ko'pincha radioaloqa bilan birga foydalaniladi.

Qattiq jismlar kabi, suyuqliklarning ham dielektrigi, o'tkazgichi va yarim o'tkazgichi bo'ladi. Dielektriklar jumlasiga distillangan suv, o'tkazgichlar jumlasiga elektrolitlarning, ya'ni kislota, ishqor va tuzlarning eritmalari kiradi. Suyuq yarim o'tkazgichlar jumlasiga, eritilgan selen, eritilgan sulfidlar kiradi.

Moddalarning qisman yoki to'liq ionlardan tashkil topgan eritmalari yoki suyultirilgan holatdagi moddalar elektrolitlar yoki ikkinchi tur o'tkazgichlari deyiladi. Elektrolit eritmalarining xossalari o'rganish bilan tokning yangi kimyoviy manbalari yaratiladi.

Elektrolitlarning suvdagi eritmalarida yoki aralashmalarida zaryad tashuvchilar musbat va manfiy zaryadlangan ionlar bo'lgani uchun elektrolitlar ionli o'tkazuvchanlikka ega.

Suyuqliklar elektronli o'tkazuvchanlikka ham ega bo'lishi mumkin. Masalan, suyuq metallar ana shunday o'tkazuvchanlikka ega.

Elektrolit orqali elektr toki o'tganda elektrodalarda elektrolit tarkibiy qismlarining ajralib chiqish jarayoni elektroliz deyiladi.

Texnikada elektroliz turli maqsadlarda keng qo'llaniladi. Bir metallning sirti boshqa metallning yupqa qatlami bilan elektrolitik usulda qoplanadi (nikellash, xromlash, emallash, mis yalatish va h.k.). Bu mustahkam qoplama sirtini zanglashdan asraydi. Elektroliz yordamida turli buyumlar metall qatlami bilan qoplanadi (galvanostegiya),

shuningdek, kerakli buyumlarning relefi metall nusxalari, masalan tipografiya klishe'lari tayyorlanadi (galvanoplastika).

Elektroliz sof metallar, xususan mis olishda keng qo'llaniladi. Boksitlar aralashmasidan alyuminiy elektroliz yo'li bilan olinadi. Xuddi shu usul tufayli alyuminiy arzon, texnika va turmushda temir bilan bir qatorda eng ko'p tarqalgan metall bo'lib qoldi.

Amaliyotda kimyoviy tok manbai, ya'ni galvanik elementlar, batareyalar va akkumulyatorlar katta ahamiyatga ega. Ular kimyoviy energiyani o'zgarish tok elektr energiyasiga aylantirib beradilar. Kimyoviy tok manbalari transportda, radiotexnikada, avtomatik boshqarish sistemalarida keng ko'lamda qo'llaniladi.

Texnikada va amaliyotda eng ahamiyatli materiallardan biri ham elektr o'tkazmaydigan moddalar, dielektriklardir.

Texnikada ishlatiladigan dielektriklar har xil. Ular tabiiy va sun'iy bo'lishi mumkin. Ammo ular fizik tuzilishlari jihatidan uch turga ajratiladi: 1) gaz; 2) suyuq; 3) qattiq.

Texnikada ishlatiladigan barcha izolyatsiya materiallari elektr maydoni ta'sirida ma'lum energiya nobudligiga sabab bo'ladi. Tabiatda absolyut dielektrik yo'q. Dielektrikdan oz bo'lsa-da, tok o'tadi, natijada ma'lum energiya issiqlik energiyasiga aylanadi. Agar dielektriklar o'zgarish kuchlanish ta'siri ostida bo'lsa, unda hosil bo'luvchi nobudliklar faqat Lens-Joul qonuniga bog'liq bo'ladi.

Dielektrikka o'zgaruvchan kuchlanish ta'sir etsa, unda qo'shimcha nobudliklar ham bo'ladi. Bunday energiya nobudligi dielektrik gisteresidir. Bu nobudlik quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$A_{it} = k \cdot f \cdot E^2 \quad (1)$$

bu yerda k – material xususiyatiga bog'liq bo'lgan koeffitsiyent; f – o'zgaruvchan tok chastotasi; E – elektr maydonining kuchlanganligi.

(1) formulasi bo'yicha dielektrik gisteresiz nobudligi chastota oshgan sari ko'payadi. Yuqori chastotali o'zgaruvchan kuchlanishlarda, dielektrik isitish texnikasi va boshqalarda uning hosil qiladigan nobudliklari juda katta ahamiyatga ega bo'ladi.

Elektr energiyasi hosil qilish, yuborish va iste'mol etishda elektr o'tkazuvchi qismlar orqali o'tgan tok tarqalib ketmasligi uchun o'tkazgichlar bir-biridan maxsus materiallar vositasida ajratiladi. Bular elektr izolyatsion materiallar deb ataladi.

Elektr izolyatsion materiallar qanday kuchlanishlarga bardosh berishiga qarab yuqori kuchlanish texnikasi va past kuchlanish texnikasi materiallariga bo'linadi.

Yuqori kuchlanish texnikasi materiallarining elektr pishiqligi yuqori, elektr nobudligi va elektr o'tkazuvchanligi oz, namga chidamli bo'lishi shart va ularda elektr nobudligi mumkin qadar kam bo'lishi lozim.

Past kuchlanishli texnikasida ishlatiladigan materiallarga turlicha talablar qo'yiladi. Eng asosiy talablaridan biri shuki, vaqt o'tishi bilan ularning xossalari o'zgarmasligi lozim. Shuningdek, ular eskirmasligi lozim. Amaliyotda tovar sifatida qo'llaniladigan izolyatsion mayetrialar klassifikatsiyasini ko'rib chiqamiz.

Takrorlash uchun savollar

1. Yarimo'tkazgich, dielektrik va yarim'tkazgichlarning asosiy farqlari nimada?
2. Kremniyning asosiy xossalarini ayting.
3. Toza krembiy olish texnologiyasi qanday?
4. Donor va akseptor kirishmalar deganda nimani tushunasiz?
5. Agar kremniyga milliondan bir ulushda donor kirishma kiritilsa, uning o'tkazuvchanligi qanday o'zgaradi?

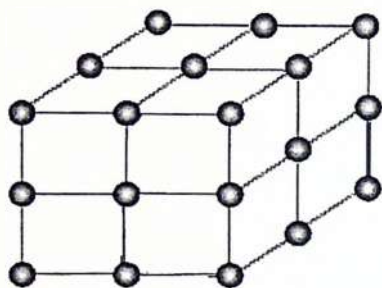
2-§. YARIMO'TKAZGICHLARDA NUQSONLARNING TURLARI. KIRISHMAVIY VA XUSUSIY YARIMO'TKAZGICHLAR.

Odatda kristall deganda katta bo'laklar uchun ham, mayda bo'laklar uchun ham bir xil bo'lgan geometrik muntazam shakldagi moddalar tushuniladi. "Kristall" – yunoncha so'z bo'lib, qadimgi yunonlar muzni «kristallos» deb ataganlar, keyinchalik bu so'z bilan tabiiy kvarsni atay boshlaganlar. Vaqt o'tishi bilan bu so'zning ma'nosi kengaya borib, hamma ko'p qirra ko'rinishga ega bo'lgan tabiiy jismlarni kristall deb atala boshlandi. Hozirda kristall deganda ichki tuzilishi aniq tartibli bo'lgan jismlar tushuniladi. Kristallni hosil qilgan atom, ion yoki molekulalardan iborat elementlar geometrik to'g'ri, qonuniy va davriy fazoviy panjarani tashkil etadi (rasm-5). Odatda kristallar shartli ravishda real va ideallarga bo'linadi. Kristall jismlar tuzilish elementlarining fazoda taqsimlanishi tartiblilik bilan amorf moddalardan ajralib turadi. Demak, amorf moddalarning atomlarini fazoda taqsimlanishi tartibsiz bo'lib, ular yaqin tartibga ega bo'ladilar.

Agar kub shaklidagi osh tuzi kristallchasini mayda bo'laklarga bo'lib, bu bo'lakchalarni mikroskop ostida kuzatsak, biz ularning o'lchamlariga bog'liq bo'lgan holda kub (yoki bir nechta yopishib qolgan kublar) shakliga ega ekanligini ko'ramiz. Agar kristallarning bo'linish jarayonini fikran davom ettirishni tasavvur qilsak, u holda biz atom (molekulalar yoki ionlar) larning juda kam sonlaridan iborat bo'lgan kristallarning elementar yacheykalariga kelamiz.

Kristallarni o'rganishning zamonaviy usullari kristallarning elementar yacheykalari ichida zarralar (atom, molekulalar, ionlar)ni qanday joylashganligini bilishga imkon beradi. Rasmda osh tuzi kristallining ichida natriy va xlor ionlarining joylashish chizmasi keltirilgan. Kristall panjarada joylashgan zarralarning o'rni kristall panjara tugunlari deyiladi.

Biror bir kristallni tashkil etgan elementlar fazoviy panjaraning tugunlarida joylashadi. Bu zarrachalarning issiqlik harakatlari ularni tugunlar atrofidagi tebranma harakatida namoyon bo'ladi va ular zarrachalarning tebranma harakatining markazi hisoblanadi. Harorat ortishi bilan zarrachalar tebranma harakati amplitudasi ortib boradi.



12 – rasm. Kristall tuzilishlar.

Kristall to'g'risida gapirilganda, uning bir xususiyatini hisobga olish kerak, ya'ni u qanday kattalikka ega bo'lmasin uni bitta juda katta molekula deb qaraladi. Chunki, molekula ikki va undan ortiq atomlardan tashkil topadi. Kristallning amorf jismlardan farqi uning tartibli tuzilishiga ega bo'lganligi uchun u simmetriya qonunlariga bo'ysunadi.

Quyida kristall tuzilishlardagi ba'zi simmetriya elementlari bilan tanishib chiqamiz:

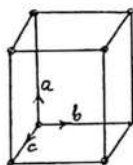
1. Kristalldan o'tkazilgan to'g'ri chiziqlarning har ikkala tomonidan barobar masofada bir xil geometrik shakllar (tomonlar, burchaklar, nuqtalar, qirralar va cho'qqilar joylashadi)ga bo'ysunuvchi kristall tuzilish ichidagi xayoliy nuqtaga (markaz) egaligi.

2. Kristall yacheyka bir marotaba to'liq aylanganda bir necha marotaba o'zi bilan o'zi ustma –ust tushadi. Bu aylanish o'qiga simmetriya o'qi deb ataladi va g_n yoki I_n xarflari bilan belgilanadi, bunda n – o'qning tartibini ifodalaydi. Bir marta to'la aylanganda kristall tuzilish o'zi bilan o'zi 4 marta ustma-ust tushsa, u holda bu simmetriya o'qi 4-chi tartibli bo'ladi. Umuman bir marta to'la aylanganda « n » marta ustma-ust tushsa, n -chi tartibli simmetriya o'qi deyiladi. Kristallarda faqat ikkinchi, uchinchi, to'rtinchi, beshinchi va oltinchi tartibli simmetriya o'qlari bo'lishi mumkin. Oltinchidan katta simmetriya o'qlari bo'lmaydi.

3. Simmetriya tekisligi kristallni shunday ikki bo'lakka bo'ladiki, ulardan biri ikkinchisining ko'zgudagi aksini ifodalaydi va « σ » xarfi bilan belgilanadi.

Kristall tuzilishlar quyidagi turlarga bo'linadi: oddiy, hajmi markazlashgan, yoni markazlashgan (13, 14 va 15-rasmlar). Oddiy kub panjarada, atomlar faqat uning tugunlarida joylashadi. Hajmi markazlashganda esa atomlar uning tugunlaridan tashqari, kubning markazida ham joylashadi, yoni markazlashganda esa, uning tugunlardan tashqari, har bir tomonning markazlarida ham joylashadi. Shu yerda kristall panjalarining koordinasion sonlari haqida ham aytib o'tish joiz. Kristall panjaradagi hoxlagan atomni eng yaqin bir xil masofada joylashgan atomlarning soniga qarab: I, II, III ... n – koordinasion sonlari deb ataladi.

1. Elementar yacheykasi kub shaklida bo'lgan kristall panjara quyidagi ko'rinishga ega:



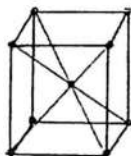
13 – rasm.

Har doim bu kub elementar yacheykasida 1 ta atom bo'ladi.

$$a = b = c; \quad \frac{1}{8} \cdot 8 = 1; \quad \angle AB = \angle BC = \angle AC$$

2. Hajm markazlashgan kub elementar yacheyka.

$$\frac{1}{8} \cdot 8 + 1 = 2;$$



14 – rasm.

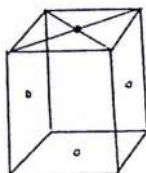
1-koordinasion son 8 ga teng.

2-koordinasion son 6 ga teng.

Bu kub elementar yacheykada 2 ta atom mavjud bo'ladi.

3. Tomonlari markazlashgan kub elementar yacheyka. Agar elementar yacheykalar ikkita va undan ko'p atomni egallagan bo'lsa,

bunday elementar yacheykalar murakkab elementar yacheykalar deyiladi.



15- rasm

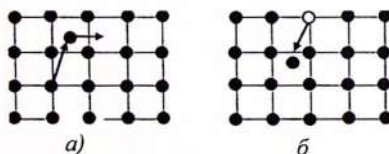
Bu elementar yacheykalarda 4 ta atom mavjud.

$$\frac{1}{8} \cdot 8 + \frac{1}{2} \cdot 6 = 4$$

2.1. Kristallardagi nuqsonlar

Agar kristall panjarada atomlar barcha kristall yo'nalishlarida bexato davriy ravishda joylashgan bo'lsa, bunday kristallni ideal kristall deyiladi. Real kristalllarda turli sabablarga ko'ra nuqsonlar uchrab turishi yuqorida qayd etilgan usullar bilan isbotlangan.

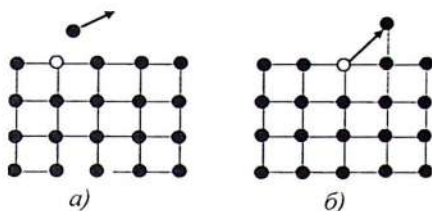
Kristall panjaraning nuqsonlari ularning mexanik, issiqlik, elektr va boshqa fizik-kimyoviy xossalarga katta ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun, nuqsonlarning asosiy turlari va hosil bo'lish mexanizmlari bilan qisqacha tanishib o'tamiz.



16-rasm.

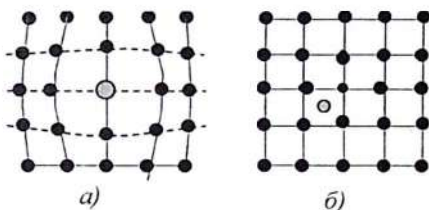
Kristall ichidagi to'planish joyiga qarab nuqsonlar nuqtaviy, chiziqli, va hajmiy nuqsonlarga bo'linadi.

Issiqlik harakati tufayli kristall panjara tugunlaridagi atomlar o'z joylarini tark etib (16-a,v rasm) tugunlar orasiga o'tib olsa, bunday nuqsonni nuqtaviy yoki Frenkel nuqsonlari deyiladi.



17-rasm.

Atom ketib qolgan joyini “vakant” joy deb ataladi. “Vakant” joylar qo’shni tugundagi atomlar tomonidan egallanishi va natijada atomlarning (tugunlarning) kristall bo’ylab estafetali harakati sodir bo’lishi mumkin. Nuqtaviy nuqsonlar sirt qatlamidagi atomlarning birontasini butunlay bug’lanib ketishi yoki bug’langan atom kristall sirtida yangi qatlam tugunini hosil qilishi(17-a,b rasm) tufayli ham sodir bo’lishi mumkin. Bunday nuqsonlarni Shottki nuqsonlari deyiladi.

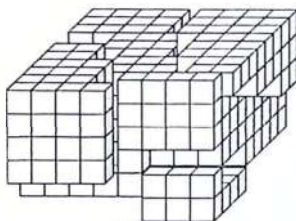


18-rasm.

O’z joyini yo’qotgan atomlar “vakant” joylarga yaqinlashganda, ularning ushlanib qolishi natijasida “vakant” joyini to’ldirishi mumkin. Bu hodisani nuqsonlarning rekombinasiyasi deyiladi. Nuqsonlarning hosil bo’lishidan rekombinasiyalanishigacha o’tgan vaqtni nuqsonlarning yashash vaqti deyiladi. Nuqtaviy nuqsonlar kristall panjaraga begona element atomlari kirib qolganda ham hosil bo’ladi. Bunda begona atom tugunlarning biriga(18-a rasm) yoki ularning oralig’iga joylashishi(18-b rasm) mumkin. Natijada kristallning shu joyi deformasiyalanadi.

Chegaraviy yoki vintli deb atalgan dislokasiyalarni chiziqli nuqsonlar deyiladi. Ular kristallarda tashqi kuchlar ta’sirida noelastik siljish deformasiyasi sodir bo’lganda kuzatiladi (19-rasm).

Sirt nuqsonlariga quyidagilarni kiritish mumkin:



19-rasm.

a) tashqi muhit bilan ta'sirlashish natijasida kristall sirtiga begona element atomlarining o'tirib qolishi hamda shu tufayli sirtida oksid qatlamlarning hosil bo'lishi;

b) kristall panjaraning ayrim joylarida fazoviy yo'nalishlarning o'zgarib qolishi tufayli ichki nuqsonlar paydo bo'ladi.

Kristall ichida to'planib qolgan nuqtaviy nuqsonlar, darz ketgan joylar, bo'shliqlar, stexiometriyaning buzilishi (qattiq eritmalarda) hajmiy nuqsonlarni tashkil etadi.

2.2. Yarimo'tkazgichlardagi kirishma atomlarining o'tkazuvchanligi.

Sof germaniyning xona haroratidagi elektr qarshiligi misnikidan qariyb 4 million barobar, kremniy va selen uchun esa undan yuqori (5 - rasmga qarang). Shunday qilib, sof yarimo'tkazgichlar izolyatorlarga yaqinlashadi va yarimo'tkazgichli elementlarni yasash uchun ishlatilmaydi.

Yarimo'tkazgichlar, agar ular tarkibida boshqa moddalar aralashmalari bo'lsa, elektr o'tkazuvchanligini keskin oshiradi. (Kirishmalarning qo'shilishi doping deb ataladi.) Nopok moddalarning ozgina qo'shilishi ularning o'tkazuvchanligini yuzlab va minglab marta oshiradi.

Keyinchalik, biz faqat kremniyning xususiyatlarini ko'rib chiqamiz, chunki boshqa yarimo'tkazgichlarda bu hodisalar o'xshash.

Agar tozalangan kremniyga mishyak, fosfor yoki surma kabi elementlardan biri (barcha V valentliklari) kirishma sifatida qo'shilsa, erkin manfiy zarrachalar soni musbat teshiklar sonidan ko'p bo'ladi va

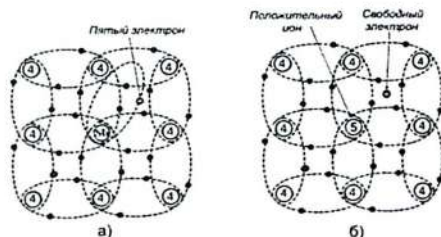
natijada kremniy bo'ladi. elektron o'tkazuvchanlik (N-kremniy) ustunlik qiladi.

Elementlardan biri - alyuminiy, indiy yoki bor (barcha III valentlar) sof toshga qo'shilsa, teshiklar soni erkin elektronlar sonidan kattaroq bo'ladi va hosil bo'lgan kremniyda teshik o'tkazuvchanligi (P - kremniy) ustun bo'ladi.

Elektronlarning ko'payishiga olib keladigan aralashmalar donorlar deb ataladi va teshiklarning ustunligiga sabab bo'lganlar akseptorlardir.

Keling, bu hodisalarni batafsilroq tasvirlab beraylik.

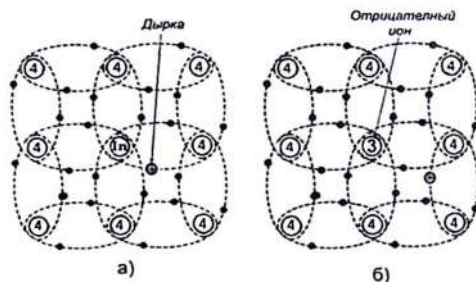
11



20 –rasm. To'rtta valentli elektron bilan to'rtta qo'shni kremniy atomlari bilan bog'langan sof kremniyga surma (Sb) qo'shilgandagi holati.

20a -rasmida, to'rtta valentli elektron bilan to'rtta qo'shni kremniy atomlari bilan bog'langan sof kremniyga surma (Sb) qo'shilgan, uning beshinchi elektroni esa o'zgarmagan holda qoladi. Erkin elektronga aylanish uchun minimal energiya (0,01 eV) kerak. Shu bilan birga, xona haroratida elementar zarrachalarning o'rtacha issiqlik energiyasi 0,036 eV ni tashkil qiladi va shuning uchun uning erkin bo'lishi uchun bu energiya etarli, surma atomi esa musbat iondir (20b -rasm).

Beshinchi elektronni olib tashlaganimizda, teshik paydo bo'lmaydi, chunki valentlik aloqasi uzilmagan. Kristal elektr neytral bo'lib qoladi, chunki musbat donor ionlari erkin elektronlar bilan qoplanadi. Shunday qilib, olingan N-kremniy elektron o'tkazuvchanlikka ega, bu yarim-o'tkazgichdagi donor aralashmalarining konsentratsiyasiga bog'liq.



21 –rasm. Sof kremniyga indiy (In) kirishmasi kiritilgandagi holati.

21a -rasmida sof kremniyga indiy (In) qo'shiladi. Bunday holda, bog'lanishlardan biri yo'qoladi, chunki indiyda faqat uchta valentli elektron bor. Bu yarimo'tkazgichning qo'shni valent elektronining o'rmini egallash uchun etarli energiyaga ega bo'lgan tuynuk paydo bo'lishi bilan tengdir (21b -rasm).

Termal tebranishlar natijasida bu teshik kristall ichida xaotik tarzda harakat qiladi va indiy atomi, qo'shni elektronni qabul qilgandan so'ng, manfiy ionga aylanadi. Salbiy ionlarning akseptorlarining elektr zaryadi xaotik harakatlanuvchi teshiklar bilan qoplanadi va kristal umuman elektr neytraldir.

Shunday qilib olingan P-kremniy teshik o'tkazuvchanligi bilan ijlalib turadi, bu yarimo'tkazgichdagi akseptor aralashmalarining konsentratsiyasiga bog'liq.

Kirishmalarni qo'shish natijasida olingan elektr o'tkazuvchanligi kirishma o'tkazuvchanligi deb ataladi va yarimo'tkazgich elementidagi elektr tokining oqimida asosiy rol o'ynaydi.

Shubhasiz, konsentratsiyaning oshishi bilan yarimo'tkazgich o'tkazuvchanligi oshadi. Ammo, agar bu konsentratsiya juda yuqori bo'lsa (kritik konsentratsiya deb nomlanadi), yarimo'tkazgichning elektr xususiyatlari metallga yaqinlashadi va yarimo'tkazgichlarning o'zi degenerat deb ataladi. Kremniy uchun $N_{cr} = 10^{18} \text{ sm}^{-3}$. Yarimo'tkazgichlarning zamonaviy texnologiyasida degeneratsiyalangan yarimo'tkazgichlar tunnel diodlari va yarimo'tkazgichli yorug'lik generatorlari (lazer) ishlab chiqarishda qo'llaniladi⁴.

⁴ <https://radio-samodel.ru/poluprovodnik.html>

Masala:

1. Oddiy kub kristall panjarada – kristall panjara doimiysi (ya'ni, 2 ta atom o'rtasidagi masofalar) a ga teng, unda II va III – koordinasion sonlar orasidagi masofalar topilsin?

2. Agar oltin – oddiy kub kristall panjara shaklda kristallangan bo'lsa va atomlar orasidagi masofa $a = 5 \times 10^{-8}$ sm bo'lsa, 1 sm^{-3} hajmli oltin kristallida qancha elementar yacheyka bo'ladi?

3. 10 gr. kumushda qancha kumush atomi bor?

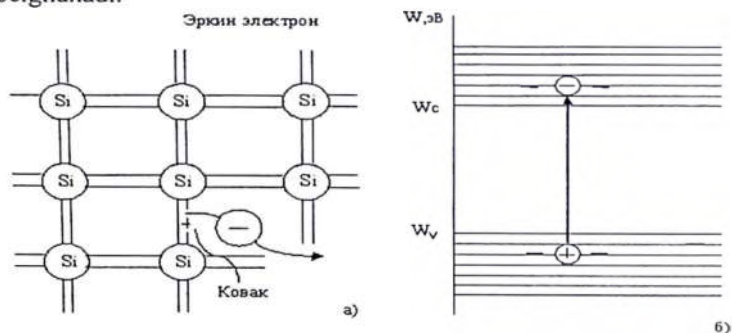
4. Miller indeksi – $[\frac{1}{2}, 1, \frac{1}{2}]$, $[-2, 1, -1]$, $[-1, -2, \frac{1}{2}]$ bo'lgan kristall panjara tekisliklarini chizing.

Takrorlash uchun savollar

1. Ideal va real kristallarning asosiy farqlari nimada?
2. Nuqsonlarning turlari va paydo bo'lish sabablarini ayting?
3. Trenkel va Shottki nuqsonlarini tushuntiring?
4. I. Radiatsion nuqsonlarning paydo bo'lish mexanizmlari qanday?
5. Yarimo'tkazgich kristallardagi boshqa nuqsonlar?

3-§. YARIMO‘TKAZGICHLARDA ELEKTRON VA KOVAKLAR STATISTIKASINING ASOSLARI.

Yarim o‘tkazgichli elektronika maxsulotlarining deyarli 97 % kremniy asosida yasaladi. 22 – rasmda kiritmasiz kremniy panjarasining soddalashtirilgan modeli (a) va uning zona energetik diagrammasi (b) keltirilgan. Agar yarim o‘tkazgich kristalli tarkibida kiritma umuman bo‘lmasa va kristall panjaraning tuzulmasida nuqsonlar (bo‘sh tugunlar, panjara siljishi va boshqalar) mavjud bo‘lmasa, bunday yarim o‘tkazgich xususiy deb ataladi va i harfi bilan belgilanadi.



22 – rasm. Xususiy yarimo‘tkazgichlar.

22 – rasmdan ko‘rinib turibdiki, kremniy xususiy kristallida uning atomining to‘rtta valent elektroni kremniyning qo‘shni atomining to‘rtta elektroni bilan bog‘lanib, mustahkam sakkiz elektronli qobiq (to‘g‘ri chiziq) hosil qiladi. 0 K temperaturada bunday yarim o‘tkazgichda erkin zaryad tashuvchilar mavjud bo‘lmaydi. Lekin temperatura ortishi bilan yoki yorug‘lik nuri tushirilganda kovalent bog‘lanishlarning bir qismi uziladi va valent elektronlar o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tish uchun yetarlicha energiya oladilar (22 b-rasm).

Natijada valent elektron erkin zaryad tashuvchiga aylanadi va kuchlanish ta‘sir ettirilsa, u tok hosil qilishda ishtirok etadi. Elektron yo‘qotilishi natijasida atom musbat ionga aylanadi.

Bir vaqtning o‘zida valent zonada bo‘sh sath hosil bo‘ladi va valent elektronlar o‘z energiyalarini o‘zgartirishlariga, ya‘ni valent zonasining biror ruxsat etilgan sathidan boshqasiga o‘tishiga imkon yaratiladi.

Shunday qilib, u tok hosil bo'lish jarayonida qatnashishi mumkin. Temperatura ortgan sari ko'proq valent elektronlar o'tkazuvchanlik zonasiga o'tadilar va elektr o'tkazuvchanlik ortib boradi.

Valent zonadagi erkin energetik sath yoki erkin valent bog'lanish qovakli deb ataladi va u elektron zaryadining absolyut qiymatiga teng bo'lgan erkin musbat zaryad tashuvchi hisoblanadi. Kovakning harakatlanishi valent elektroni harakatiga qarama – qarshi bo'ladi.

Shunday qilib, atomlar orasidagi kovalent bog'lanishning uzilishi bir vaqtning o'zida erkin elektron va elektron ajralib chiqqan atom yaqinida kovak hosil bo'lishiga olib keladi. Elektron – kovak juftligining hosil bo'lish jarayoniga ***zaryad tashuvchilar generatsiyasi*** deb ataladi. Agar bu jarayon issiqlik ta'sirida amalga oshsa, u issiqlik generatsiyasi deb ataladi. O'tkazuvchanlik zonasida elektronning hosil bo'lishi va valent zonasida kovakning yuzaga kelishi 22 b-rasmda mos ishoralar yordamida aylanalar ko'rinishida tasvirlangan. Strelka yordamida elektronning valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishi ko'rsatilgan.

Generatsiya natijasida yuzaga kelgan elektronlar va kovaklar yarim o'tkazich kristallida yashash vaqti deb ataladigan biror vaqt mobaynida tartibsiz harakatlanadilar, so'ngra erkin elektron to'liq bo'lmagan bog'lanishni to'ldiradi va bog'lanish hosil bo'ladi. Bu jarayon ***rekombinatsiya*** deb ataladi.

O'zgarmas temperaturada (boshqa tashqi ta'sirlar mavjud bo'lmasa) kristall muvozanat holatda bo'ladi. Ya'ni, generatsiyalangan zaryad tashuvchilar juftligi soni rekombinatsiyalangan juftliklar soniga teng bo'ladi. Birlik hajmdagi zaryad tashuvchilar soni, ya'ni ularning konsentratsiyasi, solishtirma elektr o'tkazuvchanlik qiymatini beradi. Xususiy yarim o'tkazgichlarda elektronlar konsentratsiyasi kovaklar konsentratsiyasiga teng bo'ladi ($n_i = p_i$). n (negative so'zidan) va p (positive so'zidan) harflari mos ravishda elektron va kovakka mos keladi. Kiritmasiz yarim o'tkazgichda hosil bo'lgan elektron va kovaklar ***xususiy erkin zaryad tashuvchilar*** va ularga asoslangan elektr o'tkazuvchanlik esa – ***xususiy elektr o'tkazuvchanlik*** deb ataladi.

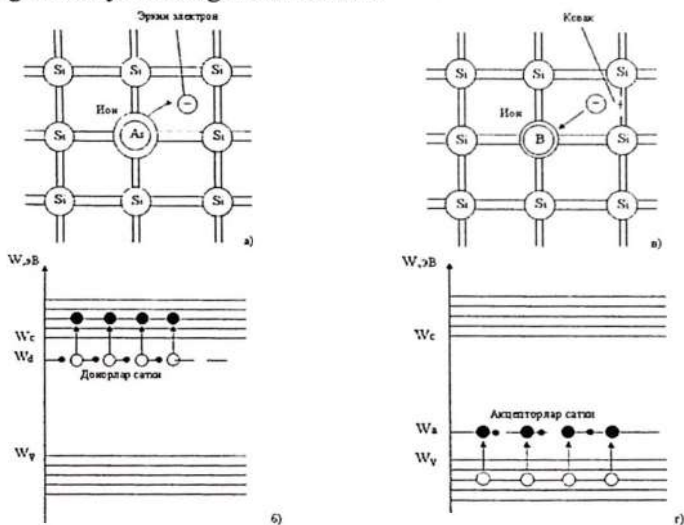
3.1. Yarim o'tkazgichlarda kiritmali elektr o'tkazuvchanlik.

Yarim o'tkazgichli asboblarning ko'p qismi kiritmali yarim o'tkazgichlar asosida yaratiladi. Elektr o'tkazuvchanligi kiritma atomlari

ionizatsiyasi natijasida hosil bo'ladigan zaryad tashuvchilar bilan asoslangan yarim o'tkazgichlar – *kiritmali yarim o'tkazgichlar* deyiladi.

Kremniy atomiga D.I. Mendeleyev davriy elementlar tizimidagi V guruh elementlari (masalan, margumush As) kiritilsa uning 5ta valent elektronidan to'rttasi qo'shni kremniy atomining to'rtta valent elektronlari bilan bog'lanib - sakkiz elektrondan tashkil topgan mustahkam qobiq hosil qiladilar. Beshinchi elektron ortiqcha bo'lib, o'zining atomi bilan kuchsiz bog'langan bo'ladi. Shuning uchun kichik issiqlik energiyasi ta'sirida u uziladi va erkin elektronga aylanadi (9 a - rasm), bu vaqtda kovak hosil bo'lmaydi. Energetik diagrammada bu jarayon elektronning donor sathi W_d dan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishiga mos keladi (9 b - rasm). Kiritmali atom musbat zaryadlangan qo'zg'almas ionga aylanadi. Bunday kiritma *donor* deb ataladi.

Yarim o'tkazgichli asboblarda yasashda ko'p kiritma atomlari kiritiladi (1 sm³ hajmga 10^{14} - 10^{18} darajadagi atomlar). Xona temperaturasida kiritmaning har bir atomi bittadan erkin elektron hosil qiladi. Kovaklar esa xususiy yarim o'tkazgichlardagi kabi kremniy atomi elektronlarining o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishidagi termogeneratsiya hisobiga hosil bo'ladi.



23 – rasm. Kiritmali yarim o'tkazgichlar

Yarim o'tkazgich tarkibiga katta darajadagi donor kiritmaning kiritilishi erkin elektronlar konsentratsiyasini oshiradi, kovaklar konsentratsiyasi esa xususiy yarim o'tkazgichdagiga nisbatan sezilarli kamayadi. Erkin zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining ko'paytmasi $n \cdot p$ o'zgarmas temperaturada o'zgarmas qoladi va faqat yarim o'tkazgich ta'qiqlangan zona kengligi bilan aniqlanadi. Shuni yodda tutish kerakki, $T=300$ K (xona temperaturasida) kremniyda $np \cong 0,64 \times 10^{20} \text{ sm}^{-3}$, germaniyda esa $np \cong 4 \times 10^{26} \text{ sm}^{-3}$. Shunday qilib, agar kremniy kristalliga konsentratsiyasi 10^{16} sm^{-3} bo'lgan donor kiritma kiritilsa, $T=300$ K da elektronlar o'tkazuvchanligi $n=10^{16} \text{ sm}^{-3}$, kovaklarniki esa – atigi 10^4 sm^{-3} ga teng bo'ladi. Demak bunday kiritmali yarim o'tkazgichda elektr o'tkazuvchanlik asosan elektronlar hisobiga amalga oshiriladi, yarim o'tkazgich esa – **elektron** yoki ***n-turdagi elektr o'tkazuvchanlik*** deb ataladi. n –turdagi yarim o'tkazgichda elektronlar - asosiy zaryad tashuvchilar, kovaklar esa - asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar deb ataladi.

Kremniy atomiga D.I. Mendeleyev davriy elementlar tizimidagi III guruh elementlari (masalan, bor V) kiritilsa uning valent elektronlari qo'shni kremniy atomlari valent elektronlari bilan uchta to'liq bog'liqlik hosil qiladilar. To'rtinchi bog'lanish esa to'lmay qoladi. Uncha katta bo'lmagan issiqlik energiyasi ta'sirida qo'shni kremniy atomining valent elektronlari bu bog'lanishni to'ldiradi. Natijada borning tashqi qobig'ida ortiqcha elektron hosil bo'ladi, ya'ni u manfiy zaryadga ega bo'lgan qo'zg'almas ionga aylanadi. Kremniy atomining to'lmagan bog'lanishi – bu kovakdir (23v - rasm). Energetik diagrammada bu jarayon elektronning valent zonadan akseptor sathi W_a ga o'tishiga va valent zonada kovak hosil bo'lishiga mos keladi (23g - rasm). Bu vaqtda erkin elektron hosil bo'lmaydi. Bunday kiritma – akseptorli deb ataladi, akseptor atomlari kiritilgan yarim o'tkazgich esa – **kovak** yoki ***p – turdagi elektr o'tkazuvchanlik*** deb ataladi. R-turdagi yarim o'tkazgich uchun kovaklar – asosiy zaryad tashuvchilar, elektronlar esa - asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar hisoblanadi.

3.2. p-n o'tish: tuzulishi va ishlash printsipi.

Yarimo'tkazgichlar dielektriklar va o'tkazgichlar orasidagi elektr tokini o'tkazishda oraliq o'rinni egallaydi. Yarimo'tkazgichli qurilma-

larni yaratish uchun asosan germaniy, kremniy, galyum arsenidi va selen ishlatiladi.

Supero'tkazuvchilarda zaryad tashuvchilar elektronlardir. Yarimo'tkazgichlarda, elektronlardan tashqari, teshiklar ham bor. Hatto xona haroratida ham, ba'zi elektronlar atomdan ajralib, erkin suzishni boshlash uchun etarli energiya oladi. Ularga erkin elektronlar deyiladi.

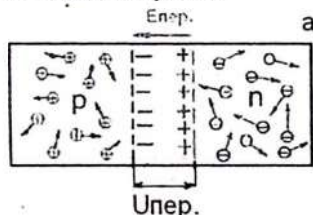
Teshik - bu elektronni yo'qotgan atomdagi bo'sh joy. Ammo qo'shni atomdan elektron teshik joyiga borishi mumkin va u allaqachon "teshiklarga to'la" bo'lib qoladi. Shunday qilib, teshik, elektron kabi, yarimo'tkazgich kristalli bo'ylab aylanadi.

Agar kristal elektr maydoniga ta'sir qilsa, erkin elektronlar o'tkazuvchi elektronlar bo'lib, yarimo'tkazgichda tok hosil qilsa, u elektron o'tkazuvchanlik yoki n-tipli o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgich deb ataladi.

Teshiklarning yo'naltiruvchi harakati tufayli olingan yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi teshik o'tkazuvchanligi yoki p tipidagi o'tkazuvchanlik bilan bo'ladi.

Yarimo'tkazgichli qurilmalarning ishi har xil o'tkazuvchanlikdagi yarimo'tkazgichlar ulanganda sodir bo'ladigan jarayonlarga asoslanadi.

Ularni ishlab chiqarish uchun aralashmalar toza yarimo'tkazgichga kiritiladi, bu uni elektron yoki teshik o'tkazuvchanligi bilan ta'minlaydi. Iflosliklar bilan boyitilgan p- va n-tipli kristalli hududlar orasidagi chegara p-n birikmasi deyiladi.



24-rasm. Diffuziya natijasida p-tipidagi ba'zi teshiklar n-tipli hududga, erkin elektronlar esa p-tipli hududga o'tish holati.

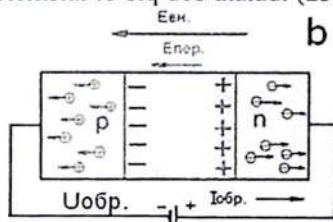
Diffuziya natijasida p-tipidagi ba'zi teshiklar n-tipli hududga, erkin elektronlar esa p-tipli hududga o'tadi (24-rasm).

p-n birikmasining yupqa qatlamida elektronlar va teshiklar birlashadi, ya'ni. zaryadlarning o'zaro kompensatsiyasi yuzaga keladi

va shuning uchun qatlamda bepul zaryad tashuvchilar kam bo'ladi. U zaryad tashuvchilarning ko'pchiligi uchun to'siq qatlami bo'lgan pn birikmasining emirilish qatlami deb ataladi.

p-n birikma qatlami zaryadlangan plitalar zaryadlangan birikma chegaralari bo'lgan kondensatorga o'xshaydi va dielektrik-bu tushirish qatlami.

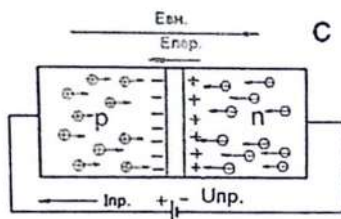
Germaniydan yasalgan yarimo'tkazgichda p-n birikmasidagi kuchlanish Utrans hisoblanadi. 0,25-0,3 voltga, kremniydan esa 0,4-0,5 voltga etadi. p-n birikmasining chegaralari orasida Eper elektr maydoni paydo bo'ladi, bu potentsial to'siq deb ataladi (23-rasm).



24-rasm. Kuchlanish manbai tomonidan yaratilgan tashqi maydon E_{un} p-n birlashmasining maydoni E_{per} bilan bir xil yo'nalishga holati.

Agar teskari kuchlanish U_{rev} ni qo'llasangiz. kuchlanish manbai tomonidan yaratilgan, yarimo'tkazgichli kontaktlarda 24-rasmda ko'rsatilgandek, keyin kuchlanish manbai tomonidan yaratilgan tashqi maydon E_{un} p-n birlashmasining maydoni E_{per} bilan bir xil yo'nalishga yo'naltiriladi. bu elektronlar va teshiklarning qarama -qarshi potentsialli kontaktlarga shoshilishiga olib keladi. Bu kontaktlarda zaryadlarning kontsentratsiyasi oshishiga va p-n birikmasida pasayishiga olib keladi. Shu sababli, potentsial to'siq zaryadsizlangan bo'sh joyni egallaydi va kengayadi, bu esa zaryad tashuvchilarning yanada katta bloklanishiga olib keladi.

Biroq, bunday sharoitda ham, ozchilik tashuvchilar tomonidan yaratilgan ahamiyatsiz teskari oqim I_{obr} p-n birikma to'sig'i orqali oqadi.



25-rasm. To'g'ridan -to'g'ri kuchlanish U_{pr} maydon E_{un} p-n birikmasi E_{per} maydoniga qarama -qarshi yo'naltiriladigan holati.

Qachon to'g'ridan -to'g'ri kuchlanish U_{pr} (25-rasm), tashqi maydon E_{un} p-n birikmasi E_{per} maydoniga qarama -qarshi yo'naltiriladi.

Elektronlar va teshiklar qo'shimcha energiya olgach, maqsadli ravishda p-n birikmasi tomon harakat qila boshlaydilar va undagi zaryadlarni qoplaydilar. Bu shuni anglatadiki, ulanish joyidagi kuchlanish pasayadi va blokirovka qiluvchi qatlam torayadi.

$U_{pr} - U_{pr} = 0$ farqi bo'lganda, p-n birikmasi ochiladi va yarimo'tkazgichda I_{pr} to'g'ridan to'g'ri oqimi boshlanadi. Shunday qilib, p-n birikmasi yarimo'tkazgichli qurilmalarda ishlatiladigan to'g'rilash yoki valf xususiyatiga ega.

Takrorlash uchun savollar

1. Nuqtaviy nuqsonlarga temperaturaning ta'siri qanday?
2. Birikmalar nima va ular qanday paydo bo'ladi?
3. Binar birikmalardagi termik nuqsonlar tabiati qanday?
4. Nuqson hosil bo'lish energiyasining tarkibi qanday?

4-§. YARIMO'TKAZGICHLARDA UZLUKSIZLIK TENGLAMASI.

Fermi sathi. Berilgan temperaturada harakatchan va qo'zg'almas zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi Fermi sathi W_F holati bilan aniqlanadi. Bu sath bir elektronga mos keluvchi jismning o'rtacha issiqlik energiyasiga mos keladi. Absolyut nol temperaturadan farqli temperaturada bu sathning to'lish ehtimoli 0,5 ga teng.

Elektronlar va kovaklarning o'rtacha issiqlik energiyasi yarim o'tkazgich temperaturasi bilan aniqlanadi va kT ga teng, bu yerda k – Bolsman doimiysi, T – absolyut temperatura. Qattiq jismda zarrachalar harakatini ifodalaydigan Bolsman qonuniga asosan, n – yarim o'tkazgichdagi energiyasi W_i kichik bo'lmagan elektronlar quyidagiga teng:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{W_i}{kT}\right), \quad (4.1)$$

bu yerda n_0 – erkin elektronlarning to'liq konsentratsiyasi. Xuddi shunday ifodalar kovaklarni energiya bo'ylab taqsimotini ifodalaydi. (4.1) dan ko'rinib turibdiki, zarracha energiyasining ortishi bilan, zarrachalar soni keskin kamayadi.

Ikkala ishoradagi erkin zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi teng bo'lgan xususiy yarim o'tkazgichlar uchun Fermi sathi ta'qiqlangan zonaning o'rtasidan o'tadi. Elektronli yarim o'tkazgichda elektronlarning (butun yarim o'tkazgichning) o'rtacha energiyasi yuqori bo'ladi, demak Fermi sathi o'rtadan o'tkazuvchanlik zonasi tubi tomonga siljiydi va donor kiritma konsentratsiyasi qancha yuqori bo'lsa, shuncha o'tkazuvchanlik zonasi tubi tomonga yaqinlashadi. R-turdari yarim o'tkazgichda Fermi sathi ta'qiqlangan zona o'rtasidan valent zona shipi tomonga siljiydi va akseptor kiritma konsentratsiyasi qancha yuqori bo'lsa, shuncha valent zonasi shipi tomonga yaqinlashadi.

Ba'zi yarim o'tkazgichli asboblarda (tunnel diodlari, tunnel teshilishli stabilitronlar) *ajralmagan yarim o'tkazgichlar* qo'llaniladi. Bunday yarim o'tkazgichlarda Fermi sathi ruxsat etilgan zonalarda: elektronli yarim o'tkazgich uchun – o'tkazuvchanlik zonasida, kovakli yarim o'tkazgich uchun – valent zonada joylashadi. Ajralmagan yarim o'tkazgichlar juda katta kiritma konsentratsiyasi ($10^{19} - 10^{21} \text{ sm}^{-3}$) hisobiga hosil qilinadilar.

4.1. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi.

Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi μ - bu elektr maydon kuchlanganligi $\vec{E}=1$ V/sm bo'lgandagi yarim o'tkazgichdagi zaryad tashuvchilarning o'rtacha yo'naltirilgan tezligi. Elektronlar harakatchanligi μ_n doim kovaklar harakatchanligi μ_p dan yuqori bo'ladi. Bundan tashqari zaryadlar harakatchanligi yarim o'tkazgich turiga ham bog'liq bo'ladi. Shunday qilib, kremniydagi elektronlar harakatchanligi $\mu_n=1500$ sm²/(V·s), germaniyda $\mu_n = \text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, galliy arsenidida $\mu_n = \text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.

Agar yarim o'tkazgichda elektr maydoni hosil qilinsa, u holda erkin zaryad tashuvchilar siljishi yuzaga keladi. Bunday siljish *dreyf harakati* deb ataladi. *Dreyf tezligi* $\vec{v}_{dr}$ elektr maydon kuchlanganligi $\vec{E}$ ga proporsional bo'ladi

$$\vec{v}_{dr} = \mu \cdot \vec{E} \quad (4.2)$$

Elektron va kovaklar dreyf tokining natijaviy zichligi

$$\vec{j}_{dr} = q(n\mu_n + p\mu_p)E. \quad (4.3)$$

4.2. Diffuziya koeffisienti.

Yarim o'tkazgichda elektr toki hosil bo'lishiga faqat elektr maydoni emas, balki harakatchan zaryad tashuvchilar gradienti ham sabab bo'ladi. Yarim o'tkazgich hajmida teng taqsimlanmagan erkin zaryad tashuvchilar harakatining yo'nalishi *diffuziya harakati* deb ataladi.

Elektron va kovak diffuziya toklarining zichligi quyidagiga teng

$$\vec{j}_{n/dif} = qD_n \left(\frac{dn}{dx} \right); \quad \vec{j}_{p/dif} = -qD_p \left(\frac{dp}{dx} \right). \quad (4.4)$$

bu yerda q - elektron (kovak) zaryadi, D_n i D_p - mos ravishda elektron va kovak diffuziya koeffisientlari, dn/dx i dp/dx - mos ravishda elektron va kovak konsentratsiya grandientlari.

Dreyf va diffuziya harakati parametrlari o'zaro *Eynshteyn nisbati* bilan bog'langan

$$D_n = \left(\frac{kT}{q} \right) \cdot \mu_n = \varphi_T \mu_n; \quad (4.5)$$

$$D_p = \left(\frac{kT}{q} \right) \cdot \mu_p = \varphi_T \mu_p. \quad (4.6)$$

(4.4) ifodadagi proporsionallik koeffisientlari $\varphi_T = kT/q$ potensial o'lcham birligiga teng (volt) va issiqlik potentsiali deb ataladi. Xona temperaturasida ($T=300\text{ K}$) $\varphi_T = 0,026\text{ V} = 26\text{ mV}$.

Zaryad tashuvchining yashash vaqti τ . Zaryad tashuvchining yashash vaqti deganda uning generatsiyasidan rekombinatsiyasigacha bo'lgan vaqt tushuniladi. Yarim o'tkazgichning bu parametri yarim o'tkazgichli asboblarni (bipolyar tranzistorlardagi baza kengligi, maydoniy tranzistorlarda kanal uzunligi) konstruksiyalashda katta ahamiyatga ega. Yashash vaqtida zaryad tashuvchining diffuziya harakati natijasida diffuziya uzunligi deb ataluvchi, o'rtacha masofasi ma'lum L ga teng bo'lgan masofani bosib o'tadi.

Takrorlash uchun savollar

1. Panjara doimiysining ta'rifini ayting?
2. Kristallarda kovalent bogTanish qanday amalga oshadi?
3. Atomlarda tugunlararo diffuziya mexanizmi qanday?
4. Entropiya va entalpiya faollashishi energiyalari nima?
5. Ko'p tarkibli tizimning kimyoviy potentsiali nima?

5-§. DIELEKTRIKLARDA ZARYAD KO'CHISH JARAYONINING XUSUSIYATLARI

Dielektrik - bu elektr tokini amalda o'tkazmaydigan modda yoki modda. Bunday o'tkazuvchanlik oz sonli elektron va ionlar tufayli erishiladi. Ushbu zarralar faqat yuqori haroratli xususiyatlarga erishilganda, o'tkazuvchan bo'lmagan materiallarda hosil bo'ladi. Bu dielektrik nima va bu maqolada muhokama qilinadi.

Har bir elektron yoki radio muhandis Supero'tkazuvchi, yarim Supero'tkazuvchi yoki zaryadlangan dielektrik o'zidan elektr tokidan o'tib ketadi, ammo dielektrik xususiyati shundan iboratki, unda kichik kuchlanish oqimi vodorodning 550 V dan yuqori kuchlanishida ham oqadi. Dielektrikdagi elektr toki zararli zarrachalarning ma'lum bir yo'nalishda harakatlanishi (ijobiy va salbiy bo'lishi mumkin). Dielektr elektr o'tkazuvchan qurilmalarni umumiy ko'rinishi 26-rasmda ko'rsatilgan⁵.



26-rasm. Dielektr elektr o'tkazuvchan qurilmalarni umumiy ko'rinishi.

Dielektrlarning elektr o'tkazuvchanligi quyidagicha:

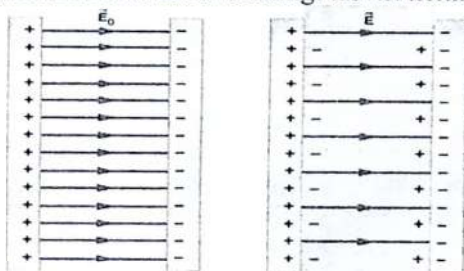
- Absorptsiya oqimlari - bu muvozanat holatiga kelgunga qadar doimiy elektr oqimida dielektrda oqadigan oqimdir, kuchlanish yoqilganda yo'nalishni o'zgartiradi va unga ulanadi. O'zgaruvchan tok bilan dielektrikdagi quvvat elektr maydonida ishlayotgan vaqtda har doim mavjud bo'ladi.
- Elektron elektr o'tkazuvchanligi - elektronlar harakati doirasida maydon harakati.

⁵ <https://uz.unansea.com/dielektrik-bu-nima-dielektrlarning-xususiyatlari/>

- Ionning o'tkazuvchanligi ionlarning harakatidir. Elektrolitlar eritmalarida - tuzlar, kislotalar, gidroksidi, shuningdek, ko'p dielektrlarda topiladi.

- Molon elektr o'tkazuvchanligi - molyons deb nomlangan zararli zarralarning harakatidir. Kolloid tizimlar, emulsiyalar va suspenziyalarda mavjud. Elektr maydonida molyonsning harakatlanish fenomeni elektroforez deyiladi.

Elektr izolyatsiyalash materiallari agregat davlat va kimyoviy xarakterga ko'ra tasniflanadi. Birinchisi qattiq, suyuq, gazli va qotib turuvchi bo'linadi. Kimyoviy tabiatan organik, noorganik va organoelemental materiallarga bo'lingan. 27-rasmda dielektrlarning umumiy holati bo'yicha elektr o'tkazuvchanligi tasviri keltirilgan.



27-rasm. Dielektrlarning umumiy holati bo'yicha elektr o'tkazuvchanligi

Dielektrlarning umumiy holati bo'yicha elektr o'tkazuvchanligi:

- *Gazlarning elektr o'tkazuvchanligi.* Gazli moddalar etarli darajada past oqim o'tkazuvchanligiga ega. Bu tashqi va ichki, elektron va ion omillarining ta'siri oqibatida kelib chiqadigan erkin zararli zarralar: rentgen va radioaktiv turlarning radiatsiya, molekulalarning to'qnashuvi va zaryadlangan zarralar, issiqlik omillari mavjud bo'lishi mumkin.

- *Suyuq dielektrikning elektr o'tkazuvchanligi.* Bog'liqlik omillari: molekulalarning tuzilishi, harorat, ifloslanishlar, elektronlar va ionlarning katta miqdori borligi. Suyuq dielektrlarning elektr o'tkazuvchanligi katta darajada namlik va ifloslanish mavjudligiga bog'liq. Polar moddalarning elektr o'tkazuvchanligi dissotsiatsion ionlari bo'lgan suyuqlik yordamida yaratiladi. Polar va suyuq bo'lmagan suyuqliklarni solishtirganda, o'tkazuvchanlikda birinchi afzallik bo'ladi. Agar suyuq

ifloslantiruvchi moddalardan tozalangan bo'lsa, u Supero'tkazuvchilar xususiyatlarini kamaytiradi. Suyuq moddaning o'tkazuvchanligi va uning harorati oshishi bilan uning viskozitesini pasayishi kuzatiladi va bu ionlarning harakatlanish darajasini oshiradi.

• *Qattiq dielektriklar.* Ularning elektr o'tkazuvchanligi dielektrik va kirishmalarning zaryadlangan zarralari harakati bilan bog'liq. Elektr tokining mustahkam sohalarida elektr o'tkazuvchanligi aniqlandi.

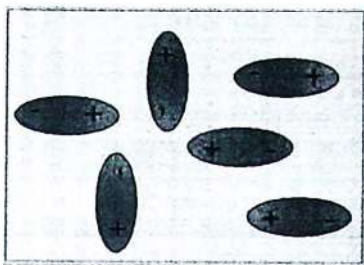
5.1. Dielektrlarning fizik xususiyatlari

10^{-5} Ohm $\times$ m dan kam bo'lgan materiallarning qarshiligi bilan ularning o'tkazgichlariga ulanishi mumkin. 10^8 Ohm $\times$ m dan ortiq - dielektrlarga. Qarshilik o'zini tutish qarshiligidan bir necha barobar ko'p bo'ladigan holatlar mavjud. $10^{-5} \div 10^8$ Ohm oralig'ida yarimo'tkazgich mavjud. Metall materiallar elektr oqimlarining yaxshi o'tkazuvchanidir.

Полярные	Неполярные
Состоят из молекул, у которых не совпадают центры распределения положительных и отрицательных зарядов	Состоят из молекул, у которых совпадают центры распределения положительных и отрицательных зарядов.
поваренная соль, спирты, вода и др.	инертные газы, O_2 , N_2 , бензол, полиэтилен и др.

Butun Mendeleyev stolining faqat 25 elementi nometall emas, ularning 12 tasi yarimo'tkazgich xususiyatiga ega bo'ladi. Ammo, albatta, jadvaldagi moddalar bilan bir qatorda, bir Supero'tkazuvchilar, yarim Supero'tkazuvchilar yoki dielektrik xususiyatiga ega bo'lgan ko'plab qotishmalar, birikmalar yoki kimyoviy birikmalar mavjud. Bundan kelib chiqadigan bo'lsak, turli moddalarning qadriyatlarini aniq qarshilash bilan solishtirish qiyin. Misol uchun, past haroratli faktor bilan yarim Supero'tkazuvchi dielektrik kabi harakat qiladi.

Supero'tkazuvchi materiallardan foydalanish juda keng tarqalgan, chunki u elektr tarkibiy qismlarining eng mashhur sinflaridan biri hisoblanadi. Faol va passiv ko'rinishdagi xususiyatlar tufayli ulardan foydalanish mumkinligi aniq bo'ldi.



27-rasm. Passiv shaklda dielektrlarning xususiyatlari.

Passiv shaklda dielektrlarning xususiyatlari 27-rasmda izolyatsion materiallarda ishlatiladi. Faol ravishda ular ferroelektrikalarda, shuningdek lazer texnologiyalari radiatorlari uchun materiallarda qoʻllaniladi.

5.2. Asosiy dielektriklar

Umumiy turlari quyidagilarni oʻz ichiga oladi:

- Shisha.
- Kauchuk.
- Yogʻ.
- Asfalt.
- Chinni.
- Kvarts.
- Havo.
- Olmos.
- Toza suv.
- Plastik.

5.3. Dielektrik suyuqlik.

Bunday turdagi polarizatsiya elektr toki bilan bogʻliq. Superoʻtkazuvchi Superoʻtkazuvchilar materiallarni quyish yoki toʻkish uchun ishlatiladi. Suyuq dielektrlarning uchta klassi mavjud:

Yogʻyogʻlari zaif yopishqoq va koʻpincha qutbsiz. Ular koʻpincha yuqori voltli qurilmalarda ishlatiladi: transformator yogʻi, yuqori voltli suv. Transformator yogʻi nonpolar dielektrik hisoblanadi. Bolal

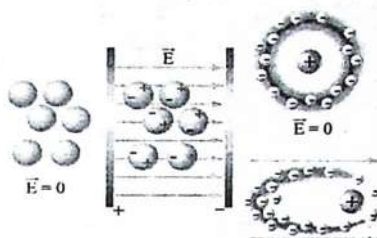
yog'liniyasi 40 kV kuchlanishli izolyatsiyalash va qog'oz simlarini, shuningdek, 120 kV dan ortiq oqimga ega metallarga asoslangan qoplamalarni ishlab chiqarishda qo'llanildi. Transformer yog'i kondanser yog'idan toza tuzilishga ega. Ushbu turdagi dielektrik analog ishlab chiqarilgan mahsulotlarga nisbatan yuqori narxga qaramasdan, ishlab chiqarishda keng tarqalgan. 1-jadvalda materiallarning dielektrik xususiyatlari keltirilgan.

1-jadval.

№	Materialning nomi	Muhitning dielektrik doimiyligi
1.	suv	81
2.	kerosin	2,1
3.	moy	2,5
4.	Paraffin	2,1
5.	Slyuda	6
6.	oyna	7

Sintetik dielektrik nima? Xlorli uglerod asosida ishlab chiqarilganligi sababli, bugungi kunda deyarli barcha joylarda yuqori toksiklik tufayli taqiqlangan. Kremniy organik suyuqlikka asoslangan suyuq dielektr, xavfsiz va ekologik xavfsizdir. Ushbu turdagi metal zanglashga olib kelmaydi va past higroskopik xususiyatlarga ega. Suvli dielektrik tarkibida organoflorin birikmasi mavjud bo'lib, u o'zgar-maydiganligi, issiqlik xususiyatlari va oksidlanish stabilligi tufayli juda mashhur.

Oxirgi turdagi o'simlik moylari. Ular zaif polar dielektriklar, shu jumladan zig'ir, kastor, tung va kenevir. Kastor yog'i juda qiziydi va qog'oz kondansatörlarda ishlatiladi. Qolgan yog'lar bug'lanishi mumkin. Ularda bug'lanish tabiiy bug'lanishdan emas, balki polimerizatsiya deb ataladigan kimyoviy reaksiyaga asoslanadi. Emallarda va bo'yoqlarda faol ishlatiladi.



28-rasm. Suyuq dielektrik materiallardagi zarrachalarning holat tasviri.

Qo'llanmada dielektrik nima ekanligini batafsilroq ko'rib chiqdik. Turli turlar va ularning xossalari qayd etilgan. Tabiiyki, ularning xarakteristikalarining barcha nozikliklarini tushunish uchun, ular haqida fizika bo'limini chuqurroq o'rganishimiz kerak bo'ladi.

Takrorlash uchun savollar

1. Metall va yarimo'tkazgichlar farqli ravishda dielektriklar elektr qarshiligining yuqoriligi tufayli aynan qaysi elektron asboblari ishlab chiqarishda muhim o'rin tutadi?
2. Dielektriklarni belgilovchi xususiyatlaridan birini ayting?
3. Dielektrik yo'qotishlar burchak tangensi va teshilish hodisalari dielektriklarni nimasini belgilaydi?

II-BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA ELEKTRON VA KOVAKLAR STATISTIKASINING ASOSLARI

6-§. YARIMO'TKAZGICHLI MATERIALLAR OLISH TEXNOLOGIYASI.

Zamonaviy elektronika elementlarini olish texnologiyasini tanlash ularga quyilgan talablarga bog'lik bo'lib, bular jumlasiga asosan materialning tozaligi kiradi. Misol uchun, yarim o'tkazgichli materialning teskari yo'nalishdagi qo'yiladigan kuchlanish materialning solishtirma qarshiligiga bog'lik bo'lib, $p \sim 0,1 \text{ Om sm}$ bo'lgan Ge (Si) da $U_{\text{tesq}} 1,0-1,5 \text{ V}$ bo'lgan pe'zoelektrik material olish mumkin. Bunday Ge (Si) materialida 100 ta kirishma atomiga $1,5 \cdot 10^3$ Ge (Si) atomi to'g'ri kelsa, kirishmalar sonini 100 marta kamaytirilsa ($pq50 \text{ Om sm}$) $U_{\text{tesq}} 500 \text{ V}$ ga teng bo'lgan material olish mumkin. Shuning uchun yarim o'tkazgichli materiallar asosida ishlatiladigan texnik asboblarda moddalar tozaligi nuqtai nazaridan materiallar uch toifaga bo'linadi. A – toifaga oddiy klassik kimyoviy tahlil yo'li bilan aniqlanishi mumkin bo'lgan A1 – 99,9% tozalikka ega bo'lgan va A11-99,99% tozalikka ega bo'lgan materiallar kiradi. V – toifa V_3 va V_6 larga bo'linadi. Bunday moddalar alohida toza va o'ta toza deyiladi ($10^{-3}-10^{-6}\%$ aniqlikda kirishmalar). Keyingi eng toza toifa bo'lib S_7-S_{10} ga mansub bo'lib tozalik darajasi $10^{-7}-10^{-10}\%$ dir.

Zamonaviy elektronika elementlari o'stirish usulini tanlash ularning fizik va kimyoviy xususiyatlarini o'rganishga bog'likdir. Agar moddaning erish harorati yuqori, kimyoviy aktiv va bug' bosimi 54ata bo'lsa, bunday moddalar kristallini o'stirish juda qiyin. Ularni bug' fazasi yoki eritmalaridan kichik o'sish tezliklarida o'stirish maqsadga muvofiq bo'ladi. O'stirish jarayoni haroratini juda aniq o'lchashga, moddalar taqsimotini nazorat qilishga, gaz holatidagi komponentlar bosimini doimiy miqdorda saqlashga va qurilmaning mexanik qismlari ishini aniq nazorat qilishga tug'ri keladi.

6.1. Zamonaviy elektronika elementlarini tigel yordamida o'stirish usullari

O'stirish usullari ko'p bo'lib ulardan asosiylari jumlasiga quyidagilar kiradi.

1. Toza moddalardan va legirlangan kirishmali o'ta to'yingan eritmalaridan o'stirish.

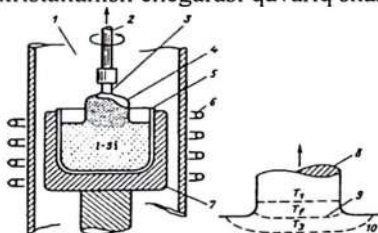
2. Eritmalardan o'stirish.

3. Bug' fazasidan o'stirish.

Stexiometrik tarkibdagi suyuq fazadan kristallarni o'stirish usullari 2 ga bo'linadi. Elektronika elementlarida qo'llaniladigan yarim o'tkazgichlarni tigel yordamida o'stirish usullari va tigelsiz usullar. Bu usul bir necha ko'rinishga bo'linadi. Jumladan, yo'naltirilgan kristallizatsiya usuli, «gorizontal» va «vertikal» Bridjmen usuli, sohali eritish usuli va CHoxralskiy usuli.

Bu usullarning asosini issiqlikni yo'naltirilgan holda uzatish tashkil qiladi. Bunga misol tariqasida 29-rasmda CHoxralskiy usuli keltirilgan.

Vertikal pechlar uchun xarakterli narsa "kristallizatsiya" frontini kuzatish mumkin emasligidir. Yana bir kamchilik o'sayotgan kristallning tigel devorlari bilan doimiy kontaktda bo'lib turishidir. O'lchamlari kerakligicha katta monokristallar olish uchun, butun texnologik jarayon davomida kristallanish chegarasi qavariq shaklli bo'lishi kerak.



29-rasm. Kristallarni CHoxralskiy usuli bilan o'stirish qurilmasi.

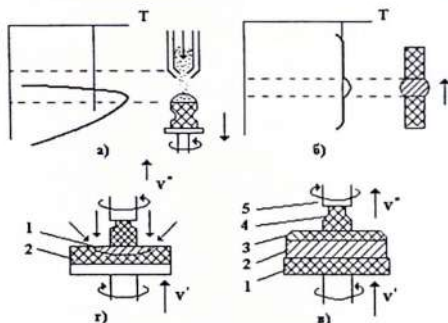
1 – vakuum yoki inert gaz muhit; 2 – kristallni tortuvchi sterjen;

3 – dastlabki o'stirishni belgilovchi kristall; 4 – o'sib borayotgan kristall; 5 – platinadan qilingan tigel; 6 – yuqori chastotali induktor;

7 – induksion tok ta'sirida qizdiriluvchi grafit; 8 – silikat kremniy(germaniy) kristalli; 9 – kristallizatsiya fronti; 10 – silikat kremniy (germaniy).

Buning uchun tigel devorlarining harorati suyuq faza haroratidan doimiy yuqori bo'lishi kerak. Natijada tigel devorlarida parazit kristallanish markazlari hosil bo'lishining oldi olinadi.

Sohali o'stirish (30-rasmga qarang). Bu usulning CHoxralskiy usulidan farqi shundaki, bu usulda ikkita pech ishlatiladi, biri harorati $T < T_{er}$, ikkinchisi harakatchan konstruksiyali qisqa zonali harorati $T > T_{er}$. Bu usulda erigan modda platinali tigel devorlari bilan kamroq kontaktda bo'lgani uchun o'stirilayotgan kristall kamroq ifloslanadi. Eriyotgan va erigan soha qalinligini va uning siljish tezligini o'zgartirish imkoniyati mavjud. SHuning uchun bu usul pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli materiallarni yaxshiroq tozalash imkoniyatini beradi.



30-rasm. Elektronika elementlarida ishlatiladigan monokristallarni eritmalardan o'stirishning tigelsiz usullari.

a – Varneyl usuli; b – vertikal sohali eritish; v – «tomchidan» tortish usuli; g – «ko'lmakdan» tortish usuli. 1,5 – shtoklar, 2-kristall manb (namuna), 3-erigan kristall, 4-o'sayotgan kristall, v^I va v^{II} – shtoklarning aylanish tezliklari.

Choxralskiy usuli. Bu usul asosan sanoat ko'lamida yarim o'tkazgichli silikat Ge va silikat (Si) ishlab chiqarishda ishlatiladi. 30-rasmga CHoxralskiy usulining prinsipial sxemasi berilgan. YUqoridagi usuldan uning farqlaridan biri bu tigelsiz usul bo'lib o'stirilayotgan monokristall o'lchamini nazorat qilish mumkin, hamda o'sish sur'atini nazorat qilish imkoniyati mavjud.

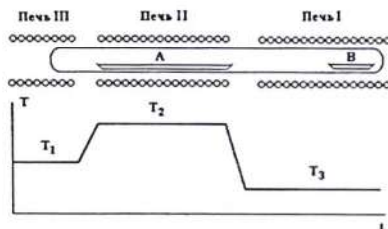
6.2. Zamonaviy elektronika elementlarini tigelsiz o'stirish usullari.

Tigelga yaroqli materiallarning cheklanganligi tufayli bu usullarni qo'llash ham nisbatan cheklangan. Tigelga yaroqli asosiy materiallardan biri platinadir. Silikat germaniyli (Ge) va silikat kremniyli (Si) monokristallarini o'stirishda ishlatiladigan platinali tigellarda eritma odatda kislorod bilan to'yintiriladi. Misol, silikat germaniy (Ge) va silikat kremniy (Si) monokristallini o'stirish jarayonida kremniyga konsentratsiyasi 10^5 sm^{-3} germaniyga konsentratsiyasi 10^7 sm^{-3} kremniyga qadar kislorod kirishmalari kirishi mumkin. Pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli monokristallarni o'stirish jarayonida esa platinali tigel bo'lgani uchun faqat kislorod atomlari kirishi mumkin. Pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli materiallarni tigelsiz o'stirish usullarini Varneyl usuli misolida ko'rishimiz mumkin (30-rasm). Pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli selenli monokristalli yaxlit silindr shaklidagi silenli kremniy (Si) va silenli germaniyning (Ge) tekislik yunalishlari Miller indeksleri orqali berilgan namunasi shtokka mahkamlanadi. Yuqoridagi shtokka mahkamlangan kichkina tirqishli idishda maydalangan holdagi o'stirilayotgan pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli eritma material kukuni solinadi. SHToklarni o'zgarmas tezlikda aylantirish yoki bir biriga nisbatan yaqin masofaga ko'chirish mumkin. Silikat kremniyning va silikat germaniyning tor (chegaralangan) qismida issiqlik manbai yordamida erigan soha hosil qilinadi. Erigan soha sirt taranglik kuchlari ta'sirida ushlab turiladi. Ya'ni erigan soha og'irligi sirt taranglik kuchlari ta'siridan kam bo'lgan holda ushlab turiladi. O'stirilayotgan pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli kristall diametri sohaning kritik uzunligi va material xossalariga, ya'ni $(G/d)^{1/2}$ ga bog'lik bo'ladi (G – suyuqlik-qattiq jism orasidagi sirt tarangligi, d – erigan moddaning solishtirma og'irligi). Issiqlik manbai sifatida yuqori chastotali induktiv qizitish, elektron-nurli yoki radiatsion usullar qo'llanilishi mumkin.

Nostexiometrik eritmalardan pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli kristallarni o'stirish. Bu usul nisbatan universal usul bo'lib, uning yordamida har qanday erish haroratiga ega bo'lgan, hamda bug'lar bosimi katta bo'lgan pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli birikmalarini ham o'stirishda qo'llash mumkin. Bu usulda o'stirish jarayonida

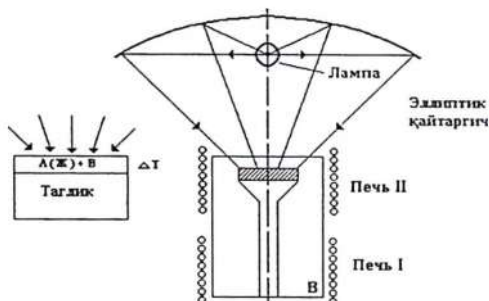
eritmalar tayorlashda erituvchi neytral moddadan (o'stirilayotgan material tarkibiga kirmagan moddadan) yoki birikma tarkibiga kiruvchi moddalardan ham foydalanish mumkin 31-rasmga qarang.

Yo'naltirilgan kristallanish usuli bilan o'stirishning asosiy Afzalliklari. 1. Bu usul bilan o'stirish nisbatan past haroratlarda olib boriladi. 2. Bug' bosimi katta bo'lgan birikmalarni 1.punktni hisobga olgan holda o'stirish mumkinligi. 3. YUqoridagi usullarga nisbatan o'stirish qurilmalarining konstruksiyasi nisbatan soddalashadi.



31-rasm. AV birikma asosidagi kristallni eritmadan yo'naltirilgan pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli monokristallarni kristallanish usuli bilan o'stirish.

Suyuq fazali epitaksiya usuli. Bu usul yuqoridagi usuldan prinsipial farq qilmaydi. Bu usul bilan asosan ko'p fazali yarim o'tkazgichli pe'zoelektrik monokristall plenkalari olinadi. Usulni qo'llashning dastlabki qurilmalaridan biri 32-rasmda ko'rsatilgan.



32-rasm. Eritmalardan epitaksial qatlamlar o'stirish qurilmasi.

Bu usul bilan silikat germaniy, silikat kremniy va boshqa $A^3 V^4$ birikmalar va ularning qattiq eritmaları asosidagi nurlanuvchi boshqa pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli monokristallar olingan.

Pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli monokristallar o'stirish jarayonida kirishmalarining taqsimlanishi. Pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli monokristallarni o'stirish jarayonida erituvchi moddani tanlash muhim ahamiyatga ega. Erituvchi modda sifatida pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli materialning o'zi ishlatilsa, u holda kerakli material olish uchun: asosiy materialni uni ifloslantiruvchi kirishmalardan tozalash va pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli monokristall o'stirish jarayonida kristall panjaraga ma'lum konsentratsiyaga ega bo'lgan bir yoki ikkita kirishmani kiritish kerak bo'ladi (Si) yoki (Ge).

Agar pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli material olishda erituvchi sifatida boshqa material olinsa, avval uni shu materialda eritib keyin kristallizatsiya jarayoni o'tkaziladi. Bu holda bor bo'lgan har xil kirishmalar eritmada va o'sayotgan kristalda qayta taqsimlanadi.

Qattiq jismda har qanday kirishmaning eruvchanligi, qattiq jismning tarkibi va uning qaysi fazalar, qattiq jism, suyuqlik, gaz holati bilan muvozanatda bo'lishi va umuman sistema ozod energiyasining minimal holi bilan aniqlanadi. Ozod energiya sistema holatiga bog'liq bo'lgani uchun harorat o'zgarishi muvozanatni buzadi va mavjud fazalar tarkibi ham o'zgaradi.

Agar erituvchi moddaning o'zi bo'lsa, bu holda o'stirish jarayoni bir o'zgarmas haroratda boradi va qattiq jism tarkibi kirishmalar konsentratsiyasiga va tabiatiga bog'lik bo'ladi. Erituvchi boshqa moddadan bo'lsa, u holda asosiy moddaning kristallizatsiya jarayoni har xil haroratda bo'lgani uchun uning tarkibi haroratga bog'lik bo'ladi va unga mutanosib o'zgaradi. Kirishmalarining taqsimlanish jarayoni pe'zoelektrik yarim o'tkazgichlarning kristallanish jarayonida aniqlovchi xususiyatlardan bo'lib, ideal eritmalar nazariyasiga asosan SHredenger tenglamasi bilan aniqlanadi.

$$K q \ln(N_{ak}/N_{ac}) q \Delta M_A R (1/T - 1/T_{oa}) \quad (6.1)$$

bu yerda: N_{ak} va N_{ac} – kirishmalarining qattiq va suyuq holatdagi konsentratsiyalari, keyinchalik ular C_{kr} va C_c bilan belgilangan. ΔM_A – sof kirishmaning yashirin erish issiqligi, T_{oa} – sof kirishmaning erish harorati, T – eritmaning erish harorati.

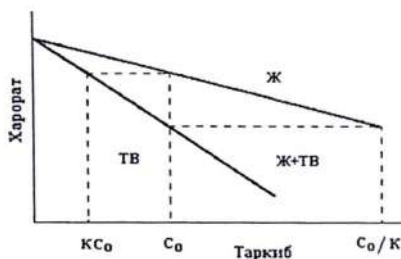
Kirishmaning taqsimlanish koeffitsienti K deb, o'stirilgan kristall-dagi kirishmalar konsentratsiyasining eritmadagi kirishmalarning o'rtacha olingan konsentratsiyasi nisbatiga aytiladi.

$$K \approx C_{kr}/C_e \quad (6.2)$$

Kirishmaga ega bo'lgan yarim o'tkazgichli pe'zoelektrik eritmaning kristallanish jarayoni. Bu jarayon uch xil bo'ladi:

1 hol. Agar o'sayotgan kristall va suyuqlik (eritma) tarkibi bir xil bo'lsa, taqsimlanish koeffitsienti $K \approx 1$ va o'sayotgan kristallda tarkib bir xil bo'ladi.

2-hol. Agar kirishma erituvchining erish haroratini oshirsa (MY: silikat vismut kristalliga kremniy yoki germaniy qo'shilgan hol), taqsimlanish koeffitsienti $K > 1$ va $C_{kr} > C_e$. Bu hol uchun o'sayotgan kristall tarkibi o'sish jarayonida kirishma bilan boyib boradi.



33-rasm. Kirishmalarning taqsimlanish koeffitsientini aniqlashga doir.

3-hol. Agar kirishma erituvchining erish haroratini kamaytirsa (M: silikat vismut kristaliga kremniy (Si) yoki germaniy (Ge) qo'shilgan hol), taqsimlanish koeffitsienti $K < 1$ va $C_{kr} < C_e$. O'sish jarayonida kristallda kirishma miqdori kamayib boradi.

Odatda kristall o'stirish uchun erituvchi tanlanadi. Erituvchini tanlashning 2-holi mavjud.

Erituvchi sifatida kristall tarkibiga kirmagan moddani ishlatish. Bu modda kristallga nisbatan kirishma ham bo'lishi mumkin MU: Sn-Si, Pb-Si, Bi-Ge, Sn-Ge, In-Ge va hokazo.

Erituvchi sifatida kristall tarkibiga kiruvchi moddani ishlatish. Bu hol birikmali kristallarga xos. MU: $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{GeO}_2$, $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{Bi}_2\text{SiO}_3$

($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ va $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) hokazo. Bu hol uchun o'sayotgan kristall tozaligi tanlab olingan komponentlar tozaligiga bog'lik.

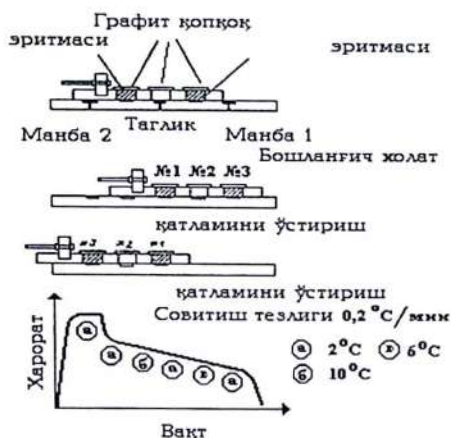
Eritmadan o'stirish afzalliklarga ega bo'lib, u o'stirish jarayonining nisbatan pastroq haroratda bo'lishi bilan bog'lik. Jumladan: a) $T_k < T_{\text{er}}$. bo'lgani uchun birikmali materiallar o'stirilganda birikma komponentlarining parsial bosimi kamroq bo'ladi MU: $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{GeO}_2$, $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{Bi}_2\text{SiO}_3$. Kristall o'stirilayotgan asbob-anjomlarga nisbatan (MU: o'stirish konteynerlariga nisbatan) qo'yiladigan shartlar birmuncha yumshaydi.

6.3. Zamonaviy elektronika elementlari plenklarini eritmalardan o'stirish usullari.

Zamonaviy elektronika elementlarini plenklarini eritmadan o'stirishning ayrim usullarini qisqacha ko'rib o'tamiz.

1) To'yintirilgan eritmadan yo'naltirilgan kristallizatsiya usuli. Birikmali yarim o'tkazgichlar o'stirish usullaridan biri bo'lib hisoblanadi. AV birikmali yarim o'tkazgichli materialni o'stirish uchun uch sohali pechdan foydalaniladi. Kvarsdan yasalgan (oldindan havosi so'rilgan) ampulaga uchmaydigan A komponent va tozalangan uchadigan V komponenta kiritilgan. Havosi so'rilgandan so'ng, ampula berkitilib uch sohali pechga kiritiladi. Pechning harorati T_1 dan eritmada V komponentaning ma'lum bug' bosimini hosil qilishi uchun T_2 gacha ko'tariladi. Uchinchi pechning harorati T_3 bo'lib, u ikkinchi pech bilan T_2 - T_3 gradient hosil qiladi. Konteynerni ma'lum tezlikda mexanik siljitish natijasida T_2 - T_3 gradient ta'sirida yo'naltirilgan kristallanish jarayoni hosil qilinadi.

2) Gradientli sohali o'stirish usuli. Bu usul asosan avval sintez qilingan epitaksial qatlamlar olish uchun ishlatiladi. O'stirish qurilmasi konstruktiv birlashtirilgan ikki qismdan iborat bo'ladi. O'stirish uchun taglik vazifasini bajaradigan yarim o'tkazgich joylashgan sohada bir jinsli harorat olish vazifasini bajaruvchi birinchi pech va yuqorida joylashgan ikkinchi pech vazifasini bajaruvchi isitish lampasi (nur qaytargichi bilan birga)dan iborat. Ikkinchi pechni yoqish natijasida yarim o'tkazgichli taglik ustida yuqoriroq harorat hosil bo'ladi, ya'ni avvaliga T_1 bo'lgan bo'lsa, taglik yuzasida T_2 hosil qilinadi va ayirma T_2 - T_1 ga teng bo'ladi va birinchi usulga oid jarayonlar hosil bo'ladi.



34-rasm. Pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli epitaksal plenkalarni binar birikmalarni noizotermik epitaksiya usuli bilan ko'p qatlamli qilib o'stirish usuli.

Noizotermik epitaksiya usuli. Usulning asosiy g'oyasi ma'lum bir haroratda pe'zoelektrik yarim o'tkazgichning kristaliga kontaktlar o'rnatish maqsadida ma'lum erituvchi yordamida eritmasi tayyorlanib olinadi va u tuyintirish holiga olib kelinadi. So'ngra o'stirish uchun olingan taglik bilan eritma kontaktga keltiriladi va asta-sekinlik bilan ma'lum tezlikda sovutiladi (34-rasm)

Natijada eritmadagi pe'zoelektrik yarim o'tkazgichli material qatlami taglik ustiga uni tuzilmasini takrorlab o'sadi. Etarli qalinlikka ega qatlam olingandan so'ng eritma taglik ustidan olib tashlanadi va o'sish to'xtatiladi. So'ngra qurilma uy haroratiga qadar sovutiladi. Bu usul bilan oddiy (Si,Ge) dan boshlab ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ va $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) birikmali materiallarni olish mumkin.

Elektronika elementlari asosan yarim o'tkazgichli materiallar asosida tayyorlanadi. Shuning uchun elektronika elementi optik va fotoelektrik xususiyatlarini bilish yarim o'tkazgich materiallar tuzilishini ularning metallar va dielektrik materiallardan farqini va yarim o'tkazgich materiallar uchun bevosita asosiy bo'lgan xususiyatlarni o'rganishini taqozo etadi.

Qattiq jismlar hosil bo'lishini yarim o'tkazgich materiallar misolida elektron nazariyasi nuqtai nazaridan ko'rib o'tamiz. Qattiq jism hosil bo'lishi jarayonida, atomlarning bir-biriga nisbatan yaqinlashishi shu darajagacha boradiki, natijada tashqi qobiqdagi elektronlarning umumlashishi hosil bo'ladi. Atomdagi alohida elektronlarning yakka ayrim orbitalari o'rniga umumlashgan kollektiv orbitalar hosil bo'ladi va atomdagi qobiqchalar sohalarga birlashadi hamda ular umuman kristallga tegishli bo'lib qoladi. Elektronlar harakatining xarakteri mutlaq o'zgaradi, ma'lum atomda va ma'lum energetik sathda joylashgan elektronlar energiyasini o'zgartirmasdan shu energetik sathdagi boshqa qo'shni atomga o'tish imkoniyatiga ega bo'ladi va binobarin, elektronlarni kristalda erkin siljishi kuzatiladi.

Kristallning izolyasiya holatidagi barcha atomlarning ichki qobiqlari elektronlar bilan to'la bo'ladi. Faqat eng yuqoridagi ayrim sathlardan iborat valent elektronlari joylashgan sohadagina sathlar to'laligicha egallanmagan bo'ladi. Kristallning elektr o'tkazuvchanligi, optik va boshqa xususiyatlari asosan valent sohasining to'ldirilish darajasiga va undan yuqoridagi sohangacha bo'lgan energetik masofa bilan aniqlanadi va unga o'tkazuvchanlik sohasi deyiladi. Issiqlik va optik qo'zg'atilish hisobiga o'tkazuvchanlik sohasiga valent sohadan elektronlar o'tishi va elektr tokini o'tkazishda ishtirok qilishi mumkin. Valent sohasida hosil bo'lgan bo'sh o'rinlarga elektronlarning ko'chishi, unga qarama-qarshi bo'lgan musbat zaryadlarning harakatini hosil qiladi va bu zaryadlarga teshiklar deyiladi.

Dielektriklar deb, valent sohasi to'ldirilgan va bu sohadan keyingi o'tkazuvchanlik sohangacha bo'lgan energetik masofa nisbatan katta bo'lgan moddalarga aytiladi.

Metallar esa boshqacha tuzilishga egadir. Ularda valent sohasi qisman to'ldirilgan bo'ladi yoki u keyingi soha – o'tkazuvchanlik sohasi bilan kirishgan bo'ladi.

Agar moddaning valent sohasi to'laligicha egallanmagan bo'lsa, ammo o'tkazuvchanlik sohasigacha bo'lgan energetik masofa nisbatan kichik (2 eV dan kamroq) bo'lsa, bunday moddalar yarim o'tkazgichlar deyiladi. Yarim o'tkazgichlar xususiyatlari xususan elektr o'tkazuvchanligi tashqi muhitga, ayniqsa xususiyatlari xususan elektr o'tkazuvchanligi tashqi muhitga, ayniqsa haroratga bog'liq bo'ladi. Harorat (T) ning ortishi elektronlar miqdorining valent va o'tkazuvchanlik sohasiga

o'tishida tok tashuvchilarning eksponensial ravishda ko'payishiga va elektr o'tkazuvchanlikning (σ)

$$\sigma = A \exp(-E_g / 2kT) \quad (6.3)$$

tenglamaga asosan o'zgarishiga olib keladi Bu erda k – Bolsman doimiysi, A – moddani xarakterlovchi o'zgarishga kattalik.

Metallarning elektr o'tkazuvchanligi erkin elektronlar konsentrat-siyasi o'zgarishga bo'lganligi tufayli elektronlar haraktchanligining haroratga bog'liqligi bilan aniqlanadi va haroratning ortishi bilan asta-sekin kamayadi.

Yuqoridagi tenglamani logarifmlab quyidagi ifodani hosil qilamiz.

$$\ln \sigma = \ln A - E_g / 2kT \quad (6.4)$$

Bu tenglamani yarim logarifmik koordinitalarda grafik ravishda ko'rsatish mumkin. Hosil bo'lgan to'g'ri chiziq va uning φ burchak tangansi yarim o'tkazgich materiallarning asosiy parametri bo'lgan, ta'qiqlangan soha kengligi $E_g = 2kT\varphi$ ni aniqlaydi. Ta'kidlash lozimki, qiya to'g'ri chiziq, ya'ni elektr o'tkazuvchanlik logarifmik $1/T$ ga bog'liq ravishda o'zgarishi faqat toza kirishmalardan holi, xususiy o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan materiallar uchungina shunday ko'rinishga ega.

Kirishmaviy yarim o'tkazgichlarda $\ln \sigma$ ning $1/T$ dan bog'lanishi murakkab bo'lib, u ikkita qiya to'g'ri chiziqdan iborat bo'lishi mumkin va bir-biri bilan gorizonta qism orqali tutashgan bo'ladi. Past haroratli sharoitda o'lchash natijasida olingan $\ln \sigma = \ln A - E_g / 2kT$

tenglamadan hosil qilingan qiya to'g'ri chiziq tangensi yordamida kirishmalarning ta'qiqlangan sohada joylashgan energetik sathlari holatini aniqlash mumkin. YUqori haroratli sharoitda olingan hollarda esa yarim o'tkazgich materiallarning ta'qiqlangan sohasi kattaligini, ya'ni E_g ni aniqlash mumkin.

Elektronika elementi tayyorlashda yorug'lik nurlanishining yarim o'tkazgich material bilan o'zaro ta'siri, fotonlar energiyasini material-dagi elektronlarda yutilishi va chiqishi jarayonlari muhim ahamiyatga egadir.

Kvant mexanikasida elementar zarrachalar, shu jumladan elektron-lar ham to'liq xossalari-ga ham ega deb qaraladi. SHuning uchun elementar zarrachalar harakatini o'rganishda energiya (E) va impuls (R) bilan bir qatorda, ularning to'liq uzunliklari λ takrorlanuvchanligi ν va to'liq vektori $K = P/h$, (h – Plank doimiysi) ham ishlatiladi. Bu

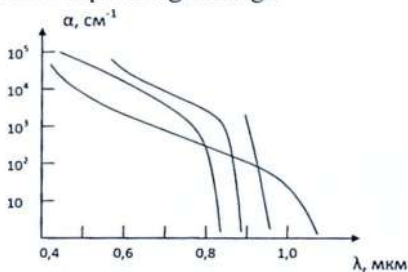
erda $E = h\nu$ va $P = h/\lambda$ ga teng. Kristallning sohali tuzilmasini E – K diagrammalar bilan tasvirlash mumkin. Bu erda energiya elektron-voltlarda (eV) to‘lqin vektori K – kristall panjara doimiysi qismlarida ko‘rsatiladi. SHu bilan birga K o‘qda ko‘rsatkichlar yordamida kristall panjaraning yo‘nalishi ko‘rsatiladi. E – K diagrammasi vositasida sohalaro o‘tishlarning yarim o‘tkazgich materialdagi harakteri va jumladan o‘tishning «to‘g‘ri» yoki «to‘g‘rimas» ligini aniqlash mumkin.

Optik yutilishni o‘lchanishidan aniqlangan E_g ning kattaligi, ko‘pincha yarim o‘tkazgich materialdagi erkin zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasiga, haroratga va kirishmalar energetik sathlarining ta‘qiqlangan sohada mavjudligiga bog‘liq bo‘ladi. Agar o‘tkazchanlik sohasi tubidagi va valent soha ustidagi holatlar zaryad tashuvchilar bilan to‘ldirilgan bo‘lsa, u holda krishmali yarim o‘tkazgich materiallar uchun E_g sof xususiy materialga tegishli qiymatidan kattaroq bo‘lishi mumkin. Agar kirishmalar hosil qilgan soha eng yaqin ruxsat etilgan soha chegarasi bilan birlashib ketsa (masalan, ko‘p miqdordagi kirishmalar kiritilgandagi kuzatiladigan holat), u holda E_g kamayadi. E_g ning bunday kamayishi asosiy yutilish chegarasiga ta‘sir qiladi.

Yarim o‘tkazgich materialda yutilish koeffitsienti α odatda to‘lqin energiyasining $1/\alpha$ masofada e marotaba kamayishi orqali aniqlanadi va u

$$N = N_0 \exp(-\alpha \ell) \quad (6.5)$$

dan topiladi. Bu erda N – yarim o‘tkazgich materialda ℓ chuqurlikka kirgan fotonlar oqimining zichligi, N_0 – material sirtini kesib o‘tuvchi fotonlar oqimining zichligi.



35- rasm YArim o‘tkazgichli ayrim materiallar uchun optik yutilish ko‘rsatkichining energiyada o‘zgarishi. 1 – Si, 2 – CdTe, 3 – GaAs, 4 – InP.

Materialning yutilish koeffitsienti α yutilish ko'rsatkichi K bilan $\alpha = 4\pi K / \lambda$ munosabat orqali bog'langan. SHunday qilib, ma'lum va aniq qalinlikka ega bo'lgan yarim o'tkazgich material namunalaridan o'tayotgan optik nurlanish intensivligini o'zgartirib K va λ ning shu modda uchun qiymatlarini topish mumkin.

Elektronika elementlari tayyorlanadigan ayrim yarim o'tkazgich materiallar uchun 35-rasmda α ning energiyadan o'zgarishi keltirilgan. Rasmdan ko'rinadiki, yutilish ko'rsatkichi α ning spektral xarakteristikasi keltirilgan yarim o'tkazgich materiallarda bir-biridan katta farq qiladi va bu farq asosan ularning sohali tuzilmasi va optik o'tishlar xarakteriga bog'liqdir. *CdTe*, *GaAs*, *InP* materiallarida to'g'ridan-to'g'ri soha-soha xarakteridagi optik o'tishlar mavjud bo'lib, nurlanish spektrida E_g dan ortiq energiyali fotonlar paydo bo'lishi bilan α tezda $10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-1}$ darajasiga ko'tariladi.

Kremniy materiallarida esa yutilish jarayoni $1,1 \text{ eV}$ dan boshlab to'g'ri bo'lmagan energetik o'tishlar orqali bo'ladi va buning uchun ham yorug'lik kvanti, hamda panjara tebranishlari kvanti-fotonlar ishtiroki talab qilinadi. SHuning uchun, yutilish ko'rsatkichi α asta-sekin ortib boradi. Faqat fotonlar energiyasi $2,5 \text{ eV}$ ga etgandan keyingina soha-sohali o'tishlar to'g'ridan-to'g'ri o'tishlarga aylanadi va yutilishi keskin orta boradi.

Yutilish koeffitsientining spektral xarakteristikasi shuni ko'rsatadiki, kremniy materialidan foydalanib, Quyosh spektrining juda katta qismini elektr tokiga aylantirish mumkin. Masalan, atmosferadan tashqaridagi quyosh nurlanishi uchun (AM 0) bu 74 % ni tashkil qiladi. Holbuki, agar material sifatida *GaAs* yarim o'tkazgich olinsa faqat 63 % quyosh nurlanishini elektr energiyasiga aylantirish mumkin. Ammo, «to'g'rimas» optik o'tishlarning asosiy yutilish chegarasida λ ning qiymati katta bo'lmaganligi sababli, butun keltirilgan quyosh spektri yutilishi uchun kremniyli quyosh elementi ning qalinligi 250 mkm dan kam bo'lmasligi kerak. Holbuki, xudi shunday sharoit uchun *GaAs* materialning qalinligi 2-5 mkm bo'lishi kifoyadir. SHuning uchun spektral xarakteristikaning bu xususiyatlarini yuqori samarali va yupqa qatlamli quyosh elementi ishlab chiqishda ahamiyati katta ekanligini doimo hisobga olish zarur.

Agar, yarim o'tkazgich sirtiga tushayotgan fotonlar energiyasi kam bo'lib, yutilish natijasida elektronlarni valent sohadan o'tkazuvchanlik sohasiga chiqara olmasa, nurlanish ta'sirida elektron kristall ichida

ruxsat etilmagan sohalarga o'tishi mumkin. Bunday holat uchun yutilishning spektral xarakteristikasini asosiy yutilish chegarasidan keyingi uzun to'liqlik qismida sezilishi mumkin. Bunday yutilish erkin zaryad tashuvchilar yutilishi deyiladi va bu jarayon shunday zaryad tashuvchilar konsentratsiyasiga bog'liq bo'ladi. Erkin zaryad tashuvchilar engil ionizatsiya bo'la oladigan kirishmalar konsentratsiyasiga bog'liq bo'lgani uchun, yutilish ham unga to'g'ridan-to'g'ri bog'liq bo'ladi. yarim o'tkazgich materiallarda bunday uzun to'liqlik yutilish xususiyatlarini o'rganish natijasida yutilishning bir necha turi aniqlangan. Jumladan, fazoviy panjara tebranishlarida yutilish, kirishmalarda yutilish, eksitonlarda yutilish. Eksiton – bog'langan elektron-teshik juftligi bo'lib, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini o'zgartirmaydi. Chunki kristall ichida alohida elektron yoki teshik harakatlari emas, balki bog'langan holat harakatidir.

Yutilish spektrlari kristall tuzilishi xususida kerakli har tomonlama foydali ma'lumotlar beradi. Jumladan, legirlanish darajasi, kirishmalarining aktivlanish energiyasini va ularning ta'qiqlangan zonada joylashgan energetik sathlarini aniqlashga imkon beradi. Masalan, yutilish spektrlari asosida kremniyda kislorodning bor yoki yo'qligini aniqlash mumkin (9 mkm). Spektrning uzun to'liqlik sohasida akslanish koeffitsienti R , bunday kirishmalar ortishi bilan keskin o'sishi kuzatiladi.

Takrorlash uchun savollar.

1. Kristallarda kirishma atomlari birikmalari hosil bo'lishining sabablari va oqibatlari qanday?
2. Kirishmaviy yarimo'tkazgichlarda ichki elektr maydoni vujudga kelishi sabablari nimada?
4. Effektiv diffuziya koeffitsienti nimalarga bog'liq?
5. Doimiy manbadan bir tomoni chegaralangan jismga diffuziyani qanday tushunish mumkin?
5. Vakansiyalar orqali diffuziya mexanizmlarini tushuntiring.
6. Diffuziyaning dissotsiativ mexanizmini tushuntiring.
7. Diffuziya jarayonlarida neytrallik sharti nima?

7-§. YARIMO‘TKAZGICH MATERIALLARGA ISHLOV BERISH.

Yarim o‘tkazgichli materiallarni qirqish. Yarim o‘tkazgichli materiallar asosan yombi ko‘rinishda o‘stiriladi (slitok). Yombining diametri, vazni, uzunligi har xil bo‘lishi mumkin. Undan tashqari materiallar qattiqligi bilan ham katta farq qilishi mumkin. Qirqish usullari asosan sim orqali qirqish, olmos yuritilgan gardish (disk) orqali qirqish va nisbatan yangi usul lazer nuri yordamida qirqishlarga bo‘linadi. Bu usullarni ishlatish davomida asosan qirqish jarayonida hosil bo‘ladigan chiqindilarni kamaytirish, qirqish jarayonida plastinalar sifatini saqlash va qirqish samaradorlikni oshirishga ahamiyat beriladi.

Kimyoviy ishlov berish. Bu texnologik jarayon davomida asosan yarim o‘tkazgichli materiallar yuzasiga ta’sir qilinadi va ular qatoriga kimyoviy va mexanik sayqal berish (polirovka), kimyoviy tozalash (ochistka) va kimyoviy emirish (travlenie) jarayonlari kiradi. Ishlov berish tartibi quyidagilardan iborat: taglikka o‘rnatish, yuvish va shliflash (bu jarayon katta raqamli abraziv kukundan kichkinasiga qarab asta-sekin olib boriladi). Sayqallash jarayoni quyidagi tartibda olib boriladi. Avvaliga namuna taglikka o‘rnatiladi, keyin shlifovka jarayonida ishlatilgan dastgohga yoki alohida dastgohga yumshoq matoh (M: baxmal, zamsh, batist, satin va shunga o‘xshashlar) tortiladi. So‘ngra namuna matohga malum bosim bilan yarim o‘tkazgichli material kontaktga keltiriladi va ma’lum tezlikda aylantiriladi 60-100 ayl/min. Matoh bilan namuna orasiga tarkibida olmos bo‘lgan suspenziya (olmos pastalar asosida tayyorlangan quyuq massa) quyiladi. Ishlatiladigan asosiy olmos pastalar markalari ASM 3, ASM 1 va hokazolar. Ishlov berish sifati va darajasi optik mikroskop yordamida nazorat qilinadi.

7.1. Yarim o‘tkazgichli materiallar sirtini kimyoviy yemirish jarayoni.

Kimyoviy emirish jarayoni. Yarim o‘tkazgichli materiallar sirtida mexanik ishlov natijasida hosil bo‘lgan deformatsiya bo‘lgan qatlamlarni sof yuza chegarasigacha olib tashlash uchun ishlatiladi. Ayrim hollarda YAO‘ qalinligini kamaytirishda ham ishlatiladi. Kimyoviy emiruvchilar uch turga bo‘linadi.

1. Selektiv (tanlovchi) emiruvchilar. Bular yordamida kerakli ma'lum kristallografik yo'nalishdagi yuzalarni, sirlarni chiqarish mumkin.

2. Sayqallovchi emiruvchi. Bu izotropik, ya'ni har xil yo'nalishda o'zgaras ma'lum emirish tezligiga ega bo'lgan emiruvchi.

3. Noselektiv emiruvchi. Bu emiruvchi material yuzasini nisbatan sayqallaydi va yuzada notekisliklar ham hosil qiladi.

Emiruvchilar tayyorlash uchun ximikatlarni ularning tozaligiga qarab tanlab olinadi. Ximikatlarni tozaligiga qarab quyidagi turlarga bo'linadi. T – texnik toza, XCH – ximiyaviy toza, CHDA – analiz uchun toza, OSCH – alohida spektral toza. Ushbu bitiruv malakaviy ishida maxsus laboratoriyada bajarilgan texnologiya ko'rinishlari rasmda ilova qilinadi.

7.2. Yarim o'tkazgichli materiallarni kesish jarayoni.

Yarimo'tkazgichli materiallar yuqori qattqlik va mo'rtlikka ega, shuning uchun ingot va gofretni kesishda metallga ishlov berishning an'anaviy usullari qo'llanilmaydi. Bundan tashqari, qimmatbaho yarimo'tkazgichli materiallarning minimal chiqindilarini ta'minlaydigan oqilona kesish usullarini tanlash katta ahamiyatga ega, chunki uning yo'qotilishi tayyor qurilmalar va integral mikrosxemalar narxini belgilovchi asosiy omillardan biridir.

Yarimo'tkazgichli asboblarni va IC larni ishlab chiqarishda kesish ikki marta amalga oshiriladi: quymalar plastinkalarga, plastinkalar esa kristallarga bo'linadi. Quyidagi kesish usullari eng keng tarqalgan:

- tashqi olmosli qirrali disklar (ingot va plitalar);
- ichki olmosli kesuvchi qirrali disklar (plastinkalarda ingot);
- matolar va simlar abraziv (ingot va plastinka) yordamida;
- yozish - plitalarga chizish chizish, keyin ularni kristallarga bo'lish.

Tashqi qirrali disk bilan kesish - ishlab chiqarish muhitida ingot va plastinalarni ajratishning eng oddiy va eng oson usuli. Diskning olmos qirrasi yuqori kesish qobiliyatiga ega, chunki diskning metall tagiga o'rnatilgan 20 - 60 mikronli olmos donalari ishlov beriladigan yuzadan eng kichik chiplarni olib tashlaydigan mikro kesgichlardir. 10 000 rpm gacha bo'lgan aylanish tezligi, ko'p sonli olmos donalari bo'lgan disk (mikro kesgichlar), ishlov berish ko'rsatkichlari yuqori. Ishqalanish tufayli kesish paytida katta miqdorda issiqlik hosil bo'lganligi

sababli, olmos pichog'i doimiy ravishda sovutish suvi bilan ta'minlanishi kerak. Etarli darajada yuqori aniqlikdagi bir nechta parallel kesishlarni olish uchun, shuningdek kesish ishini oshirish uchun milga bir nechta disklar o'rnatiladigan moslamalar ishlatiladi.

Katta diametrli disklardan foydalanganda ularning mustahkamligi muammosi etarlicha qattqlik tufayli yuzaga keladi. Yarimo'tkazgich materialining yo'qolishini kamaytirish uchun ingichka disklar kerak. Biroq, kesish kuchlari va tebranish ta'sirida diskarning qalinligi va diametri o'rtasidagi optimal bo'lmagan nisbat (1: 300 va undan ko'p) ularning deformatsiyasiga (egilishiga), kesish kengligining oshishiga, ishlov berishning pasayishiga olib keladi. aniqlik va nuqsonlarning shakllanishi (chipar, yoriqlar va boshqalar). Odatda, yarimo'tkazgichli quymalar diametri 80 - 125 mm va qalinligi 0,3 - 0,7 mm bo'lgan disklar bilan kesiladi. Bunday holda, uyaning minimal kengligi 0,45 mm.

Tashqi kesish diskleri ko'pincha kristallarga qo'shimchalarni ajratish uchun ishlatiladi. Bunday holda, teshik chuqurligi 0,5 - 1 mm. Diskning diametri bu holatda nisbatan kichik bo'lgani uchun uning qalinligi taxminan 0,1 mm bo'lishi mumkin, bu esa 0,15 mm tirqish kengligini ta'minlaydi.

Yarimo'tkazgichli plastmassalarni kristallarga kesish, shuningdek, B₄C bor karbid, kremniy karbid SiC yoki elektrokorund Al₂O₃ kukunlari va 1: 3 yoki 1: 4 nisbatda olingan suvdan tashkil topgan abraziv suspenziyaning kesish zonasiga etkazib beriladigan metall disklar yordamida ham amalga oshiriladi. Aylanayotganda disk suspenziyani ushlaydi, u tezlashib, kesilgan plastinkaga kuch bilan uriladi, natijada undan mikro zarrachalar ajralib chiqadi. Kesish jarayonida metall disk va yarimo'tkazgichli material orasidagi bo'shliqqa kiruvchi abraziv zarralar doimiy ravishda yangilanadi. Bunga qo'shimcha ravishda, bunday kesish maxsus sovutishni talab qilmaydi, chunki abraziv atala hosil bo'lgan issiqlikni yaxshi olib tashlaydi. Kesish jarayonida nafaqat abraziv kukun, balki disklar ham eskiradi, ularni 12 - 16 soatdan keyin almashtirishga to'g'ri keladi.

Ichki olmosli qirrali disk bilan kesish ingotlarni plastinalarga bo'lish uchun ishlatiladi. Kesuvchi asbob - diskning ichki chetiga bronzadan yoki po'latdan (1X18H9T) 0,1 - 0,15 mm qalinlikdagi plyonkadan yasalgan olmos qatlami. Sifatli va kichik kesish kengligi (taxminan 0,25 - 0,3 mm) va shuning uchun yarimo'tkazgichli

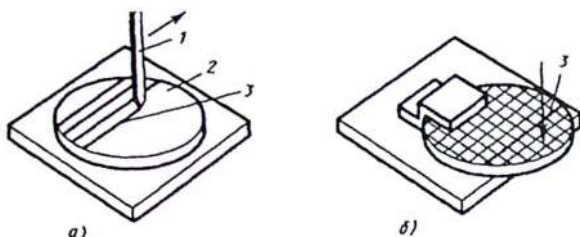
materiallarning kamroq (deyarli 60%) yo'qotilishi bilan birgalikda yuqori mahsuldorlik bu kesish usulini ko'rib chiqilganlardan farq qiladi. Diskni o'rnatishning o'ziga xos xususiyati uning yuqori qattiqligini ta'minlaydi, tebranishni sezilarli darajada kamaytiradi va plitalar yuzasini chuqur chizish va chipsiz olish imkonini beradi.

Pichoqli kesish eng qadimgi kesish usullaridan biridir. Qalinligi 0,1 - 0,2 mm bo'lgan 100 tagacha pichoqni (70S2XA, U8A yoki U10A po'lat po'latdan yasalgan) mahkamlangan bo'shliq bilan mahkamlash, ham quyma, ham plastinkalarni etarli sifat va samaradorlik bilan kesish imkonini beradi. 1,5 - 2 l / min tezlikda etkazib beriladigan suspenziya kesuvchi asbob bo'lib ishlaydi, masalan, diametri 30-40 mm bo'lgan kremniy quymalarini 4 - 8 soat ichida va germaniyni 2 - 5 soat.

Hosildorlikni oshirish uchun olmosli qirrali pichoqlar (chiziqlar) ishlatiladi. Qalinligi 0,05 - 0,1 mm bo'lgan olmosli pichoqlarning qalinligi va olmos kesish qatlamining kengligi 1,5 - 2 mm bo'lsa, ham quyma, ham plastinalarni kesish mumkin. Biroq, sifat jihatidan, chiziqlar bilan kesilgan plitalar, aşındırıcı süspansiyonlar yordamida disklar bilan kesilgan plitalardan past bo'ladi.

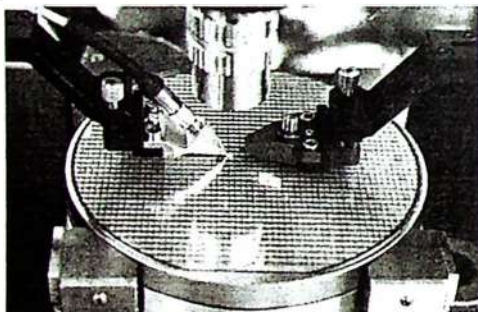
Diametri 0,11-0,15 mm bo'lgan volfram yoki qotishma MV-50 (50% Vt, 50% Mo) bilan kesish pichoqlar bilan kesishdan farq qilmaydi va uning afzalliklari yuqori tezlikda (100-200 m/s) kichik uyasi kengligi tufayli past moddiy chiqindilar. Bu usulning nochorligi-katta chuqurlikka kesilganda simning yon tomonga siljishi va sim uzilib qolganda uskunani uzoq muddatga sozlash.

Olmosni kesuvchi bilan yozish plitalarni kvadrat yoki to'rtbur-chaklar kristallarga ajratish uchun ishlatiladi. Bu usul yordamida, kengligi 20-40 mkm va chuqurligi 7-15 mkm bo'lgan tirmalgan chiziqlar yarim o'tkazgichli plastinalar yuzasiga o'zaro perpendikulyar bo'lgan ikki yo'nalishda yozuvchi (olmosli kesuvchi) bilan surtiladi (36 -rasm). Lokal ravishda xavf ostida yuzaga keladigan va to'plangan mexanik stresslar plitalarning mexanik kuchini pasaytiradi, shuning uchun plastinkalar kristallarga singib ketishi uchun yivlar bo'ylab zaif egiluvchi armaturani qo'llash kifoya.



36-rasm. Plitani (a) yozish va uni kristallarga (b) bo'lish: 1 - kesuvchi, 2 - yarimo'tkazgichli plastinka, 3 - kesimgan joy.

Ushbu usulning asosiy afzalligi - yarimo'tkazgichli materialni arralash va chiqindilarining yo'qligi. Chiplarning yo'qligi va yozishning uzluksizligi ko'p jihatdan plitalarning materialiga, ularning qalinligiga, to'sarning aşınma darajasiga va unga qo'llaniladigan kuchga bog'liq. Shunday qilib, germaniy va kremniy gofretlarining qalinligi 200 mikron bo'lsa, yuk mos ravishda 0,2 - 0,4 va 0,4 - 0,6 N, qalinligi 300 - 400 mikron 0,4 - 0,6 va 0,8 - 1,2 N ga teng. Yozish sifati plitalarning kristallografik yo'nalishiga bog'liq. Shunday qilib, (110) tekislikka yo'naltirilgan plastmassalarni ajratishda kristall o'lchamlari uchun eng qattiq bardoshlik ta'minlanadi. Kremniy va germaniy gofretlarini kesishning minimal bosqichi mos ravishda 500 va 400 mikronni tashkil qiladi.



37-rasm. Lazer nurlari bilan fotoelementga ishlov berish.

Lazer nurlari bilan yozish 37-rasmda keltirilgani kabi endi tobora ko'proq qo'llanilmoqda. Plitalardagi haroratning katta pasayishi tufayli etarlicha yuqori quvvatda (108 Vtgacha), aniq fokuslashda (10^{-5} - 10^{-6}

sm²) va lazer nurining qisqa ta'sir qilish vaqtida (10^{-9} sekundgacha), mahalliy stresslar hosil bo'ladi va bunga qo'shimcha ravishda, yiv hosil bo'lishidan material qisman bug'lanadi. Yuqori nurli kuch yoki impuls davomiyligi bilan plitalarni kesish mumkin.

Bu usulning afzalliklari oz miqdordagi mikro yoriqlar va mayda chiplar, chuqur yiv va yuqori ishlov berish tezligi, kamchiliklari esa materiallarni purkash bo'lib, ular plastinkalar uchun maxsus himoya qoplamalarini talab qiladi va asbob -uskunalarning qimmatligi.

Silliqlash va silliqdash. Kesilganidan keyin bajariladigan bu operatsiyalar plitalar tomonlarining tekislik-parallelligini, ularning geometrik o'lchamlarining berilganlarga mos kelishini va minimal sirt pürüzlülüğünü ta'minlash imkonini beradi. Bundan tashqari, silliqdash va abraziv jarayonida kesish jarayonida shikastlangan sirt qatlami qisman plastinalardan chiqariladi.

Silliqlash maxsus mashinalarda bir necha bosqichda amalga oshiriladi. Eng ko'p ishlatiladigan ikki turdagi silliqdash: bepul abraziv va olmosli g'ildiraklar.

Erkin abraziv bilan silliqdashda quyma temir, shisha, bronza va boshqalardan yasalgan g'ildiraklar (maydalagichlar) ishlatiladi, abraziv - bu Al_2O_3 , SiC, B_4C mikro changlari yoki 2,8 dan donagacha bo'lgan sintetik olmos asosidagi pastalar. 3 mikron. Qayta ishlangan yuzaning qisman vayron bo'lishi, abraziv zarrachalarning plastinkalar va maydalagichlar orasidagi siljishi natijasida yuzaga keladi. Qayta ta'sir qilish natijasida plitalarning yuzasi yoriqlar, chiplar, chizishlar bilan qoplangan, ularning chuqurligi asosan abraziv donalarning hajmiga bog'liq.

Olmosli g'ildiraklar bilan silliqdashda, o'tkir qirrali abraziv donalarni chizish va kesish tufayli material plitalar yuzasidan chiqariladi.

Qayta ishlash jarayonida qalinligi 60 - 100 mikron bo'lgan qatlam maydalanadi. Plitalarning qalinligida katta mikroro'tkazuvchanlik va notekislikni yo'q qilish uchun bir tomonlama va ikki tomonlama silliqdash amalga oshiriladi. Plitalarning qalinligi yoyilishi 1 mkm dan oshmasligi kerak, tekislik -parallellikda - 0,5 mkm.

Polishing minimal sirt pürüzlülüğünü va eng kichik shikastlangan qatlam qalinligini ta'minlaydi. Mexanik abraziv asosan mikro kesish, plastmassa deformatsiya va mikroro'tkazuvchanlikni yumshatish natijasida yuzaga keladi. Polishing - dastlabki va yakuniy (yaxshi).

Oldindan silliqlash uchun don o'lchamlari 1-3 mikron bo'lgan abraziv kukunlarga asoslangan olmos pastalari va suspenziyalar ishlatiladi. Yakuniy abraziv submikronli (1 mikrondan kam) olmos kukunlari va pastalari yoki alyuminiy, xrom, sirkonyum, kremniy va boshqalar oksidlariga asoslangan yumshoq abraziv kompozitsiyalar yordamida amalga oshiriladi.

Jilo zamsh, mato, kigiz va boshqalar bilan qoplangan polirovka yostiqlarida olib boriladi. Kremniyni oxirgi jilolash uchun KOH va NaOH eritmalari qo'shilgan holda sirkoniy va kremniy oksidlari asosidagi abraziv süspansiyonlar ishlatiladi. Ishqorlar sirtida hosil bo'lgan oksidlarni eritib yuboradi va shu bilan sirt qatlamining qattiqligini pasaytiradi, bu esa uni abraziv donalar yordamida yanada samarali olib tashlashga yordam beradi. Biroq, qanchalik ehtiyotkorlik bilan parlatilgan bo'lishidan qat'i nazar, mikro yoriqlar va ba'zi sirt deformatsiyalari qoladi. Shunday qilib, mexanik sayqallangan germaniya va kremniyning shikastlangan qatlamining chuqurligi mos ravishda 1,5 va 0,7 - 1,0 mikronni tashkil qiladi.

Polishing ham bir tomonlama va ikki tomonlama bo'lishi mumkin. Silliqlashdan so'ng, suyuq va quruq ishlov berishning keyingi operatsiyalariga o'tishdan oldin, yarimo'tkazgichli gofretlar sovun eritmalari, issiq deiyonizatsiyalangan suvda, toluolda silliqlash kukunlari va organik ifloslantiruvchi moddalardan yaxshilab yuviladi va keyin santrifugalarda quruq iliq havo oqimida quritiladi. Aks holda, ifloslanish plitalarning sayqallangan yuzasini zanglab ketadi.

Takrorlash uchun savol va masalalar

1. Kristallarda atomlarni neytronlar yordamida faoolashtirish mexanizmi qanday?
2. Sayoz holatli atomlar diffuziyasini alohida belgilari qanday?
3. Tez faollashuvchi atomlar bilan legirlash mexanizmlarini ayting.
4. Kirishma ionlarining elektronlar oqimi bilan ergashtirish effektini tushuntiring.
6. Kremniyda termik nuqsonlar hosil boiish mexanizmlarini ayting.

8-§. YARIMO‘TKAZGICH MATERIALLARGA KIMYOVIY VA ELEKTRKIMYOVIY ISHLOV BERISH.

Yarim o‘tkazgichli materiallarni qirqish. YARim o‘tkazgichli materiallar asosan yombi ko‘rinishda o‘stiriladi (slitok). YOmbinig diametri, vazni, uzunligi har xil bo‘lishi mumkin. Undan tashqari materiallar qattiqligi bilan ham katta farq qilishi mumkin. Qirqish usullari asosan sim orqali qirqish, olmos yuritilgan gardish (disk) orqali qirqish va nisbatan yangi usul lazer nuri yordamida qirqishlarga bo‘linadi. Bu usullarni ishlatish davomida asosan qirqish jarayonida hosil bo‘ladigan chiqindilarni kamaytirish, qirqish jarayonida plastinalar sifatini saqlash va qirqish samaradorlikni oshirishga ahamiyat beriladi.

Ximiyaviy ishlov berish. Bu texnologik jarayon davomida asosan yarim o‘tkazgichli materiallar yuzasiga ta’sir qilinadi va ular qatoriga ximik va mexanik sayqal berish (polirovka), kimyoviy tozalash (ochistka) va kimyoviy emirish (travlenie) jarayonlari kiradi. Ishlov berish tartibi quyidagilardan iborat: taglikka o‘rnatish, yuvish va shliflash (bu jarayon katta raqamli abraziv kukundan kichkinasiga qarab asta-sekin olib boriladi). Sayqallash jarayoni (polirovka) quyidagi tartibda olib boriladi. Avvaliga namuna taglikka o‘rnatiladi, keyin shlifovka jarayonida ishlatilgan dastgohga yoki alohida dastgohga yumshoq matoh (M: baxmal, zamsh, batist, satin va shunga o‘xshashlar) tortiladi. So‘ngra namuna matohga malum bosim bilan yarim o‘tkazgichli material kontaktga keltiriladi va ma’lum tezlikda aylantiriladi 60-100 ayl/min. Matoh bilan namuna orasiga tarkibida olmos bo‘lgan suspenziya (olmos pastalar asosida tayyorlangan qo‘yiq massa) quyiladi. Ishlatiladigan asosiy olmos pastalar markalari ASM 3, ASM 1 va hokazolar. Ishlov berish sifati va darajasi optik mikroskop yordamida nazorat qilinadi.

Ximik emirish jarayoni. YARim o‘tkazgichli materiallar sirtida mexanik ishlov natijasida hosil bo‘lgan deformatsiya bo‘lgan qatlamlarni sof yuza chegarasigacha olib tashlash uchun ishlatiladi. Ayrim hollarda YAO‘ qalinligini kamaytirishda ham ishlatiladi. Ximik yemiruvchilar (travitel) uch turga bo‘linadi.

1. Selektiv (tanlovchi) emiruvchilar. Bular yordamida kerakli ma’lum kristallografik yo‘nalishdagi yuzalarni, sirtlarni chiqarish mumkin.

2. Sayqallovchi (poliruyuhiy) emiruvchi. Izotropik ya'ni har xil yo'nalishda o'zgarmas ma'lum emirish tezligiga ega bo'lgan emiruvchi.

3. Nosektiv emiruvchi. Bu emiruvchi material yuzasini nisbatan sayqallaydi hamda yuzada notekisliklar ham hosil qiladi.

Yemiruvchilar tayyorlash uchun ximikatlar ularning tozaligiga qarab tanlab olinadi. Ximikatlar tozaligiga qarab quyidagi turlarga bo'linadi. T – texnik toza, XCH – ximiyaviy toza, CHDA – analiz uchun toza, OSCh – alohida spektral toza. Yarimo'tkazgichli substratlarni kimyoviy tozalash jarayoni ularning sirt qatlamini kislotali yoki ishqoriy etchantlar ta'sirida eritishdan iborat. Ortiqcha yopishtiruvchi va haroratni aniqlash kimyoviy ishlov berishni doimiy tezlikda bajarishga imkon beradi va shu orqali yarimo'tkazgichli materialning olib tashlangan qatlamining qalinligini aniq hisoblab chiqadi.

Ammo shuni hisobga olish kerakki, mexanik ishlov berish natijasida shikastlangan qatlamning qotish tezligi boshlang'ich bezovta qilinmagan materialning ishlov berish tezligidan ancha yuqori.

Germaniyni silliqlash. Germaniy uchun etantlarning asosiy komponentlari nitrat va gidroflorik kislotalar, shuningdek vodorod peroksiddir. Nitrat kislota germaniyning kuchli oksidlovchisidir va gidroflorik kislota germaniy dioksidini yaxshi eritadi. Vodorod periksni etchant sifatida ishlatganda, germaniyni kimyoviy tozalash 70-80 ° S haroratda amalga oshiriladi. Kimyoviy reaksiya tezlashtiruvchi (brom) yoki kechiktiruvchi (sirka kislotasi) rolini o'ynaydigan, ba'zida aŭchantning asosiy qismlariga qo'shimchalar qo'shiladi.

Kremniy bilan ishlov berish. Kremniyning kimyoviy inertligi dastlabki plastinkada faqat gidroksidi va gidroflorik kislotaaning suvli eritmalarida eriydigan oksidli plyonka mavjudligi bilan izohlanadi. Shuning uchun kremniyni kimyoviy ishlov berish uchun ikki xil etchant ishlatiladi; kislotali va ishqoriy. Nitrat va gidroflorik kislotalarning har xil aralashmalari kislota almashtirgich sifatida ishlatiladi.

Kremniy yuzasida paydo bo'ladigan cho'kmalar va cho'kmalarda etchant kontsentratsiyasining farqi tufayli, chiqishlar tezroq eriydi. Buning natijasida taxalluslashga qarshi kurash olib boriladi. Yarimo'tkazgichli substrat yuzalari.

Ishqoriy etchant sifatida KOH va NaOH ning suvli (10–20%) eritmaları ishlatiladi. Ishqoriy kompozitsiyalarda kremniyni qazib olish 90 - 100 ° S haroratda amalga oshiriladi. Ishqoriy etchantlarda ishlov

berish kremniyning kerakli oynali yuzasini bermaydi, shuning uchun polchirish vositasi sifatida bu turdagi aşındırıcı sanoatda keng qo'llanilmaydi. Shu bilan birga, anizotrop deb ataladigan, ya'ni substrat yuzasida ma'lum bir shakldagi quduqni qazish kerak bo'lgan hollarda, ishqorli qotishma agenti ishlatiladi. ICning alohida maydonlarini ajratish uchun keng qo'llaniladigan V shaklidagi quduqlar alohida qiziqish uyg'otadi.

Kremniy uchun selektiv aşındırıcı N_2H_4 suv bilan aralashmasidir. Bu yopishtiruvchi substrat tekisligiga perpendikulyar va kristallografik tekislikka (100) to'g'ri keladigan yo'nalishda kremniyning yuqori aşınma tezligini ($120^\circ C$ haroratda taxminan $0,05 \text{ mkm} / s$) ta'minlaydi.

8.1. Yarimo'tkazgichli plastinalarni kimyoviy-dinamik qayta ishlash.

Agar kimyoviy ishlov dastlabki yarimo'tkazgichli substrat statik (statsionar) holatda bo'ladigan tarzda amalga oshirilsa, yarimo'tkazgichli materialning erishi jarayoni substratning butun yuzasida notekis o'tadi. Bu sirtning turli qismlarida gravitatsiyali eritmaning turlicha kontsentratsiyasi, substrat yuzasining notekisligida issiqlikning notekis chiqishi va substratning turli qismlariga etchantning notekis etkazib berilishi bilan bog'liq.

Yarimo'tkazgich texnologiyasidagi bu kiruvchi ta'sirlarni bartaraf etish uchun yarimo'tkazgichli substratlarni kimyoviy-dinamik qayta ishlash deb ataladi. Kimyoviy-dinamik ishlov berish tamoyili etchantni to'g'ridan-to'g'ri substrat yuzasida faol aralashtirishdan va etjant hajmida substratning doimiy aylanishidan iborat. Etchantni aralashtirish, aşındırıcı kamerada, etchant kompozitsiyasini eng tez moslashtirishga yordam beradi va natijada, yarimo'tkazgichli substratni kimyoviy tozalashning bir xilligiga olib keladi.

Yarimo'tkazgichli substratlarni kimyoviy-dinamik qazish uchun o'rnatish asosiy bo'linma sifatida ftoroplastik baraban oynasini o'z ichiga oladi, unga substratli kassetalar joylashtiriladi. Baraban oynasi $20-40^\circ$ burchak ostida oddiy tekislikka moyil bo'lib, vites qutisi orqali dvigatel miliga ulanadi. Dvigatel yoqilganda, baraban oynasi ma'lum tezlikda aylana boshlaydi va uning tagiga tagliklari qo'yilgan kassetlar uning ichki yuzasi bo'ylab siljiydi.

O'rnatish kassetalarni substratli yuklash va tushirish, shuningdek, gravitatsiya jarayonida substratlarni harakatlanish tezligini rostdash uchun avtomatik qurilma bilan jihozlangan. Aşındırıcı vannalar, shuningdek kislotla saqlash tanklari, operatoridan butunlay ajratilgan, bu substratlarni qayta ishlashning kimyoviy-dinamik jarayonining xavfsizligini kafolatlaydi.

8.2. Yarimo'tkazgichli plastinalarni elektrokimyoviy tozalash.

Yarimo'tkazgichli substratlarni elektrokimyoviy tozalash ikki jarayonni o'z ichiga oladi: elektrolitik anodli eritma va yarimo'tkazgichli materiallarni anod-mexanik ishlov berish.

Elektrolitik anodli eritish jarayoni elektrolitga botirilgan substratga ijobiy potentsialni etkazib berish orqali amalga oshiriladi. Eritmada elektr o'tkazuvchanlikning ion mexanizmi yarimo'tkazgich va metallardan elektronga o'zgarganda kimyoviy o'zgarishlar sodir bo'ladi. Butun jarayon oksidlanish-qaytarilish reaksiyasi bo'lib, anod oksidlovchi vosita bo'lib xizmat qiladi, chunki u elektronlarni, katodni esa qaytaruvchi vosita sifatida qabul qiladi, chunki ularni beradi.

Aralashmada ishlov berish ($H_2S + H_2$). Kremniyning vodorod sulfidi bilan o'zaro ta'siri yuqori ish haroratida (taxminan $1200^\circ C$) sodir bo'ladi. Reaksiya Si (qattiq) + H_2S (gaz) = SiS (bug') + H_2 (gaz) shaklga ega.

Kremniyni qayta ishlash uchun vodorod oqimida 0,5% vodorod sulfidi ishlatiladi. Vodorod sulfidining asosiy kamchiligi uning toksikligi. Bug'-gaz aralashmasida ($H_2S + H_2$) ishlov berilgan kremniyli qatlamlarda o'stiriladigan epitaksial qatlamlar kamroq yig'ilish nozozliklari va begona qo'shimchalarni o'z ichiga oladi.

Aralashmada ishlov berish ($SF_6 + H_2$). Vodorod sulfiddan farqli o'laroq, oltingugurtli geksaflorid toksik bo'lmagan moddadir. Uning kremniyni bug'-li-gazli tozalashda ishlatilishi jarayonning ish haroratini $1000^\circ C$ ga tushirishga imkon beradi. O'zaro ta'sir reaksiyasi quyidagicha:



Aralashmadagi ishlov berish jarayoni ($SF_6 + H_2$) kremniyni mahalliy ishlov berish uchun ishlatiladi. Bu tekis tubli va yon yuzlari perpendikulyar bo'lgan tushkunliklarni (teshiklarni) olish imkonini beradi.

8.3. Yarimo'tkazgichli plastinalarni plazma-kimyoviy tozalash.

Plazma-kimyoviy ishlov berish, substrat faol gazlar yoki gaz aralashmalari plazmasi bilan o'zaro ta'sir qilganda, qattiq fazada bo'lgan substratning sirt qatlamini olib tashlash jarayonlarida qo'llaniladi. Bunday holda, substrat materialining reaktiv qotish jarayoni sodir bo'ladi.

Substratlarni plazma-kimyoviy tozalash jarayoni ion-plazma jarayonidan farq qiladi, chunki substrat yuzasidan moddalarni olib tashlash nafaqat musbat zaryadlangan plazma ionlari bilan bombardimon qilish natijasida, balki kimyoviy o'zaro ta'sir natijasida sodir bo'ladi. faol plazma reagentlari bo'lgan substrat.

Substratlarni plazma-kimyoviy tozalash usuli bir qator afzalliklarga ega. Birinchidan, nazorat qilish oson va uni amalga oshirishning barcha bosqichlarida rejimni sozlash imkonini beradi. Ikkinchidan, u ahamiyatsiz inertiyaga ega. Uchinchidan, bu "quruq" jarayon bo'lib, u suyuq etchantlarni talab qilmaydi. To'rtinchidan, plazma-kimyoviy usul yuqori aniqlik va substrat yuzasini qayta ishlash aniqligiga ega.

Plazma-kimyoviy ishlov berishda bir kamerada bir necha xil texnologik operatsiyalarni birlashtirish mumkin: sirtini tozalash, qirib tashlash va yangi qatlamlarni yotqizish. Bu substratlarning ifloslanish ehtimolini keskin kamaytirishga, shuningdek, substratlarni yuvish va quritish kabi zahmatli texnologik operatsiyalarni istisno qilishga imkon beradi.

Kremniyni izotropik qazish $CF_4 + O_2 + N_2$ gaz aralashmasida amalga oshiriladi. Past haroratli plazmada CF_4 fluor ionining ajralib chiqishi bilan parchalanadi. Ish kamerasini to'ldiradigan kislorod molekullari ionlanadi va oksidlanishidan oldin kremniy yuzasi bilan osongina o'zaro ta'sir qiladi. Fluor ionlari oksidli qatlam bilan o'zaro ta'sirlanib, yuqori uchuvchan SiF_4 birikmasini hosil qiladi, u substrat yuzasidan tezda chiqariladi. Bu aralashmada azotning mavjudligi past haroratli plazma sharoitida kislorodning ionlanishiga yordam beradi.

Kremniyni anizotropik qazish har xil gaz aralashmalarida amalga oshiriladi, bu esa kerakli anizotropiya ko'effitsientini tanlash imkonini beradi. Masalan, (100) tekislik bo'ylab kremniyning qotish tezligining (111) tekislikdagi kremniyning tortish tezligiga nisbati $CCl_4 + O_2$ uchun 30, $C_2F_6 + O_2$ uchun 1,1, $C_2Cl_2F_4 + O_2$ uchun 0,8 ga teng.

Takrorlash uchun savollar

1. Kristallardagi kirishma atomlarining o'zaro ichki ta'sirlashuvi turlari

va uning oqibatlarini ayting.

2. Partsial erkin energiyani ta'riflang.

3. Ideal eritmalar hosil qilish shartlari qanday?

4. Fermi energiyasining fizik ma'nosi nima?

5. Lokal tebranishlar deb nimaga aytiladi?

III.BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA OPTIK XODISALAR.

9-§. YARIMO'TKAZGICH MATERIALGA TERMIK ISHLOV BERISH.

Yarimo'tkazgichli plastinalarni termik ishlov berish ko'plab texnologik marshrutlarda laboratoriya va sanoat uskunalariga yuqori talablarni qo'yadigan mikroelektronik piramoralarning shakllanishidagi muhim bosqich hisoblanadi. Bunday jarayonning eng muhim xususiyatlari: namunalarni isitish / sovutish tezligi va bir xilligi, maksimal harorat, ishlov berish vaqti, gaz muhitining boshqariladigan parametrlari. Bunday jarayonni amalga oshirish uchun uning eng muhim texnologik parametrlarining yuqori qiymatlarini ta'minlaydigan universal uskunar talab qilinadi.

An'anaga ko'ra, yarimo'tkazgichli gofretlarni issiqlik bilan ishlov berish uchun kvartsli reaktorli pechlar ishlatiladi. Zamonaviy ixcham kvarts reaktorida halogen akkor lampalar asosida isitish elementi ishlatiladi. Natijada, bunday lampalarning radiatsiya diapazonida kvarts optik jihatdan shaffof bo'lgani uchun namunalar nurlanish usuli bilan isitiladi. Bunday isitish elementlarini kvarts reaktorida ishlatganda, namunani yuqori isitish tezligini ta'minlash mumkin - maksimal 1200 °S haroratda 100 °S/s gacha. Bunday holda, maksimal jarayon harorati kvartsning fizik xususiyatlari tufayli reaktor materialining parchalanishi bilan cheklanadi. Xuddi shu sababga ko'ra 1200 °S dan yuqori haroratlarda uzoq muddatli jarayonlarni amalga oshirish mumkin emas. Bundan tashqari, issiqlik bilan ishlov berishdan keyin namunalarni sovutish tezligi jiddiy muammo hisoblanadi; xususan, bunday jarayonning davomiyligi 30 daqiqagacha bo'lishi mumkin.

Namunani sovutish uchun inert gaz oqimi, masalan, azotdan foydalanish mumkin, ammo bunday tizimning samaradorligi past, chunki namunani sovutish darajasi past va 300 °S dan past haroratlarda gaz sarfi katta. Birinchi holat ba'zi texnologik jarayonlar uchun juda muhim bo'lishi mumkin, masalan, tavlaniş uchun A_{III} B_V nanogeterostrukturalarining ko'pkomponentli kontaktli metallizatsiyasi. Yuqoridagi kamchiliklarni bartaraf etish uchun ularni tez isitish va sovutish imkoniyati bilan boshqariladigan gaz muhitida namunalarni

yuqori haroratli issiqlik bilan ishlov berish uchun reaktor dizayni (38-rasm) taklif etiladi.



38-rasm. Tavsiya etilgan dizaynli reaktorda kremniyli plastinkani o'rnatish.

An'anaviy kvartsdan farqli o'laroq, taklif etilayotgan reaktor zanglamaydigan po'latdan yasalgan bo'lib, ikki devorli bo'lib, bu suv bilan sovutish imkonini beradi. Galogen lampalar asosida isitgichdan nurlanish reaktorning bir tomonidan kvarts oynasi orqali kiritiladi. Namuna ostida suv bilan sovutilgan reflektor joylashgan bo'lib, u ikki tomondan bir xil yoritishni ta'minlaydi. Reaktorga yuklash tizimi shu tarzda ishlab chiqilganki, ushbu jarayon davomida namuna uchta ushlagichda ("pinalar") joylashgan bo'ladi.

Natijada, namunani vertikal ravishda siljitish mumkin va isitish tezligi va bir xilligiga ta'sir qilish uchun qo'shimcha imkoniyat mavjud. Ushbu harakat tufayli namunani tez sovutish ham mumkin - issiqlik bilan ishlov berilgandan so'ng uni egalari suv bilan sovutadigan reflektorga tushiradilar, bu esa past harorat oralig'ida sovutish vaqtini sezilarli darajada qisqartirishga imkon beradi.



39-rasm. Qurulmaning umumiy ko'rinish.

Namuna materialiga qarab, uning tez sovishini boshlanishi harorati turlicha bo'lishi mumkin, ammo umuman olganda, ushbu rejimda namunani xona haroratiga qadar sovutish vaqti bir necha daqiqagacha qisqartirilishi mumkin. Haroratni boshqarish termojuftlar va optik pirometrlar yordamida amalga oshirilishi mumkin, ularning kirishlari namuna ostidagi reflektorda joylashgan. Reaktorning bunday dizayni yuqori isitish va sovutish tezligi bilan 1200°C dan yuqori haroratlarda uzoq muddatli issiqlik bilan ishlov berish jarayonlarini amalga oshirishga imkon beradi. Tavsiya etilgan reaktor asosida ishlab chiqarilgan bino (39-rasm) "NTO" YoAJ (SemiTEq savdo markasi) tomonidan seriyali ishlab chiqarilgan STE RTA issiqlik bilan ishlov berish bloklari qatorini kengaytirdi.

9.1. Metall va qotishmalarni issiqlik va kimyoviy issiqlik bilan ishlov berish.

Issiqlik bilan ishlov berish deganda, jarayonning mohiyati ma'lum rejimlarga muvofiq mahsulotlarni isitish va sovutish kiradi, buning natijasida tuzilish, faza tarkibi, mexanik va fizik xossalari o'zgaradi. Kimyoviy-termik ishlov berishning har xil turlari ham qo'llaniladi, uning mohiyati mahsulotlarning sirt qatlamini azot, uglerod yoki ba'zi metallar (alyuminiy, xrom. Berilyum) bilan qotishtirish va keyinchalik issiqlik bilan ishlov berishdir.

Issiqlik bilan ishlov berish maqsadiga qarab, uning harorati bor, isitish harorati, ushlab turish vaqti va sovutish tezligi bilan farqlanadi.

Po'latni issiqlik bilan ishlov berishning asosiy turlari - tavlanish, normalizatsiya, söndürme, temperleme.

Tozalash qattiqlikni pasaytirish, donni tozalash, ishlov berish qobiliyatini yaxshilash va stressni engillashtirish uchun ishlatiladi. Pishirish uchun po'lat ma'lum bir haroratgacha isitiladi, ushlab turiladi va issiqlik manbai o'chirilgan pechda past tezlikda sovutiladi.

Normallashtirish - po'latni kritik nuqtadan yuqori haroratgacha qizdirilishini, shu haroratda ushlab turishni, tinch havoda tavlanishga qaraganda tezroq sovishini anglatadi. Maqsad - po'latga nozik taneli tuzilish berish. Normallashtirish kuchning sezilarli darajada oshishiga olib keladi, lekin egiluvchanligi kamroq bo'ladi. Tozalashdan afzalligi past narx.

Qattiqlashuv - bu po'latni isitish, uni ma'lum vaqt davomida ma'lum bir haroratda ushlab turish va keyinchalik keskin sovutishdan iborat. Maqsad - qattiqlik va kuchni oshirish. Söndürme paytida, materialda ichki stresslar paydo bo'ladi, egiluvchanlik va ta'sirchanlik keskin kamayadi. Bu ish paytida qismning mo'rt sinishiga olib kelishi mumkin.

Ichki kuchlanishlarni pasaytirish va qotib qolgandan keyin egiluvchanlik va chidamlilikni oshirish uchun qotib qolgan po'latdan past haroratdan yuqori bo'lmagan haroratgacha qizdirish, shu haroratda ishlab turish va undan keyin sovutishni o'z ichiga oladi.

9.2. Haroratga qarab ta'tilning uch turi mavjud: past, o'rta, yuqori.

Past harorat 150 ... 250 ° S haroratda amalga oshiriladi. Po'latning qattiqligi biroz pasayadi. Past temperatura natijasida hosil bo'ladigan struktura temperli martensit yoki temperli martensit deb ataladi. Kesish va o'lash asboblari, sovuq shakllantirish uchun qoliqlar, shuningdek yuqori aşınma qarshiligiga ega bo'lgan qismlar past temperatura ta'sirida bo'ladi.

O'rtacha temperatura 350 ... 450 ° S haroratda amalga oshiriladi. O'rtacha temperatura bilan tsementit plastinka shaklida emas, balki po'latning qattiqligi oshishiga hissa qo'shadigan eng kichik donalar shaklida hosil bo'ladi. Yuqori egiluvchanlikka ega bo'lishi va etarli darajada yopishqoqlik chegarasiga ega bo'lishi kerak bo'lgan mahsu-

lotlar (buloqlar, buloqlar va boshqalar) o'rtacha temperatura ta'sirida bo'ladi.

Yuqori temperatura 500 ... 650 ° S haroratda amalga oshiriladi. Natijada, qoldiq stresslar to'liq yo'q qilinadi, po'lat etarlicha yuqori quvvatda yaxshi plastisit va qattqlikka ega bo'ladi. Bunday temperlash ish paytida zarba va o'zgaruvchan yuklarni boshdan kechiradigan muhim qismlar uchun mo'ljallangan.

Po'latning mexanik xususiyatlarining butun majmuasi takomil-lashganligi sababli, qattiqlashuv va keyinchalik yuqori temperatura o'z ichiga olgan er -xotin issiqlik bilan ishlov berishni termal yaxshilash deb atashadi.

Kimyoviy issiqlik bilan ishlov berish. Kimyoviy issiqlik bilan ishlov berish metallning sirt qatlamining kimyoviy tarkibi, tuzilishi va xususiyatlarini o'zgartirish uchun kimyoviy va termal ta'sirdan iborat. Kimyoviy-termik ishlov berish jarayonida metallning tegishli element bilan sirt to'yinganligi uning yuqori haroratda suyuq, qattiq yoki gazsimon muhitdan atom shaklida tarqalishi paytida sodir bo'ladi. Kimyoviy termik ishlov berishning asosiy turlari sirt qatlami to'yingan elementlarning nomlariga ko'ra tasniflanadi. Masalan, uglerod bilan to'yinganlik karbürizasyon, azot - nitridlanish, xrom - xrom qoplama deyiladi.

Texnologiyaning turli sohalarida kimyoviy issiqlik bilan ishlov berishning keng qo'llanilishi, sirtning qattqligi, aşınma qarshiligi va korroziyaga chidamliligini oshirish orqali mashina qismlari va mexanizmlarining ishonchligi va mustahkamligini oshiradi.

Kimyoviy issiqlik bilan ishlov berish quyidagilardan iborat.

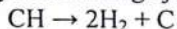
- aloqa yuzasida "metall -gazsimon muhit" paydo bo'ladigan va atom holatida diffuzion elementning ajralib chiqishiga olib keladigan ajralish;

- absorbsiya - erkin atomlarning sirtidan yutilishi;
- diffuziya - to'yingan elementning sirt qatlamiga chuqur kirib borishi.

Asosiy jismoniy jarayon - bu diffuziya, uning tezligi harorat oshishi bilan ortadi, diffuziya elementi chuqurroq kirib boradi.

Tsmentlanish po'latdan yasalgan sirt qatlamining tegishli muhitda - karbürizatorda qizdirilganda uglerod bilan diffuziya to'yinganligidan iborat. Tsmentlash jarayoni ostenit barqaror bo'lganda, uglerodni ko'p miqdorda eritib yuboradigan haroratda (900 ... 950 ° C) sodir bo'ladi.

Tsementlash qattiq, suyuq va gazli karbüratörlerde amalga oshiriladi. Gazli karbürizasyon - eng samarali jarayon. Karburizatsiyani ta'minlaydigan asosiy reaksiya metanning ajralishi hisoblanadi:



0,1 dan 0,35% gacha uglerodli past uglerodli va qotishma po'latlar sementlanadi. Karbürizasyondan keyin po'latdan yasalgan sirt qatlami qalinlikdagi uglerodning o'zgaruvchan kontsentratsiyasiga ega bo'lib, sirtidan qismning yadrosigacha kamayadi. Shu munosabat bilan, tsementlangan qatlam strukturasi sekin soviganidan so'ng, uchta zonani ajratish mumkin (sirtidan boshlab): giperektoid, evtetoid va gipoeutetoid. Tsementlangan qatlamning umumiy qalinligi 0,8 ... 3,0 mm.

Karbürizasyondan so'ng, kerakli xususiyatlarni olish uchun, issiqlik bilan ishlov berish amalga oshiriladi - past haroratda söndürme. Issiqlik bilan ishlov berish natijasida sirt qatlami aşınmaya bardoshli tuzilishga ega bo'ladi va uning past uglerodli yadrosi juda yopishqoq bo'lib chiqadi. Ko'pincha, turli mexanizmlarning tishli g'ildiraklari mustahkamligini oshirish uchun sementlanadi.

Nitridlanish sirt qatlamining azot bilan mos muhitda tarqalishining o'yinganligidan iborat. Nitridlanishdan oldin po'latdan issiqlik bilan ishlov beriladi - so'ndirish va yuqori temperatura.

Azot bilan juda qattiq va issiqlikka chidamli nitridlarni hosil qila oladigan xrom, molibden, vanadiy va boshqa elementlarni o'z ichiga olgan qotishma po'latlar nitridlanadi. Nitridlanish 500 ... 600 ° S haroratda amalga oshiriladi. Qism yuzasida sodir bo'ladigan asosiy reaksiya - bu ammiakning ajralish reaksiyasi.

Nitridlanishdan so'ng, po'lat yuqori qattqlik, aşınma va korroziyaga chidamlilikka ega bo'ladi. Bu xususiyatlarga ko'ra, nitridli po'latlar karburlangan po'latdan ustun turadi. Shu bilan birga, nitridlangan qatlam zarba yuklariga nisbatan kamroq chidamli va kontaktga chidamliligi pastroq. Jarayonning uzoq davom etishi (70 soatgacha) tufayli, nitridlashdan foydalanish iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiqdir, masalan, avtoulavlarning krank vallari, ichki yonish dvigatellarining silindrlari laynerlari, turli armatura va boshqalar.

Xrom qoplamasi po'latdan yasalgan sirt qatlamining xrom bilan mos muhitda 900 ... 1300 ° S haroratda diffuzion to'yinganligidan iborat. Krom qoplamasi po'latning 800 ° C gacha issiqlikka chidamliligini, yuqori korroziyaga va eroziyaga chidamliligini ta'minlaydi.

Bug'elektr stantsiyalarining qismlari, bug' armaturalari, klapanlar, vanalar, tarmoq quvurlari xrom qoplangan. Korroziyaga chidamliligini oshirish uchun transformator po'latdan xrom qoplamasi qo'llaniladi. Bunday holda, po'lat qo'shimcha ravishda yuqori issiqlik qarshiligiga ega bo'ladi.

Takrorlash uchun savollar

1. p –va n - yarimo'tkazgichlar kontaktga keltirilganda energiyasi qanday bo'ladi?

2. Diffuziya toki nima?
3. Dreyf tokini hosil qilish sabablari?
4. p-n o'tishning to'g'ri ulanishi deganda nimani tushunasiz?
5. p-n o'tish toklari haqida gapiring?
6. Yarimo'tkazgichlarda kontakt hodisalar?

10-§. YUQORI VAKUUM OLISH. VAKUUM VA VAKUUM NASOSLARI HAQIDA UMUMIY TUSHUNCHALAR.

Turbomolekulyar nasos va quruq foreline nasos yordamida ultra yuqori vakuum (UHV, 10^{-8} Pa dan past) yaratish. Yog'siz (quruq) nasos tizimlari - kerakmi?

Ultra yuqori vakuum (UHV) atamasi bilan biz bosim 10^{-5} Pa (10^{-7} mbar) dan past bo'lgan gaz holatini tushunamiz. Ushbu bosim darajasi foreline va yuqori vakuumli nasoslarning turli xil birikmalari yordamida hosil bo'lishi mumkin. Yog'quyiladigan rotatsion qanotli vakuum nasoslari va diffuzion nasoslar ko'plab qo'llanmalar uchun keng qo'llaniladi (1-rasm). Diffuzion nasoslardan yog'ning teskari oqimi vakuum kamerasi ichida ifloslanishni keltirib chiqaradi, bu ko'plab dasturlar uchun asosiy kamchilikdir. Shuning uchun yo yog'siz tizimdan voz kechasiz (quruq), yoki uglevodorod bug'larining past haroratli tuzog'i sintetik ishchi suyuqlik yordamida o'rnatiladi.

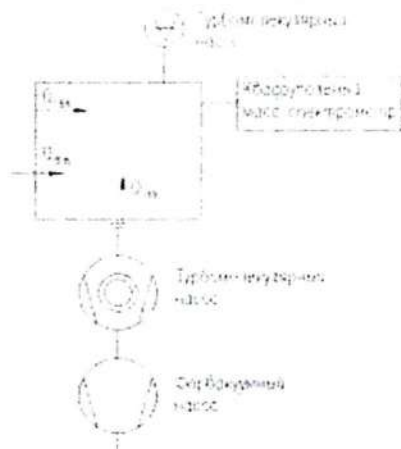
Hozirgi vaqtda uglevodorodlar ishtirokisiz vakuum hosil qilish uchun (Izoh: uglevodorod molekulari aniq usul bilan kuzatiladi - kvadрупolli mass spektrometr yordamida qoldiq spektrni kuzatish, shuning uchun uglevodorodlar bo'lgan massalarda mutlaq 0 ni ko'rmaymiz. Biz ko'rib chiqamiz uglevodorodsiz muhit, agar ular uchun spektr vodorod spektridan kam bo'lsa). yog'siz foreline nasosining turbomolekulyar nasos bilan birikmasi ishlatiladi. Yog'bilan to'ldirilgan nasos vositalaridan foydalanganda, favqulodda vaziyatlarda, aylanadigan qanotli nasosdan yog' bug'lari pastki bosim maydoniga tushadi. Vakuum tizimini tashkillashtirishning murakkabligi sababli, pompalanadigan hajmga kiradigan yog'bug'larini hisobga olmaganda, yog'siz siqilgan forel nasoslardan foydalaniladi: SCROLLVAC spiral vakuum nasoslari, ECODRY ko'p bosqichli ildiz nasoslari, DIVAC diafragma nasoslari, VARODRY kichik vint vakuum nasoslari.

Quruq nasosli nasosli nasos va turbomolekulyar nasos natijasida uglevodorodsiz vakuum paydo bo'lishi mumkin. Qoldiq gazlar spektrida uglevodorodlar bo'ladi, ammo aksariyat jarayonlar uchun bu ahamiyatsiz bo'ladi.



40-rasm. Ultra yuqori vakuum (UHV)
qurilmasining umumiy ko'rinishi.

Qoldiq gazning o'ta yuqori vakuum sharoitida spektrini tahlil qilaylik. Umumiy bosimdagi qoldiq gaz tahlili shakl. 2. Ushbu spekt-rning massa diapazoni 0 - 50 amu qiymatlari bilan cheklangan. (atom massasi birligi), bu diametri 6 mm ($L = 100$ mm) bo'lgan tayoqlar tizimiga ega bo'lgan kvadropolli mass-spektrometr (QMA) yordamida olingan.



41-rasm. Ultra yuqori vakuum (UHV)
qurilmasining sxematik ko'rinishi.

Spektrlarni tahlil qilib, ion oqimlarini massaga bog'lab, biz barcha qiymatlarni jadvalga o'tkazamiz. Eng katta cho'qqisi vodorod uchun topilgan (2 amu). Suv (16, 17 va 18 amu), azot (28 amu) va CO₂ (44 amu) kabi boshqa molekulalarning kontsentratsiyasi ancha past, kata-ligi bir martadan kam. H₂ ga qaraganda. Vodorod ionlari oqimining barcha tepaliklar yig'indisiga nisbatan ulushi deyarli 90% ni tashkil qiladi. Shuning uchun, kelgusida ko'rib chiqish uchun UHV sharoitida asosiy gaz - vodorodga e'tibor qaratish maqsadga muvofiqdir.

Kvadrupolli mass spektrometr yordamida mass-spektrometr bilan olingan UHV spektri. Kamerada cheklangan qoldiq bosimni hisoblash.

UHV vakuum tizimi birlashtirilgan bir nechta standart DN 100CF elementlaridan iborat. Vakuum kamerasi olinadi, u to'g'ridan-to'g'ri TMN-ga o'rnatiladi, mass-spektrometr yon tomonga o'rnatiladi, tashqi yuzasida isitish lentasi mavjud, nurlanishning issiqlik oqimini kamaytirish uchun, butun tizim folga bilan o'ralgan.

Xonadagi vakuum foreline pompasi va turbomolekulyar nasos tomonidan yaratiladi. Umumiy bosimni nazorat qilish uchun datchiklar turbomolekulyar nasos va oldingi nasos o'rtasida, shuningdek kamera-da joylashtiriladi.

Xonadagi oxirgi qoldiq bosimni aniqlash uchun tashqi qochqinlar, kameralar devorlaridan desorbtisiya - asosan suv bug'lari tufayli gaz yuklarini hisobga olish kerak. Birinchi muddat: gaz yuki turbomo-lekulyar nasosning nasos tezligiga bo'linadi. Tenglamaning qolgan shartlari - bu turli gazlarning qisman bosimi, turbomolekulyar nasos-ning tegishli siqilish nisbatlariga bo'linadi.

Umumiy bosim quyidagicha hisoblanishi mumkin:

$$P_{UHV} = (Q_{rn} + Q_{nat}) / S_{TMH} + P_{fH_2} / K_{H_2}$$

bu yerda Q_{gw} - bu desorbtisiya tufayli kamera va muhrlar yuzasidan gaz chiqindilarining oqimi.

Q_{nat} - oqish natijasida oqadigan gazning yuki STMN - TMN ning samarali ta'sir tezligi.

I-chi gaz uchun vakuum tizimining siqilish darajasi

P_{fi} - i-gaz uchun nasosdan oldingi vakuum nasosining bosimi.

Tenglamada qoldiq gazning tarkibini tahlil qilishdan faqat H₂ vodorodini hisobga olish kifoya, chunki qolgan gazlar uchun ta'sir katta-lik tartibidan kam bo'ladi. Desorbtisiya va qochqinlar vakuum kamerasining xususiyatlari. Bosimni oshirish usuli yordamida butun

tizimning qochqinlarni tekshirgandan so'ng, umumiy qochqin $5 \cdot 10^{-8} \text{ Pa m}^3 / \text{s}$ ni tashkil etdi.

Ichki sirtlardan gazni tozalash (desorbtsiya) darajasini baholash uchun turli xil omillarni hisobga olish kerak:

Kamerada olib boriladigan jarayonlar. Palata materiallari, muhrlar. Yuzaki ishlov berish - desorbtsiya sirtini ishlov berish darajasiga bog'liq.

Yuqori vakuum yaratish uchun qurilmani ko'rib chiqing - yuqori vakuumli turbomolekulyar nasos, bunda:

atmosfera bosimida vodorodning qisman bosimi $5 \cdot 10^{-1} \text{ Pa}$;

dastlabki nasos $k_{fn} = 10^4$ uchun vodorodning siqilish darajasi.

turbomolekulyar vakuum nasosi uchun vodorodning siqilish darajasi $k_{vn} = 10^5$

Vodorodning qisman bosimi bo'yicha chegara qoldiq bosimini quyidagicha aniqlash mumkin: $P_{UHV_i} = P_{atmi} / (K_{FN} \cdot K_{TMN})$, bu erda P_{UHV_i} - i-gaz uchun qisman bosim, P_{atmi} - atmosfera bosimidagi qisman bosim i-chi gaz, K_{FN} - siqishni oldidan nasosning siqilish nisbati, gaz yuklamasdan, K_{TMN} - gaz yuklamasdan T_{MN} ning siqilish nisbati.

$$P_{UHV\ H2} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} / (5 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 10^5) = 2 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}$$

Vodorodning qisman bosimining umumiy bosimga qo'shgan hissasi ahamiyatsiz degan xulosaga kelishimiz mumkin. Biz faqat yuqori vakuumli nasosning ishlash tezligi hissasini hisobga olamiz. Cheklovchi qoldiq bosim tenglamasining barcha boshqa tarkibiy qismlari chiqarib tashlangan.

Keling, hisoblash natijalari va haqiqiy tajribani taqqoslaylik. Vakuum tizimi.

UHV ultra yuqori vakuum hosil qilish uchun ko'p bosqichli nasoslar va bir nechta nasoslarning kombinatsiyalari mos keladi. Siqilish darajasi yuqori bo'lganligi sababli, tez-tez ishlatiladigan nasos nasoslari moy bilan to'ldirilgan aylanuvchi qanotli nasosdir, chunki bu nasoslarda bug'larning neft oqimiga bo'lgan ehtiyojining teskari oqimining salbiy ta'sirini oldini olish mumkin bo'lmaydi - biz yog'siz ishlatamiz vakuum nasosi: SCROLLVAC SC15plus quruq aylantiruvchi nasos bilan birgalikda gibrid podshipnikda (o'z-o'zini moylaydigan qo'llab-quvvatlovchi himoya rulmani) TMN. Qoldiq gazni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, yog'siz nasoslarning kombinatsiyasi yog'tizimidan pastroq bo'lgan cheklangan vodorod qisman bosimga erishadi.

10.1. Yuqori vakuum olishda eksperimental o'rnatish tavsifi.

Asosiy komponent - bu bitta DN 100 CF gardish va to'rtta DN 40 CF gardish bilan zanglamaydigan po'latdan yasalgan muhrlangan vakuum kamerasi, kameraga mass-spektrometr va umumiy bosim sensori o'rnatilgan. Bu sizga issiq katodli datchik bilan o'lchangan umumiy bosimni kvadropolli mass-spektrometr bilan o'lchangan qisman bosim bilan solishtirishga imkon beradi.

Amaldagi komponentlar ro'yxati:

Turbomolekulyar nasos TMN tezligi 350 l / s Turbovac 350i DN 100CF. Zaxira nasosi: SCROLLVAC SC15plus o'tish pompasi. Ultra yuqori bosim sensori: issiq katodli vakuum o'lchagich (Bayard-Alpert) ITR90. Forevakuum o'lchagich: Pirani / piezo kombinatsiyasi probasi TTR101.

Qoldiq gaz analizatori: LEYSPEC 200S kvadropolli massa spektrometri. CF muhrlari bo'lgan vakuum kamerasi. Tizimning umumiy hajmi 10L.

Nasos jarayonining tavsifi. Jihoz standart zanglamaydigan po'latdan yasalgan kamerani o'z ichiga oladi, muhr turi - CF. DN 100CF gardishida turbomolekulyar nasos, UHV vakuum o'lchagichi va qoldiq gaz analizatori vakuum kamerasiga o'rnatiladi. Isitish haroratni boshqaruvchi isitish tasmasi yordamida amalga oshiriladi. Isitish tasmasi alyumin folga bilan qoplangan.

Isitish vaqti: $t = 48$ soat

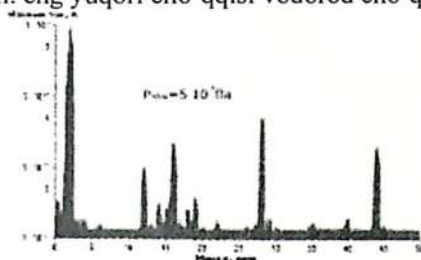
Isitish harorati: $T = 120$ S

Vakuum o'lchagichlari butun isitish va sovutish jarayonida ishlaydi. Qoldiq gaz analizatori gorizontall ravishda o'rnatiladi va uni isitish vaqtida ham ishlatish mumkin.

10.2. Yuqori vakuum olishda natijalarni muhokama qilish.

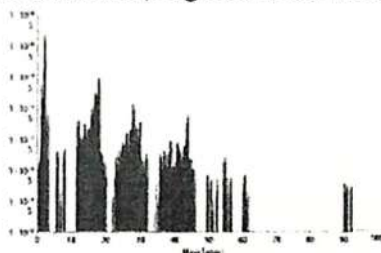
Kamera qizdirilishidan oldin qoldiq gaz tahlil qilinadi. Umumiy bosim $P = 5 \cdot 10^{-6}$ Pa bo'lsa, diagrammada 16, 17 va 18 amu suv molekullari aniq ko'rsatilgan. Suvdan tashqari, tahlilda yana bir qancha havo tarkibiy qismlari, masalan, azot N_2 (28 amu) va kislorod O_2 (32 amu) ko'rsatilgan. Spekrda ba'zi bir karbonat angidrid CO_2 (44 amu), shuningdek 50 dan 100 amu gacha bo'lgan massada uglevodorodlar yo'qligi ko'rsatilgan. Juda past ionli oqimlar ahamiyatsiz ifloslanish

deb hisoblanadi, ular isitish vaqtida yo'q bo'lib ketishi kerak. Tushunish uchun: eng yuqori cho'qqisi vodorod cho'qqisidir.



42-rasm. Asosiy cho'qqilarning ion oqimlari

48 soat davomida isinib, yana 72 soat sovutgandan so'ng, minimal umumiy bosimga erishildi. Old vakuum bosimi 1 Pa ga yetdi va ultra yuqori vakuumning umumiy bosimi $9 \cdot 10^{-9}$ Pa edi. Isitishdan keyin qoldiq gazning tahlili o'tkazildi. 42-rasmda asosiy cho'qqilarning ion oqimlari keltirilgan. Shubhasiz, eng katta hissa vodorod cho'qqisidir.



43-rasm. Isitishdan oldingi va keyingi holatlarni taqqoslab asosiy cho'qqilarning ion oqimlari

Isitishdan oldingi va keyingi holatlarni taqqoslab, quyidagi kuzatuvlarni o'tkazish mumkin:

Umumiy bosim va shuning uchun ion oqimlarining yig'indisi sezilarli darajada kamaydi

Spektrdagi havo, suv va boshqa turdagi ifloslanish cho'qqilari vodorod uchun eng yuqori darajadan 2 darajaga kam.

Vodorod cho'qqisi deyarli 2 daraja qisqartirildi. 1-jadvalda vakuum hosil qilishdagi nazariy hisobi keltirilgan.

1-jadval.

Mass, am	2	12	14	16	17	18	28	44
Ion oqimini qizdirishdan oldin, A	$0 \cdot 10^{-9}$	$0 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$0 \cdot 10^{-11}$	$0 \cdot 10^{-11}$
Ion tokini isitgandan so'ng, A	$0 \cdot 10^{-11}$	$0 \cdot 10^{-13}$	$0 \cdot 10^{-13}$	$0 \cdot 10^{-13}$	$0 \cdot 10^{-13}$	$0 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$0 \cdot 10^{-13}$

Olingan umumiy bosim isitilmaydigan kamerada 10^{-6} Pa, qizdirilganida esa 10^{-9} Pa. Nazariy yondashuvni haqiqiy o'lchov ma'lumotlari bilan taqqoslashda shuni ta'kidlash kerakki, kamera devorlaridan qochqinlarni va desorbsiyani yo'q qilish hisoblash natijalarining kuchli buzilishiga olib keladi. Vodorodning hisoblangan qisman bosimi $2 \cdot 10^{-12}$ Pa ni tashkil etadi, bu 10^{-9} Pa o'lchov qiymatidan uch daraja pastdir. Spektrda havo qochqinlari yo'q, masalan, 32 amu-da eng yuqori daraja yo'q. (kislorod). Bunga asoslanib, kameralar devorlaridan gaz evolyutsiyasi minimal bosimga ta'sir qiluvchi asosiy omil hisoblanadi.

Bundan tashqari, to'liq quruq vakuum tizimi etarli bosim va siqilish nisbati haqida xavotirga qaramay ultra yuqori vakuum bosimiga erishishga imkon beradi.

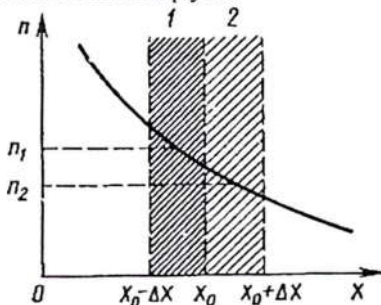
Takrorlash uchun savollar

1. Vakuum deganda nimani tushunasiz?
2. Vakuumning yarimo'tkazgichlarda foydalanish istiqbollari.
3. Vakuum nasoslarining qanaqa turlarini bilasiz?
4. Normal sharoitga nisbatan vacuum sharoitda olingan yarimo'tkazgic namunalarining farqi nimada?

11-§. YARIMO‘TKAZGICHLARDA DIFFUZIYA JARAYONLARI VA USULLARI

Qanday qilib muvozanatsiz tashuvchilar yaratilishidan qat'i nazar - yarimo'tkazgich bilan aloqa qiladigan metaldan ortiqcha tashuvchilarni kiritish, ularni nur bilan nurlantirish yoki tez zarrachalar bilan bombardimon qilish orqali - har doim yarimo'tkazgichda bu tashuvchilarning notekis taqsimlanishi hosil bo'ladi. Yarimo'tkazgich yuzasida muvozanatsiz tashuvchilar yaratilganda, ularning konsentratsiyasi yarimo'tkazgich chuqurligidan ancha yuqori bo'lishi tushunarli. Konsentratsiyadagi farq muvozanatsiz tashuvchilarning yuqori konsentratsiyali hududdan past konsentratsiyali mintaqaga tarqalishiga olib keladi.

Diffuziya oqimi. Elektr zaryadlarining muvozanatsiz tashuvchilarining diffuzion oqimi elektr toki bo'lib, uni diffuziya deyiladi. Diffuzion tok elektron yoki teshik bo'lishi mumkin. Keling, muvozanatsiz elektronlarning tarqalishini tartibga soluvchi ba'zi xarakterli xususiyatlar va qonunlarni ko'rib chiqaylik.



44-rasm. Yarimo'tkazgichdagi elektronlar konsentratsiyasi tashqi chegaradan

Aloqa qatlamlaridagi elektron konsentratsiyasi o'rtasidagi farq qanchalik katta bo'lsa, diffuziya oqimi shunchalik katta bo'ladi. n_1 va n_2 o'rtasidagi farq qatlamlar orasidagi interfeysga perpendikulyar yo'nalishda birlik uzunligi bo'yicha elektron konsentratsiyasining o'zgarishi qiymati bilan belgilanadi. Elektron diffuziya koeffitsienti qayerda?

Yarimo'tkazgichli akseptor holatida, teshiklar harakati natijasida hosil bo'ladigan oqim zichligi shunga o'xshash formula bilan ifodalanadi:

bu yerda D_p - teshikning tarqalish koeffitsienti.

Eynshteyn nisbati. D diffuziya koeffitsienti moddaning tabiati va tuzilishiga bog'liq. Bu harakatchanlik va tashuvchilarga va kristalning mutlaq T harorati bilan mutanosib:

11.1. Eynshteynning diffuyaga nazariyasi

Elektronlarning harakatchanligi teshiklarning harakatchanligidan katta bo'lgani uchun, elektronlar uchun diffuziya koeffitsienti har doim teshiklarga qaraganda yuqori bo'ladi. Masalan, germaniyada xona haroratida elektronning tarqalish koeffitsienti teshikning tarqalish koeffitsientidan ikki barobar, kremniyda esa uch barobar.

Teshiklar elektronlarni ta'qib qiladi. Shunisi qiziqki, bir hil yarimo'tkazgichda har qanday belgining tashuvchilarining tarqalishi deyarli elektrontrallik holatining buzilishiga olib kelmaydi: bunday yarimo'tkazgichning istalgan nuqtasida ortiqcha tashuvchilar konsentratsiyasini o'lchashda har doim " n " = Pp. Bu bir xil belgining tashuvchilarining tarqalishi bir vaqtning o'zida qarama -qarshi belgining tashuvchilarining parallel ravishda o'tishi bilan izohlanadi. Keling, buni aniq bir misol bilan tushuntiraylik.

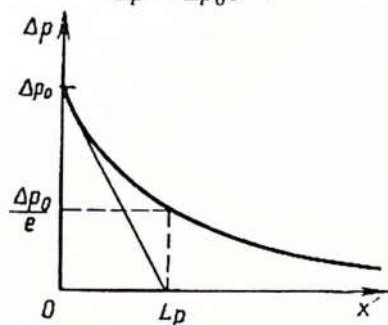
Ayrim elektronlar diffuziya natijasida yarimo'tkazgichning bir qismini qoldirsin. Birinchi lahzada bunday ketish elektron neytrallik shartini tabiiy ravishda buzadi: dp p dan katta bo'ladi va ko'rib chiqilayotgan mintaqada $e(p - p)$ ga teng fazoviy zaryad paydo bo'ladi. Kosmik zaryadning paydo bo'lishi chap elektronlarning harakatiga yo'naltirilgan elektr maydonining paydo bo'lishi bilan birga keladi. Bu maydonning kuchi juda yuqori bo'lishi mumkin: oddiy yarimo'tkazgichlarda u 105 V/sm va undan yuqori qiymatlarga etadi. Bunday kuchli maydon teshiklarning kuchli oqimini keltirib chiqaradi, ular ko'rib chiqilayotgan hajmni qoldirib, buzilgan muvozanatni tiklaydi va shu bilan paydo bo'lgan kosmik zaryadning yo'qolishiga yordam beradi. Bundan tashqari, chap elektronlarni egallab oladigan teshiklar yangi hududlarda elektron neytrallikning buzilishiga olib kelmaydi. Elektroneytrallik to'satdan buzilgan taqdirda, uning tiklanishi, albatta, bir zumda emas, balki ma'lum vaqt o'tgach, dielektrik bo'shashish

vaqti deb ataladi. Biroq, bu vaqt juda qisqa (normal sharoitda - taxminan 10-12 s), xuddi shu belgining tashuvchilarining diffuziya oqimi qarama -qarshi belgining tashuvchilarining parallel uzatilishi bilan birga keladi, buning natijasida elektron neytrallik sharti. har doim bir hil yarimo'tkazgichning har qanday hajmida saqlanadi.

11.2. Diffuziya va rekombinatsiya.

Muvozanatsiz tashuvchilarning tarqalishi va rekombinatsiyasi jarayonlari bir -biri bilan chambarchas bog'liq. Buni elektron yarimo'tkazgichda muvozanatsiz teshiklarning tarqalishi misolida ko'rsatamiz. Faraz qilaylik, n-tipli yarimo'tkazgich yuzalaridan birida bu manba ($x = 0$ da) muvozanatsiz teshiklarning Δp_0 ortiqcha konsentratsiyasini hosil qiladigan teshik manbai mavjud. Yarimo'tkazgich ichidagi teshiklarning konsentratsiyasi sirtidagidan kam bo'lgani uchun, teshiklarning yarimo'tkazgichning ichki qismiga tarqalishi sodir bo'ladi, ya'ni diffuzion oqim paydo bo'ladi. Agar tashuvchilarning rekombinatsiyasi yarimo'tkazgich ichida sodir bo'lmaganida, ular teshiklar orqali namunaning qarama -qarshi yuzasiga etib borar va yarimo'tkazgich bo'ylab ortiqcha tashuvchilarning doimiy konsentratsiyasi Δp_0 o'rnatiladi. Ammo, aslida, bunday rasm kuzatilmaydi, chunki muvozanatsiz teshiklar sirtidan tarqalib, yarimo'tkazgichning ichki qismidan sirt qatlamiga o'tadigan elektronlar bilan birlashadi va ularning konsentratsiyasi sirtidan namunaning ichki qismiga kamayadi.

$$\Delta p = \Delta p_0 e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (11.1)$$



45-rasm. Diffuziya uzunligi nazariy xisoblash.

L parametri (L_p teshiklari uchun) tashuvchilarning diffuziya uzunligi deyiladi. L_p miqdori ortiqcha teshiklarning kontsentratsiyasi e ga kamayadigan uzunlikka teng.

Diffuziya va rekombinatsiya jarayonlari o'rtasidagi bog'liqlik munosabatlar orqali o'rnatiladi. Bu erda τ (teshiklar uchun, p) - muvozanatsiz tashuvchilarning o'rtacha ishlash muddati (esda tutingki, muvozanatsiz tashuvchilarning o'rtacha umri ularning paydo bo'lishi va rekombinatsiya momenti o'rtasidagi o'rtacha vaqt oralig'ini aks ettiradi). D diffuziya uzunligi - bu o'rtacha umr davomida diffuziya paytida muvozanatsiz tashuvchilar bosib o'tgan o'rtacha masofa, ya'ni tug'ilgan joydan rekombinatsiya joyigacha bo'lgan o'rtacha yo'l.

Yarimo'tkazgichdagi elektronlar kontsentratsiyasi tashqi chegara-dan (bu 34 -rasmda $x = 0$ koordinatasiga to'g'ri keladi) masofada, bu rasmda ko'rsatilgan egri chizig'iga muvofiq, kamaysin. Keling, yarimo'tkazgichni $x = x_0$ nuqtada X o'qiga perpendikulyar tekislik bilan ajratib olamiz va hajmdan ikkita qalinlikdagi Δx qatlamni tanlay-miz. Birinchi qatlamda bo'lgan barcha elektronlar tasodifiy issiqlik harakati natijasida bir muncha vaqt o'tgach uni tark etadi. Elektron-larning o'ngga va chapga harakatlanish ehtimoli bir xil bo'lgani uchun 1 -qavatdagi elektronlarning yarmi $x = x_0$ tekislikdan o'tadi deb taxmin qilishimiz mumkin. Shu bilan bir xil qalinlikdagi Δx bo'lgan 2 -qavatdagi elektronlarning yarmi bu tekislikni teskari yo'nalishda kesib o'tadi. Birinchi qatlamdagi n_1 elektron kontsentratsiyasi 2 -qavatdagi o'rtacha elektron kontsentratsiyasi n_2 dan katta bo'lgani uchun, qatlamlar orasidagi chegarani chapdan o'ngga kesib o'tgan elektronlar soni qarama -qarshi elektronlar sonidan ko'p bo'ladi. Bu oqimlar orasidagi farq aynan diffuziya oqimining natijasidir, uning mavjudligi diffuziya oqimining ko'rinishini belgilaydi.

Hozirgi zamon QE texnologiyasida diffuziya yordamida tuzilmalar tayorlash asosiy yunalishlardan hisoblanadi. Hozirgi vaqtda butun dunyoda tayyorlanayotgan kremniy asosidagi QE larining asosiy qismi diffuzion texnologiya vositasida olinadi. Qisqacha diffuziya jarayonini ko'rib utamiz. Diffuziya jarayonida modda oqimining zichligi F ning birinchi qonuniga asosan quyidagicha ko'rsatiladi.

$$I_a = D \text{ grad } C \quad (11.2), \quad \text{grad } C = dC/dx \quad (11.3)$$

YA'ni bu jumla X o'ki yo'nalishida konsentratsiya o'zgarishini ko'rsatadi. Bu erda, D - diffuziya koeffitsienti, sm^2/sek o'lchanadi va bu koeffitsient berilgan konsentratsiya gradienti qiymatida moddalar

oqimining qiymatini ko'rsatadi. Fikning ikkinchi qonuniga asosan konsentratsiyaning vaqtga nisbatan o'zgarishi

$$DC/dt = D d^2C/dx^2 \quad (11.4)$$

ga teng bo'ladi.

Umuman yarim o'tkazgichli asbobsozlik texnologiyasida keng imkoniyatligi, samaradorligi va ko'p qavatli qatlamlar olish imkoniyati osonligi, kirishmalar konsentratsiyasini o'zgartirish imkoniyati mavjudligi bilan boshqa usullardan farq qiluvchi usul - bu diffuziya usulidir. Kirishmalarni diffuziya hududiga etkazish imkoniyatini hisobga olgan holda bu usulni quyidagi yunalishlarga bo'lish mumkin.

a) Gaz yoki bug' holatidan foydalanib diffuziya qilish.

b) Iqtidorligi chegaralangan manbadan diffuziya qilish (M: elektrolitik yoki vakuumda uchirish yo'li bilan olingan yupqa qatlamlardan diffuziya qilish).

v) YArim o'tkazgichli material ustiga ma'lum usullar bilan o'tqazilgan (surtilgan yoki sentrifuga yordamida o'tqazilgan yupqa qatlamlarga kerakli kirishma uning tarkibida bo'lgan) yupqa oksid qatlamlardan diffuziya qilish.

g) Asosiy materiali inert va unga aktiv kirishma kiritilgan qattiq jismlardan diffuziya qilish usuli.

Kremniyda diffuziya jarayoni Fik qonuniga to'liq bo'ysinadi va unga asosan kirishmalar konsentratsiyasi taqsimoti chegaralanmagan quvvatli kirishma manbai holi uchun quyidagi tenglama bilan aniqlanadi.

$$N(x,t) = N_0[1 - \exp(x/2(Dt)^{1/2})] \quad (11.5)$$

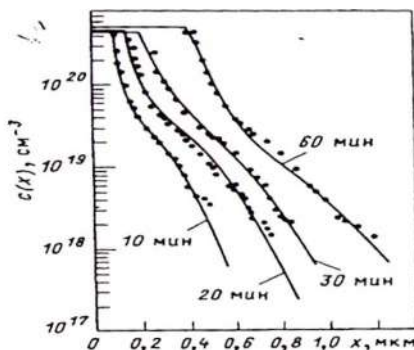
bu erda N – konsentratsiya, D – diffuziya koeffitsienti, t – vaqt, N_0 – kirishmalar atomlarining yuzadagi konsentratsiyasi.

Eksperimental tadqiqotlardan aniqlanishicha, kirishmalar taqsimoti ancha murakkab bo'lib, bunga asosiy sabab diffuziya koeffitsienti D ning yarim o'tkazgichli materialdagi vakansiyalar konsentratsiyasiga bog'liqligidir.

Diffuziya jarayoni o'tkazishga misollar, jarayonni o'tkazish tartibi. Diffuziya jarayonini o'tkazish ma'lum tartibda olib boriladi. Bular jumlasiga: yarim o'tkazgichli materialni tayyorlash (mexanik va ximik ishlov berish), kirishmalar manbaini tayyorlash (Kirishmalar kiritish yo'nalishini tanlash), jarayon o'tkazish rejimini tanlash, hisoblash va hokazolar, diffuziya o'tkazish, kirishmalar konsentarsiyasini va chu-

qurligini aniqlash, kirishmalar taqsimotini o'rganish, jarayon o'tkazish rejimiga tuzatishlar kiritish, qayta diffuziya o'tkazish va hokazolar.

Ayrim hollarda (shu jumladan QE larini tayyorlashda ham) diffuzion qatlamlar elektr tokiga qarshiligini kamaytirish uchun qatlamlar maksimal qiymatgacha kirishmalar kiritiladi (berilgan harorat uchun chegaraviy eruvchanlikka qadar). Misol 44-rasmga qarang. Bu hol uchun, diffuzion jarayon davomida yarim o'tkazgichli material sirtida konsentratsion plato hosil bo'ladi va undagi kirishmalar konsentratsiyasi chegaraviy eruvchanlik qiymatiga teng bo'ladi. Materialni diffuzion jarayondan keyingi sovutish davomida yuqori konsentratsiyali kirishmalar kremniyda har xil kristallik nuqsonlar hosil qiladi va natijada yarim o'tkazgichning elektrofizik xususiyati keskin yomonlashadi (Misol, jumladan L , t , μ va hokazolar). Natijada yarim o'tkazgich yuzasida xususiyatlari tamoman yaroqsiz bo'lgan «o'lik qatlam» hosil bo'ladi. Bu qatlamning xususiyatlarini o'zgartirish va uning qalinligini kamaytirish uchun quyidagi amallarni bajarish kerakdir;



44-rasm. Diffuziya jarayoni o'tkazishning har xil vaqtlari uchun fosforning kremniydagi diffuzion profili. (diffuziya o'tkazish harorati 950°S , diffuziya manbai ROSi_3 , kremniy tagligida kirishmalar konsentratsiyasi $2 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$); $s(x)$ — yuzadan x masofadagi fosfor atomlarining konsentratsiyasi.

- kirishmalarning yuzadagi konsentratsiyasini chegaralash,
- diffuziya jarayonini chegaralangan quvvatli manbadan olib borish,

- kirishmalarni ikki stadiyali usul bilan kiritish,
- yuzadagi konsentratsion platon kimyoviy emirish usuli bilan olib tashlash.

Ikki stadiyali diffuziya qilish usuli. Ikki stadiyali diffuziya usuli bilan kirishmalar kiritish jarayoning afzalligi (bu jarayon kirishmalarni ikki etapda kiritadi, «kiritish» va «tarqatish» etaplari) shundan iboratki, «kiritish» etapida materialga faqat berilgan miqdordagigina kirishma uning yuza qatlamlariga kiritiladi. «Tarqatish» stadiyasida esa kirishmalar material ichiga diffuziya qilinadi. Natijada kirishmalar namuna yuzasidagi konsentratsiyasi nisbatan kamayadi. Bu esa yuzadagi rekombinatsion sur'atni kamayishiga olib keladi. «Kiritish» etapi-ning harorati «tarqatish» etapi qaranganda pastroq haroratda olib boriladi.

11.3. Diffuzion qatlamlar xususiyatlarini o'rganish.

Hosil qilingan diffuzion qatlamlarni yarim o'tkazgichli tuzilmalarda tatbiq qilish uchun ularning xususiyatlarini tahlil qilish asosiy shartlardir. Bu xususiyatlar jumlasiga diffuzion qatlamning qalinligi, kirishmalar konsentratsiyasi, kirishmalar qatlamdagi taqsimoti, qatlamning elektr tokiga qarshiligi, undagi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti va harakatchanligi, va hokazolar. Diffuzion qatlamlar qalinligini o'lchash usullari jumlasiga qatlamni buzmasdan (ne razruhayuhie metodo') va qatlamni emirib (razruhayuhie) o'lchash usullari kiradi. Qatlamni emirishga asoslangan usullar qatoriga shar-shlif va qiya-shlif usullari kiradi.

SHar-shlif usuli diffuziya jarayonidan keyin material sirtida mexanik usul bilan shar shaklidagi zoldir yordamida chuqurcha hosil qilib, so'ngra uni rang beruvchi ximik aralashmalarda emirib n-p o'tish chegarasini aniqlashdan iborat. Aniqlangan chegara optik mikroskopda qalinligi (chuqurligi) o'lchanadi va uning qiymati diffuzion qatlam qalinligiga teng deb olinadi.

Qiya-shlif usuli avvalgi usulni bir ko'rinishi bo'lib n-p o'tish chegarasigacha qiya tekislik hosil qilinadi. Bu usullarning aniqqligi

zoldirning diametriga va qiya tekislikning qiyaligiga bog'liqdir. +atlamni buzmasdan qalinlikni o'lchash usullariga volt-sig'im xarakteristikani o'lchash yo'li bilan qalinlikni aniqlash va har xil elektron zond usullari kiradi.

Kirishmalar konsentratsiyasini o'lchash usullari. Kirishmalar konsentratsiyasini o'lchash usullari ko'p bo'lib bulardan klassik sifatida foydalanidigan usullardan bu Xoll usuli, Van der Pau usuli va volt-sig'im usulidir. Bu usullar yarim o'tkazgichli materialdan elektr toki va magnit maydonining zaryadga bo'layotgan ta'sir natijasida hosil bo'lgan elektr toki o'tkazuvchanligiga asoslangandir.

11.4. Diffuzion texnologiya asosida quyosh elementlarini tayyorlash imkoniyatlari.

Hozirgi zamon kremniy asosidagi quyosh elementlarining deyarli aksariyatida QE ning asosiy qismi bo'lgan n-p o'tish olish kirishmalarni diffuziya qilishga asoslangan. Diffuzion n-p o'tish olish uchun kremniyga ionlanish energiyasi kichkina bo'lgan kirishmalar kiritiladi. Jumladan n-tip Si olish uchun B va p-tipdagi Si olish uchun P kiritiladi. Xozirgi zamon kremniy asosidagi QE tayyorlashda asosiy material qilib kristalli kremniyning n-tipdagisi olingan. Bunga asosiy sabablardan biri bo'lib bunday kremniyda asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning elektronlar bo'lganligigi va ularning diffuzion yo'li uzunligning nisbatan kattaligidir. L_d QE sifatida ishlatiladigan materiallarda 100 mkm dan ortiq bo'lib, o'z navbatida bunday qalinlikdagi (100 mkm dan qalinroq bo'lgan) kremniyga mexanik va ximik ishlov berishni osonlashtiradi. Diffuziya qilish usuli bilan n-p o'tish olishdan avval diffuzion jarayon o'tkazish va diffuzion qatlam parametrlari oldindan nazariy yo'l bilan hisoblanadi. Avvaliga n-p o'tish qalinligi, diffuzion qatlamdagi kirishmaning konsentratsiyasi, sirt rekombinatsion koeffitsienti hisoblanadi. So'ngra diffuziya qilish jarayoni aniqlanadi.

$$\Delta p = \Delta p_0 e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (11.6)$$

n-tipdagi kremniy asosida QE olish uchun fosfor kirishmalari kiritiladi. Er sharoitida ishlaydigan effektivligi 16-18 % bo'lgan quyosh elementlari olish uchun fosfor kiritilgan qatlamning qalinligi 0,3-0,5 mkm bo'lishi kifoya, kirishmalar konsentratsiyasi esa (1-6) 10^{19} sm^{-3} , solishtirma qarshiligi $\rho \sim 10^{-2} - 10^{-3}$ om sm, $L_r \sim 0,4-0,6$ mkm bo'lishi manzurdir. Sirt rekombinatsion sur'ati miqdori 10^2-10^3 sm/s ek dan oshmasligi kerak.

$$\Delta p = \Delta p_0 e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (11.7)$$

Fosfor diffuziyasi jarayonidan avval orqa tomonga alyuminiy kiritilgan (1-1,5 mkm chuqurlikda) n^+ -tipdagi, ya'ni nn^+ -o'tish hosil qilish maqsadga muvofiqdir. Keyin fosfor diffuziyasi ta'sir qilmasligi uchun orqa tomon ma'lum qalinlikdagi kremniy oksidi bilan berkitiladi.

Fosfor bilan legirlangan diffuzion qatlam olish harorati odatda pastroq bo'lib 900-950 °S ni tashkil qiladi. Fosfor kiritish quvvati chegaralangan manbadan olib boriladi. Jarayonni qattiq jismlar manbalardan "«yumshoq»" rejimni qo'llab olib borish kerak. «Ulik qatlam» hosil bo'lish oldini olish uchun ikki stadiyalı diffuziya qilish usulini qo'llash maqsadga muvofiqdir.

n-p o'tishning boshqa usullari ham mavjud bo'lib bular jumlasiga ionli legirlash usuli, epitaksiya qilish vositasi kiradi. O'z navbatida epitaksiya qilish vositasining turli yo'llari mavjud, jumladan, gaz fazali epitaksiya usuli, suyuq fazali epitaksiya usuli, molekulyar nurli epitaksiya usuli.

Takrorlash uchun savollar

1. Kirishmalarni yarim o'tkazgichga termik diffuziyalash jarayonlari nazariyasining asoslari deganda nimani tushunasiz?

2. Diffuziyaning texnologik maromlari parametrlarini hisoblash metodikasi o'zlashtirishda nimalarga axamiyat berish lozim?

3. Texnologik qurilmalar va kremniyga kirishmalarni diffuziyalashning texnologik jarayoni to'liq o'zlashtirishda nimalarga e'tibor berish lozim?

4. Kirishmalar taqsimotini aniqlash metodikasi nimalarni o'z ichiga oladi?

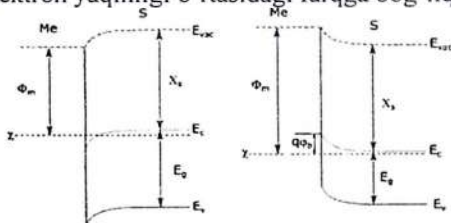
III-BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA OPTIK XODISALAR

12-§. YARIMO'TKAZGICHLARDA OMIK KONTAKT HOSIL QILISH.

Omik kontakt-bu metall va yarimo'tkazgich yoki ikkita o'xshash bo'lmagan yarimo'tkazgichlar orasidagi aloqa, chiziqli va nosimmetrik tok kuchlanish xarakteristikasi (VAX) bilan tavsiflanadi.

12.1. Omik kontakt tushunchasi.

Agar I - V xarakteristikasi assimetrik va chiziqli bo'lmagan bo'lsa, u holda kontakt ma'lum darajada to'g'rilanadi (masalan, bu Schottky to'sig'i bilan aloqa bo'lib, uning asosida Shottki diodi yaratiladi). Shottki to'siq modelida tuzatish metallning ish funksiyasi va yarimo'tkazgichning elektron yaqinligi o'rtasidagi farqqa bog'liq.⁶



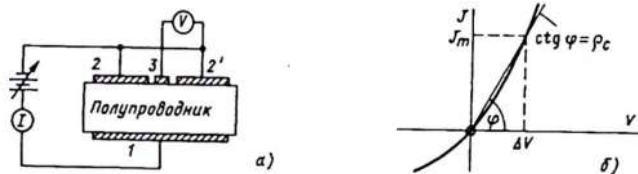
45-rasm. Sirt zichligi bo'lmagan holatlarda metall va n tipidagi yarimo'tkazgich o'rtasidagi kontaktning energiya diagrammasi (chapda) va to'siq mavjud bo'lganda (o'ngda) Shottki aloqasi.

45-rasmda biroq, amalda, ko'p hollarda, metall o'tkazgichlar kontaktlari Shottki modeliga to'liq mos kelmaydi, chunki metall o'tkazgich interfeysida tashqi sirt holatining mavjudligi (masalan, plyonkalar va oksid zarralari va kristall tuzilish nuqsonlari) kontaktning xatti -harakatlari, metallning ish funksiyasi va yarimo'tkazgichning elektronga yaqinligi o'rtasidagi farqdan deyarli farq qilmaydi.

⁶ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том 3. Квантовая механика (нерелятивистская теория). — 4-е изд., испр. М.: Наука. 1989. — стр. 223

Yarimoʻtkazgichli qurilmalar va integral mikrosxemalar ishlab chiqarishda ohmik kontakt hosil qilish uchun yarimoʻtkazgichning kontakt zonasi qoʻshimcha ravishda koʻp miqdorda doplanadi (masalan, n-tipli kremniy plastmassali donorli nopokli dopingni koʻpaytirish alyuminiy sifatida ishlatilganda). kontaktdagi metall, juda koʻp qoʻshilgan kremniy qatlami n + bilan belgilanadi. Bunday holda, Shottki toʻsi-gʻining kosmik zaryad mintaqasining qalinligi shunchalik kichrayib ketadiki, u orqali zaryad tashuvchilarni tunnel qilish (dala emissiyasi) mumkin boʻladi. Strukturaning bunday qattiq dopinglangan hududlari odatda p + yarimoʻtkazgich uchun p + va elektron oʻtkazgichli yarimoʻtkazgich uchun n + bilan belgilanadi⁷.

Agar kontaktning volt-ampere xarakteristikasi noldan boshlab kuchlanishning katta qiymatlariga teng kT largacha ($V \gg kT$) chiziqli xususiyatga ega boʻlib, tok kuchini qarama-qarshi tomonga oʻzgartirilganda chiziqli qonuniyat saqlansa, metall va YAO orasidagi kontakt omik deb hisoblanadi. Ammo, kontaktdagi kuchlanish pasayishi yarim oʻtkazgichli material hajmidagi kuchlanishlar pasayishidan kam boʻl-sayu, tok-kuchlanish (I-V) xarakteristika shu oralikda chiziqli boʻlmasa ham, kontakt kvazi omik hisobiga kiradi va uning xususiyatlari qoniqarli boʻladi (46-rasm).



46-rasm. Kontaktlar qarshiligini oʻlchashning uch zondli usuli (a), oʻlchangan volt-ampere xarakteristika (b)

Omik kontaktda qoʻyiladigan talablar. Omik kontakt quyidagi xususiyatlarga ega boʻlishi shart:

- a) katta elektr oʻtkazuvchanlikka,
- b) yuqori issiqlik oʻtkazuvchanlikka,
- v) mexanik mustahkamlikka.

⁷ Физические методы диагностики в микро- и нанoeлектронике / под ред. А. Е. Беляева, Р. В. Конаковой. Харьков: ИСМА. 2011. — 284 с.

Kontaktning solishtirma qarshiligi siljitish kuchlanishi (napryajenie smeheniya) nolga teng bo'lgan hol uchun quyidagi tenglamani qanoatlantirishi kerak,

$$\rho_{ko} = (dV/dI)_{V=0} \quad (12.1)$$

Odatda solishtirma qarshilikning keskin kamayishi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini oshirish orqali kuzatiladi va haroratning kamayishi jarayonida ρ ning oshishi kuzatiladi⁸.

Bir metall yordamida olingan kontaktlarda yuqoridagi talablarni bajarish qiyin. SHuning uchun ikki yoki undan ortiq metallar kombinatsiyasi orqali talablar bajarilishi mumkin. Bunday kontaktlarda birinchi metall yarim o'tkazgichli materialda malum tip zaryad tashuvchilar mavjud kirishma rolini bajarishi kerak (aktiv kontakt) yoki yarim o'tkazgich bilan nisbatan kamroq elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan holda u bilan ximik bog'lanish hosil qilishi kerak (passiv kontakt).

Bundan tashqari birinchi qatlam materiali mexanik mustahkamlik uchun mas'uldir. Kontaktning ikkinchi qatlami yuqori haroratli texnologik jarayonga dosh berishi, tashqi muhit ta'siriga uzoq muddatda chidamli va yaxshi elektr va issiqlik o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi shart. Uchinchi qatlam (yoki eng ustki qatlam) qalaylash imkonini berishi, fotoelektrik batareyani elementlar asosida yig'ishni osonlashtirishi va QE ketma-ketlik qarshiligi kamaytirish imkonini (kontakt kesimini oshirish imkoniyatini) berishi kerak.

12.2. Omik kontakt olish usullari.

Hozirgi zamon yuqori samarali fotoqabullagichlar va QE ishlab chiqarishda (asosan kremniyli quyosh elementlarda) ko'p qatlamli kontaktlar ishlatiladi. R-tip kristalli kremniy asosidagi quyosh elementlarida Al, Ti, Pd, Ag (koinotda ishlatiladigan elementlarda), p-tip asosidagi uchun esa, Ti, Pd, Ag ishlatiladi. Erda ishlatiladigan quyosh elementlari uchun nisbatan arzonroq turadigan materiallar asosidagi quyidagi kontakt tizimlari ishlatiladi; r-tip uchun Al, Ti, Ni, Cu, p-tip materiali uchun, Ti, Ni, Cu. Kontaktlar sirti keyin POS-61

⁸ Родерик Э. Х. Контакты металл — полупроводник. М.: Радио и связь. 1982. 208 с.

yordamida qalaylanadi. Eng arzon va oddiy texnologiya bilan olinadigan kontaktlarda material sifatida Sn va Al dan foydalaniladi.

Omik kontaktlar olish asosan vakuumda uchirish, elektroximik o'tkazish usuli, ximik olish usuli va termik usullarni qo'llashdan iborat. YUqoridagi texnologik jarayonlaridan birini ishlatish uchun avvaliga kvaziomik yoki omik kontakt olish uchun kerak bo'lgan asosiy talablarni ko'rib o'tamiz. 1) Metall-yarim o'tkazgichli material chegarasida qarshilikni kamaytirish uchun zaryad tashuvchilarning tunnel usuli bilan oqib o'tishini ta'minlash maqsadida o'ta legirlangan chegaraviy qatlam hosil qilish; 2) Termoelektron tok oqib o'tish mexanizmini boshqarish uchun metallidagi chiqish ishi F_M va yarim o'tkazgichdagi elektronga moyillikning mushtarak qiymatlarini tanlab chegaradagi F_b bar'er kattaligini boshqarish.

3) ionli implantatsiya, mexanik ishlov yoki elektrik ishlov berish yo'li bilan yarim o'tkazgichli material yuzasida nuqsonlar hosil qilish, tunnel to'siqlar hududida energetik holatlar hosil qilish.

YUza qatlamdagi kirishmalarning o'ta yuqori konsentratsiyasini hosil qilish uchun quyidagi usullardan qo'llaniladi.

1. Qattik jisimli diffuziya manbaidan yoki bug' fazasidan yuqori haroratda diffuziya jarayonini o'tkazish.

2. Kontakt materialning o'zidan diffuziya o'tkazish, misol Zn ning Au-Zn-Au dan InP ga diffuziyasi.

3. Ionli implantatsiya jarayonidan keyingi termik ishlov usuli.

4. p^+ va n^+ -qatlamlarni epitaksial usul bilan o'stirish.

5. Kontakt materialini yarim o'tkazgich bilan birgalikda termik eritish (splavlenie) va rekristallizatsiya (qayta kristallanish) qilish.

So'nggi usul suyuq fazali epitaksiya usuliga o'xshash bo'lib, erituvchi metall tanlanganda uning yarim o'tkazuvchi materialda eritish qobiliyati hisobga olinadi. Legirlovchi kirishma erituvchi tarkibida bo'lishi mumkin, yoki maxsus vosita bilan kiritiladi. Bunday eritma sovuganda yarim o'tkazgich kristallanish jarayonini o'tadi va qayta hosil bo'lgan qatlam eritmadan o'ta legirlanadi.

12.3. Omik kontaktlarning parametrlarini ishlab chiqarish va nazorat qilish.

Omik kontaktlarni yaratish jarayoni asosiy va yaxshi o'rganilgan (hech bo'lmaganda kremniy) bo'lishiga qaramay, u baribir san'atning

bir turi bo'lib qolaveradi. Ishlab chiqarilgan kontaktlarning takrorlanishi va ishonchliligi yarimo'tkazgich yuzasining o'ta tozaligiga asoslanadi. Tabiiy oksidi SiO_2 kremniy yuzasida tez hosil bo'lganda, hosil bo'lgan kontaktlarning xususiyatlari kontakt hosil qilish jarayonining tafsilotlariga juda sezgir bo'lishi mumkin.

Kontakt ishlab chiqarishning asosiy bosqichlari - yarimo'tkazgich yuzasini tozalash, kontaktli metallizatsiyani yotqizish, tuzilish va tavlaniş. Sirtni tozalash purkash, kimyoviy ishlov berish, reaktiv gaz bilan ishlov berish yoki ion bilan ishlov berish yo'li bilan amalga oshirilishi mumkin. Masalan, tabiiy kremniy oksidini gidroflorik kislota (HF) qotish orqali olib tashlash mumkin, galyum arsenidining (GaAs) yuzasi esa brom-metanol bilan ishlov berish yo'li bilan tozalanadi. Sirtni tozalashdan so'ng, metallar purkash, bug'lanish yoki kimyoviy bug'larni cho'ktirish (CVD) orqali yotqiziladi. Puskurtme, bug'lanishdan ko'ra, metallni cho'ktirishning tezroq va qulay usulidir, ammo plazmadan ionli bombardimon yuzadagi holatga olib kelishi yoki hatto sirtidagi o'tkazuvchanlik turini o'zgartirishi mumkin. Shu sababli, yumshoq, ammo baribir nisbatan tez CVD afzallik beriladi. Kontaktlarni shakllantirish standart fotolitografik jarayon bilan, xususan, fotolitografiyani tozalash usuli bilan amalga oshiriladi, bu erda metall fotorezist qatlamining teshiklari orqali yotqiziladi, keyin yuviladi. Cho'kishdan so'ng, ko'p hollarda, kontaktlar ichki mexanik stresslarni bartaraf etish uchun, shuningdek metall va yarimo'tkazgich o'rtasida kerakli qattiq fazali reaksiyani amalga oshirish uchun tavlaniadi⁹.

Kontakt qarshiligini o'lchash ko'pincha maxsus test tuzilmalarida uzun chiziqli usul (TLM) [5], to'rt nuqtali usul [6] yoki Kelvin usuli modifikatsiyalari yordamida amalga oshiriladi, ma'lum usulni tanlash bunga bog'liq. yarimo'tkazgichli plyonkaning kontakt qarshiligi va qarshiligining nisbati va fotolitografik jarayon detallari bo'yicha.

12.4. Kontaktlarning texnologik jihatdan muhim turlari.

Titan-volfram disilitsidi yoki boshqa birikmalar kabi kremniy bilan zamonaviy ohmik aloqalar, qoida tariqasida, silikidlar kimyoviy

⁹ Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. - Физика полупроводников (1977), 672
с

bug'ning birikishi (CVD) yordamida hosil bo'ladi. Kontaktlar tez-tez o'tish metalining cho'kishi va tavlaniş paytida silikidlarning hosil bo'lishi natijasida amalga oshiriladi, buning natijasida silikid tarkibi stexiometrik bo'lmagan bo'lishi mumkin. Silisidli kontaktlar, shuningdek, birikmaning to'g'ridan -to'g'ri püsürtülmesi yoki o'tish metallining ion implantasyonu va keyin tavlama orqali ham paydo bo'lishi mumkin. Alyuminiy kremniy texnologiyasi uchun har qanday (n- va p-) turdagi yarimo'tkazgichlarda ishlatilishi mumkin bo'lgan yana bir muhim metaldir. Boshqa faol metallar singari, Al kislorodni oksid bilan bog'laydigan va shu bilan kremniyga metallning yaxshi yopishishini ta'minlaydigan interfeysni "deoksidatsiyalash" ning shakllanishiga yordam beradi. Silikidlar, asosan, alyuminiyning o'rni bosadi, chunki ular ancha refrakter birikmalar va parazitlar diffuziyaga kamroq moyil (bu strukturaviy degradatsiyaga olib keladi), ayniqsa keyingi yuqori haroratli ishlov berish davrlarida¹⁰.

Yarimo'tkazgichli birikmalar bilan aloqa qilish kremniyga qaraganda ancha qiyin. Misol uchun, GaAs sirtlari mishyak (As) ni yo'qotishga moyildir, bu esa metallarning cho'kishi bilan ancha yaxshilanadi. Bundan tashqari, As beqarorligi GaAs qurilmalarini yomonlashtiradigan keyingi tavlaniş parametrlarini cheklaydi. GaAs va boshqa yarimo'tkazgichli birikmalar uchun echimlardan biri - tor qatlamli qotishmani aloqa qatlami sifatida ishlatishdir, aksincha, kremniyda juda ko'p qo'shilgan qatlam. Masalan, GaAsning o'zi AlGaAsga qaraganda kichikroq diapazonga ega, shuning uchun uning yuzasida GaAs qatlami ohmik kontaktni yaratishni osonlashtirishi mumkin. Umuman olganda, III-V va II-VI yarimo'tkazgichlarda omik aloqa texnologiyasi kremniyga qaraganda ancha kam rivojlangan. 2-jadvalda yarimo'tkazgichlarda omik aloqa texnologiyasini nazariy xisobi keltirilgan.

¹⁰ Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник Физика и техника полупроводников 41, 1281, (2007)

Yarimoʻtkazgich	Kontakt hosil qiluvchi material
Si	Al, Al-Si, TiSi_2 , TiN, W, MoSi_2 , PtSi, CoSi_2 , WSi_2
Ge	In, AuGa, AuSb
GaAs	AuGe, PdGe, PdSi, Ti/Pt/Au
GaN	Ti/Al/Ti/Au, Pd/Au
SiC	Ni
InSb	In
ZnO	InSnO_2 , Al
$\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$	Mo, InSnO_2
HgCdTe	In

Shaffof yoki shaffof ohmik kontaktlar matritsali LCD displeylarni, lazer diodlari va quyosh batareyalari kabi optoelektron qurilmalarni ishlab chiqarish uchun kerak. Bunday aloqalar uchun eng keng tarqalgan material-kislorodli muhitda In-Sn nishonining reaktiv püskürtülmesi natijasida hosil boʻlgan indiy qalay oksidi (ITO)¹¹.

Amaldagi qiymati. Kontakt qarshiligi va yarimoʻtkazgich strukturasining parazitlar sigʻimi natijasida hosil boʻladigan RC davrining vaqt konstantasi qurilmalarning chastotali xususiyatlarini cheklab qoʻyishi mumkin. Superoʻtkazuvchilar va p-n birikmalarining parazitlar sigʻimini zaryadlash va tushirish jarayonida kontakt qarshiligi yuqori ishchi chastotali raqamli elektronkada quvvat tarqalishining asosiy sabablaridan biridir. Kontakt qarshiligi Joule issiqligining past chastotali va analog davrlarda (masalan, quyosh panellari) kamroq tarqalgan yarimoʻtkazgichlardan chiqarilishi tufayli elektr quvvati tarqalishiga olib keladi. Kontaktlarni yaratish texnikasini yaratish yangi yarimoʻtkazgichlarning texnologik rivojlanishining muhim qismidir. Kontaktlarda elektromigratsiya va tabaqalanish ham elektron qurilmalarning ishlash muddatini cheklaydigan omillardan biridir.

¹¹ Андреев А. Н., Растегаева М. Г., Растегаев В. П., Решанов С. А. К вопросу об учёте растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов ФТП, 1998, т32, #7

Takrorlash uchun savollar

1. Optika nimani o'rganadi?
2. Yarimo'tkazgichli birikmalar bilan optika qanday bo'limlarga bo'linadi?
3. Yarimo'tkazgichli optika nimani o'rganadi?
4. Fizik optika nimani o'rganadi?
5. Fiziologik optika nimani o'rganadi?
6. Optika so'zining lug'aviy ma'nosi

13-§. YARIMO'TKAZGICHLARDA ION LEGIRLASH TEXNOLOGIYASI.

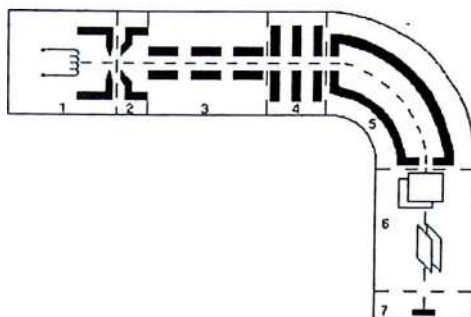
Ion-molekulyar usulga asosan, yuzaga o'tkazilgan atomlarning ma'lum bir qismi ionlashtiriladi va ularga energiya beriladi. Bu tushayotgan ionlar asos va o'tkazilgan atomlarning aralashib ketishini tezlashtiradi va nisbatan kichik temperaturalarda kerakli plyonkalar olishni ta'minlaydi.

Ion implantasiya usulda kerakli element atomlari tulaligicha ionlarga aylantiriladi va ularga elektr maydoni yordamida energiya berilib, asosning yuzasiga tushiriladi. Bu energiyaning hisobiga ionlar asosning ichiga kirib borib joylashadi. Ko'pincha, jarayonning o'zida kerakli birikmalar hosil bo'ladi. Masalan, BaSi yoki BaSi₂ birikmasini olish uchun kremniyning yuzasiga bariy ionlari bilan uriladi. Bunda bariyning ko'p qismi kremniyning yuza osti qatlamlariga joylashib, kerakli birikmalarni hosil qiladi. Ion implantasiya usulida monokristallarning yuzasi buziladi, ko'p hollarda hosil bulayotgan plyonka amorf bo'ladi, uni kristall holga aylantirish uchun qizdirish kerak bo'ladi. Ion implantasiya usulining eng asosiy afzalligi shundan iboratki, bu usul bilan har qanday materialga turli xil atomlarni kiritishi mumkin. Bu usulni amalga oshirish uchun ma'lum bir qurilmalardan foydalaniladi. Shulardan ionli legirlash uchun asbob – uskunalarni tuzilishini ko'rib o'taylik.

Ionli legirlash qurilmalarining turli-tuman xillari mavjud. Adabiyotlarda E_0 energiyaning 10 keV dan 300 keV gacha oralig'ida ishlashi uchun mo'ljallangan tezlatgichlarni tafsiloti mavjud, lekin rasmiy jihatdan bu soha mazkur sharhli muhokama doirasiga kirmaydi.

Bu yerda qattiq jism $E_0 \leq 10$ keV energiyali ionlar bilan legirlanganda sirtidagi xossalarning o'zgarishi va yangi xususiyatli qatlamlar (plyonkalar) hosil bulishi muhokama qilinadi. Biroq hamma tezlatgichlarning ishlash prinsipi bir xil.

Tezlatgichlar quyidagi asosiy qismlardan tashkil topgan: ion manbai, so'rib oluchi, tezlashtiruvchi va fokuslovchi elektrodlar, ionlarni massalari buyicha taqsimlovchi (separator – tanlovchi), skanlash qurilmasi. Ular bir-biridan odatda faqat tezlatish va fokuslash usullari bilan farq qiladilar. Ionli legirlash qurilmasining tuzilish sxemasi 47-rasmda ifodalangan.



47-rasm: Ion pushkasining konstruksiyasi: 1-ion manba, 2-ionni tortish sistemasi, 3-fokuslovchi linza, 4-ionni tezlashtiruvchi sistema, 5-ionlarni taqsimlash uchun neytral zarrachalarning qurilmasi, 6-ko'chirish sistemasi, 7-namuna

1. **Ionli manba.** Ion manbasidan atomlar aralashmasining ionlashishi amalga oshiriladi. Gazsimon moddalardan ham, qattiq moddalardan ion dastalarini olish imkonini beruvchi manbalar keng qo'llaniladi. Qo'llanish maqsadiga qarab quyidagi manba turlarini biridan foydalaniladi: cho'g'lanuvchi katodli manba, yuqori chastotali manba, Penning razryadli manbasi, duaplazmatron plazma generatori - plazma oqimi olinadigan razryadli qurilma, changlanishdan foydalaniladigan manba va atomlarning sirtiy ionlashishiga asoslangan manba. Ion to'riga nisbatan universalligi hamda intensiv ion dastasi olish imkoniyati tufayli hozirgi vaqtda cho'g'lanuvchi katodli manbalardan ilmiy izlanishlarda ham, sanoat qurilmalarida ham keng foydalanilmoqda. Katod va anod orasidagi fazoda zazor gaz yoki qattiq jism bug'larining yuqori bosimi (odatda $10^{-3} \div 10^{-1}$ Pa) hosil qilinadi. Ionlarni olish prinsipi atomlarni tez elektronlar bilan to'qnashishida atomlarning ionlashishiga (elektron qabul qilishi yoki yo'qotishi) asoslangan. Razryad volframdan yasalgan katod va anod o'rtasida yonadi. Elektronlarni razryadda bo'lish muddatini uzaytirish, ya'ni ionlashish intensivligini ko'chaytirishga tashqi magnit maydoni yordamida erishiladi.

Ishqoriy va ishqoriy-yer metallarining bir zaryadli ionlarini olish uchun odatdagi sirtidagi musbat ionlashish hodisasiga asoslangan manbalardan foydalaniladi. Qayd etilgan metallar atomlarining ionlashish

energiyasi kichik ($E_i \leq 5$ eV) bo'lganligi tufayli bu atomlar cho'g'langan volfram simining sirti bilan o'zaro ta'sirda ionlashadi va shuning uchun ham anod va volfram sim orasida razryad hosil qilishni va magnit maydonlaridan foydalanishni zarurati qolmaydi. Hosil bo'lgan ionlar tortuvchi elektrodlar yordamida manbadan chiqarilib, so'ngra fokuslovchi elektrodlar maydoniga tushadilar.

2. Fokuslash va tezlatish. Ionlar dastasini fokuslash ionlarni tezlashtirishdan oldin amalga oshiriladi. Fokuslash fokuslovchi va tortuvchi elektrodlardan tuzilgan elektrostatik linza yordamida bajari-ladi. So'ngra bu ionlar tezlatuvchi elektrod maydonida tezlashtirila-dilar. Ionlarni quyi ($10 \div 15$ keV) energiya olguncha tezlatishga mo'ljallangan qurilmalarda odatda bitta tezlatuvchi elektroddan, ancha yuqori energiyalar uchun esa bir nechta elektrodlardan (tezlatuvchi seksiyali bo'limlardan iborat naydan) foydalaniladi.

3. Ionli dastaning analizatori (tahlillovchisi). Ionlarni tanlash bevosita ion manbalaridan keyin yoki ular tezlashtirilganidan keyin amalga oshirilishi mumkin. Bu usullarning har biri o'z ustunlik va kamchiliklariga ega. Amalda ionlarni massasiga ko'ra ajratish uchun magnitli, elektromagnit va elektrostatik maydonli separatorlardan foydalaniladi.

4. Ionlar dastasini skanlash. Implantasiyaning bir jinsililigini ta'minlash (va ba'zi hollarda legirlangan maydonni oshirish) uchun bir necha usullardan foydalaniladi: ionlar dastasini skanlash, namunani siljutilishi va dastani fokuslash. So'nggi ikki usul uncha katta aniqlik talab qilinmaydigan izlanishlar uchun yaraydi.

Implantasiyalanuvchi ionlarning yetarli bir tekis (notekisligi $\leq 1\%$) taqsimlanishini olish uchun X va Y yo'nalishlardagi elektrostatik skanlash eng ko'p qo'llaniladi. Ayni paytda $0,002 \div 10$ kGs oraliqdagi chastotali arrasimon kuchlanish generatorlaridan foydalaniladi.

13.1. Tajribalar o'tkazish vaqtida amalga oshiriladigan texnologik jarayonlar.

Tajribalar jarayonida ionli implantasiya bilan bir qatorda ko'pgina texnologik operatsiyalar amalga oshiriladi: namunalarni vakuumda qizdirish, namuna sirtiga begona atomlarni kiritish; ionlar bilan o'zoq vaqt "o'qqa tutish", oksidlanish. Bu operatsiyalarni elektron to'pi va

analizator elektrodleri sirtlarining ifloslanishini oldini olish maqsadida qo'shimcha (ishlov berish) kamerasida bajarish maqsadga muvofiq.

1. Namunalarni tozalash 10^{-7} Pa dan yuqori bo'lgan vakuumda yuqori temperaturali qizdirish yo'li bilan, zarur bo'lganda esa ionli ishlov berish va keyingi qizdirish (otjig) yo'li bilan bajarilishi zarur.

$T \approx 1200$ K haroratgacha qizdirish isitgichning issiqlik nurlanishi hisobiga, undan yuqori temperaturagacha qizdirish esa (orqa tomondan) elektronlar oqimini yo'naltirish bilan amalga oshiriladi.

Namunalarni ionlar bilan tozalaganda $8 \text{ mA} \cdot \text{sm}^{-2}$ tok zichligiga ega bo'lgan $0,5 \div 1,5$ keV energiyali Ar^+ ionlar dastasidan foydalanish mumkin.

2. Ishqoriy va ishqoriy-yer elementlarining atomlarini changlantirish tok o'tkazilganda qiziydigan tantaldan (yoki nikeldan) yasalgan qayiqcha (nay) bilan amalga oshiriladi. Tantaldan yasalgan qayiqchaga joylashtirilgan BaTi tabletkasidan (kichkina ko'lcha shaklidagi bo'lakchasidan) va atomlari, kapillyar tuynukli nay ko'rinishidagi standart natriy va seziy manbalaridan Na va Cs atomlari olinadi. Bariy va ishqoriy metallarning changlanish tezligini o'rganilayotgan namunaning sirti aynan shu metallarning atomlari bilan qoplanganida namunaning chiqish ishi minimumiga ko'ra aniqlash mumkin. Shu bilan birga $e\phi(t) = e\phi_{\min}$ bo'lganda qalinlik $\theta \approx 1$ monoqatlam deb qabul qilingan. Bundan tashqari changlanish tezligini kalibrlash (taqqoslash, baholash) taglik modda elektronlarining oje-piklariga va changlanish jarayonidagi (sirtidagi) atomlarga ko'ra bajariladi.

3. Sirtga kislorodli ishlov berish asboba zarur bosim oraliqlaridagi dinamik muvozanat barqarorlashgunicha chiqaro'vchi kamera kislorodni uzluksiz yuborilishi bilan amalga oshiriladi. Kislorod manbai bo'lib qizdiriladigan shisha naychaga joylashtirilgan KMnO_4 kukuni xizmat qiladi. Gazsimon kislorod oqimi suyuq kislorodli qopqon orqali o'tadi. Naychaning isish temperaturasini o'zgartirib, turli bosimdagi kislorodni olish mumkin.

O'rganilayotgan namunalarning sirtini o'zoq elektron "o'qqa tutish" ko'p elektrodli elektron to'pidan foydalanib bajariladi. To'p $10 \div 100 \text{ mA} \cdot \text{sm}^{-2}$ oraliqdagi elektron toki zichligini ta'minlaydi. Dastaning nishondagi diametri $d \approx 3 \text{ mm}$ ni tashkil qiladi.

Takrorlash uchun savollar

1. Ionli manba nima?
2. Fokuslash va tezlatish deganda nimani tushunasiz?
3. Ionli dastaning analizatori (tahlillovchisi) vazifasi nimadan iborat?
4. Ionlar dastasini skanlash holati nima?

14-§. P-N O'TISH SIRTINI HIMOYALASH USULLARI.

Yarim o'tkazgichli asboblarning ko'pchiligi bir jinsli bo'lmagan yarim o'tkazgichlardan tayyorlanadi. Xususiyl xolatda bir jinsli bo'lmagan yarim o'tkazgich bir sohasi p -turdagi, ikkinchisi esa n -turdagi monokristaldan tashkil topadi.

Bunday bir jinsli bo'lmagan yarim o'tkazgichning p va n - sohalarining ajralish chegarasida hajmiy zaryad qatlami hosil bo'ladi, bu sohalar chegarasida ichki elektr maydoni yuzaga keladi va bu qatlam elektron - kovak o'tish yoki p - n o'tish deb ataladi. Ko'p sonli yarim o'tkazgichli asbobl va integral mikrosxemalarning ishlash prinsipi p - n o'tish xossalariga asoslangan.

14.1. p - n o'tishning hosil bo'lishi.

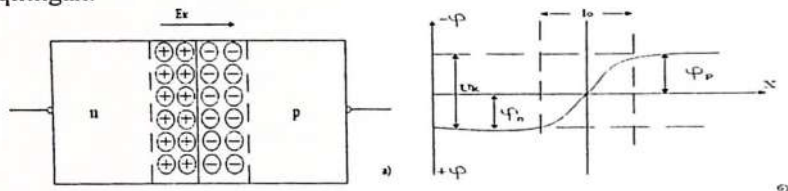
p - n o'tish hosil bo'lish mexanizmini ko'rib chiqamiz. Soddalik uchun, n -sohadagi elektronlar va p - sohadagi kovaklar sonini teng olamiz. Bundan tashqari, har bir sohada uncha katta bo'lmagan asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar miqdori mavjud. Xona temperaturasida p -turdagi yarim o'tkazgichda akseptor manfiy ionlarining konsentrasiyasi N_a kovaklar konsentrasiyasi p_p ga, n -turdagi yarim o'tkazgichda donor musbat ionlarining konsentrasiyasi N_d elektronlar konsentrasiyasi n_n ga teng bo'ladi. Demak, p va n -sohalar o'rtasida elektronlar va kovaklar konsentrasiyasida sezilarli farq mavjudligi tufayli, bu sohalar birlashtirilganda elektronlarning r -sohaga, kovaklarning esa n -sohaga diffuziyasi boshlanadi.

Diffuziya natijasida n - soha chegarasida elektronlar konsentrasiyasi musbat donor ionlari konsentrasiyasidan kam bo'ladi va bu soha musbat zaryadlana boshlaydi. Bir vaqtning o'zida p -soha chegarasidagi kovaklar konsentrasiyasi kamayib boradi va u akseptor kiritmasi bilan kompensasiyalangan ion zaryadlari hisobiga manfiy zaryadlana boshlaydi. Musbat va manfiy ishorali aylanalar mos ravishda donor va akseptor ionlarini tasvirlaydi.

Hosil bo'lgan ikki hajmiy zaryad qatlami p - n o'tish deb ataladi. Bu qatlam harakatchan zaryad tashuvchilar bilan kambag'allashtirilgan. SHuning uchun uning solishtirma qarshiligi p va n -soha qarshiliklariga nisbatan juda katta. Bazi adabiyotlarda bu qatlam **kambag'allashgan** yoki **i - soha** deb ataladi.

Hajmiy zaryadlar turli ishoralarga ega bo'ladilar va p - n o'tishda kuchlanganligi $\vec{E}$ ga teng bo'lgan elektr maydon hosil qiladilar. Asosiy zaryad tashuvchilar uchun bu maydon tormozlovchi bo'lib tasir ko'rsatadi va ularni p - n o'tish bo'ylab erkin harakat qilishlariga qarshilik ko'rsatadi. 48 b- **diffuza tokini** yuzaga keltiradilar.

Asosiy zaryad tashuvchilarning p - n b-rasmda o'tish yuzasiga perpendikulyar bo'lgan, X o'qi bo'ylab potensial o'zgarishi ko'rsatilgan. Bu vaqtda nol potensial sifatida chegaraviy soha potentsiali qabul qilingan.



48-rasm. p - n o'tish voltlarda ifodalanadigan kontakt potentsiallar farqi

48-rasmdan ko'rinib turibdiki, p - n o'tish voltlarda ifodalanadigan kontakt potentsiallar farqiga $U_K = \varphi_n - \varphi_p$ teng bo'lgan potensial to'siq yuzaga keladi. U_K kattaligi dastlabki yarim o'tkazgich material ta'qiqlangan zona kengligi va kirishma konsentratsiyasiga bog'liq bo'ladi. p - n o'tish kontakt potentsiallar farqi: germaniy uchun $U_K \approx 0,35$ V, kremniy uchun esa $U_K \approx 0,7$ V.

p - n o'tish kengligi $l_0 \sqrt{U_K}$ ga proporsional bo'ladi va mkmning o'nlik yoki birlik qismlarini tashkil etadi. Tor p - n o'tish hosil qilish uchun katta kiritma konsentatsiyasi kiritiladi, l_0 ni kattalashtirish uchun esa kichik kirishmalar konsentratsiyasi qo'llaniladi.

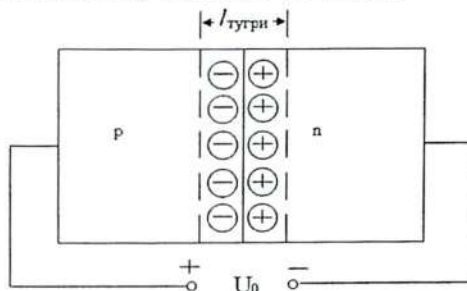
14.2. p - n o'tish toklari.

$U_i = \frac{U_R}{q}$ energiyaga ega bo'lgan ko'pgina zaryad tashuvchilar

(49- rasmga qarang) p - n o'tish orqali qo'shni sohalarga diffuziya hisobiga p - n o'tish maydoniga qarama-qarshi ravishda siljiydilar. Ular **diffuziya tokini** yuzaga keltiradilar. Asosiy zaryad tashuvchilarning p - n o'tish orqali harakati bilan bir vaqtda, p - n o'tish ular uchun tezlatuvchi

bo'lib ta'sir ko'rsatayogan maydon ta'sirida asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar ham harakatlanadilar. Asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar oqimi *dreyf tokini* yuzaga keltiradi. Tashqi maydon ta'sir ettiril-maganda dinamik muvozanat o'rnatiladi, ya'ni diffuziya va dreyf toklarining absolyut qiymatlari teng bo'ladi. Lekin diffuziya va dreyf toklari o'zaro qarama-qarshi yo'nalishda yo'nalganligi uchun, *p-n* o'tishdagi natijaviy tok nolga teng bo'ladi.

49-rasmda *p-n* o'tishning to'g'ri ulanishi keltirilgan. Agar *p-n* o'tishga tashqi kuchlanish manbai U ulansa, u holda muvozanat sharti buziladi va tok oqib o'ta boshlaydi. Agar kuchlanish manbaining musbat qutbi *p*-turdagi sohaga, manfiy qutbi esa *n*-turdagi sohaga ulansa, bunday ulanish *to'g'ri ulanish* deb ataladi



49- rasm. *p-n* o'tishning to'g'ri ulanishi

Kuchlanish manbaining elektr maydoni kontakt maydon tomonga yo'nalgan bo'ladi, shu sababli *p-n* o'tishdagi natijaviy maydon kuchlanganligi kamayadi. Maydon kuchlanganligining kamayishi potensial to'siq balandligini kuchlanish manbai qiymatiga kamayishiga olib keladi: $U_K = U_0$. Bu vaqtda *p-n* o'tish kengligini ham kamayishini ko'rish mushkul emas.

Potensial to'siq balandligining kamayishi shunga olib keladiki, *p-n* o'tish orqali harakatlanayotgan asosiy zaryad tashuvchilarni soni ham ortadi, yani diffuziya toki ortadi. Har bir sohada ortiqcha asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar konsentrasiyasi yuzaga keladi – *n*-sohada kovaklar, *p*-sohada elektronlar. Biror yarim o'tkazgich sohasiga asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarni siqib kiritish jarayoni injeksiya deb ataladi.

Kuchlanish o'zgarishi bilan diffuziya tokining o'zgarishi eksponensial qonun asosida ro'y beradi:

$$I_{\text{diff}} = I_0 e^{qU_0/kT} \quad (14.1)$$

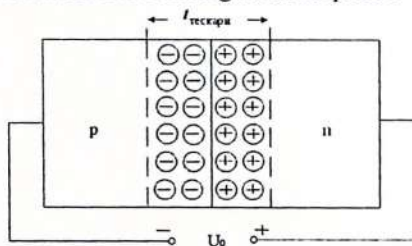
bu erda I_0 – dreyf toki bo'lib, uni p - n o'tishning teskari toki deb ham atashadi.

To'g'ri kuchlanish berilganda potensial to'siq balandligiga teskari tok tasir ko'rsatmaydi, chunki bu tok faqat p - n o'tish orqali birlik vaqt ichida tartibsiz issiqlik harakati tufayli olib o'tilayotgan asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning soni bilan belgilanadi. Diffuziya va dreyf toklari bip-biriga nisbatan qarama-qarshi yo'nalgan bo'ladi, shu sababli p - n o'tish orqali oqib o'tayotgan natijaviy (to'g'ri) tok (2.1) dan kelib chiqqan holda

$$I_{T\bar{y}r} = I_{\text{diff}} - I_0 = I_0 (e^{qU_0/kT} - 1) \quad (14.2)$$

I_0 toki germaniyli p - n o'tishlarda o'nlab mA yoki kremniyli p - n o'tishlarda nanoamperlarni tashkil etadi va temperatura ortishi bilan kuchli ravishda tok ham ortadi. Lekin I_0 qiymatidagi katta farq taqiqlangan zona kengligi bilan aniqlanadi.

50-rasmda p - n o'tishning teskari ulanish tasviri keltirilgan. Bu holatda tashqi kuchlanish manbaining musbat qutbi n -sohaga ulanadi.



50-rasm. p - n o'tishning teskari ulanishi.

Kuchlanish manbaining elektr maydoni o'tishning kontakt maydoni yo'nalgan tomonga yo'nalgan. SHu sababli potensial to'siq balandligi ortadi va $U_K = U_0$ ga teng bo'ladi. Teskari kuchlanish qiymatining ortishi p - n o'tish kengligining kengayishiga olib keladi ($I_{T\bar{y}r} \ll I_{TECK}$). Amaliy hisoblarda quyidagi ifodadan foydalanish qulay:

$$I = I_0 \sqrt{\frac{U_0}{U_K}} \quad , \quad (14.3)$$

bu yerda $I_0 = \sqrt{\frac{2e\varepsilon_0}{q} U_K \left(\frac{1}{Na} + \frac{1}{Nd} \right)}$ - tashqi maydon tasir etmagan-dagi p - n kengligi, ε - yarim o'tkazgich nisbiy dielektrik doimiysi, ε_0 - elektr doimiy.

Potensial to'siqning ortishi diffuziya tokining kamayishiga olib keladi. Diffuziya tokining o'zgarishi eksponensial qonun asosida ro'y beradi

$$I_{\text{diff}} = I_0 e^{-qU_0/kT} \quad (14.4)$$

Dreyf toki potensial to'siq balandligiga bog'liq emasligi va I_0 ga teng bo'lganligi sababli, p - n o'tishdan o'tayotgan natijaviy tok

$$I_{\text{TECK}} = I_0 e^{-qU_0/kT} - I_0 = I_0 (e^{-qU_0/kT} - 1) \quad (14.5)$$

Teskari ulanishda kontaktlashuvchi yarim o'tkazgichlardan asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar chiqarib olinadi (ekstraksiya). SHu sababli teskari tok ekstraksiya toki deb ataladi.

15-§. YARIMO‘TKAZGICH ASBOBLARNI KONSTRUKTIV SHAKLLANTIRISH.

Elektron qurilmalarni qo‘llash sohalarining jadal rivojlanishi va kengayishi yarimo‘tkazgichli qurilmalarga asoslangan elementlar bazasining yaxshilanishi bilan bog‘liq. Shu sababli, elektron qurilmalarning ishlash jarayonlarini tushunish uchun yarimo‘tkazgichli qurilmalarning asosiy turlarining qurilmasi va ishlash printsipini bilish zarur.

O‘zlarining chidamliligi jihatidan yarimo‘tkazgichli materiallar o‘tkazgichlar va dielektriklar orasidagi oraliq pozitsiyani egallaydi.

Yarimo‘tkazgichli qurilmalarni ishlab chiqarish uchun asosiy materiallar kremniy (Si), kremniy karbid (SiC), galliy va indiy birikmalari hisoblanadi.

Yarimo‘tkazgichlarning elektr o‘tkazuvchanligi aralashmalar va tashqi energiya ta‘siriga (harorat, nurlanish, bosim va boshqalar) bog‘liqdir. Oqim oqimini ikki turdagi zaryad tashuvchilar - elektronlar va teshiklar keltirib chiqaradi. Kimyoviy tarkibiga qarab toza va nopok yarimo‘tkazgichlar farqlanadi.



51-rasm. Yarimo‘tkazgichli qurilmalarni umumiy ko‘rinishi.

Elektron qurilmalarni ishlab chiqarish uchun kristalli tuzilishga ega bo‘lgan qattiq yarimo‘tkazgichlar ishlatiladi.

51-rasmda yarimo‘tkazgichli qurilmalar umumiy ko‘rinishi keltirilgan. Yarimo‘tkazgichli qurilmalar - ularning ishlashi yarimo‘tkazgich materiallarining xususiyatlaridan foydalanishga asoslangan.

Uzluksiz yarim o'tkazgichlar asosida yarimo'tkazgichli rezistorlar ishlab chiqariladi:

Lineer qarshilik - qarshilik kuchga va oqimga juda oz bog'liq. Bu integral mikroshemalarning "elementi".

Varistor - qarshilik qo'llaniladigan kuchlanishga bog'liq.

Termistor - qarshilik haroratga bog'liq. Ikkita turi mavjud: termistor (harorat ko'tarilganda qarshilik pasayadi) va posistorlar (harorat ko'tarilganda qarshilik kuchayadi).

Fotoresistor - qarshilik yorug'lik (nurlanish) ga bog'liq. Kuchlanish o'lchami - qarshilik mexanik deformatsiyaga bog'liq.

Ko'pgina yarimo'tkazgichli qurilmalarning ishlash printsipli elektron teshikli pn birikmalarining xususiyatlariga asoslangan.

15.1. Yarimo'tkazgichli diodlar.

Bu bitta p-n-birikma va ikkita o'tkazgichli yarim o'tkazgichli qurilma, ularning ishlashi p-n-birikmaning xususiyatlariga asoslanadi.

p-n birikmasining asosiy xususiyati bir tomonlama o'tkazuvchanlikdir - oqim faqat bitta yo'nalishda oqadi. Diyotning an'anaviy grafik belgisi (UGO) o'qning shakliga ega, bu esa qurilmadan oqim oqimining yo'nalishini ko'rsatadi.

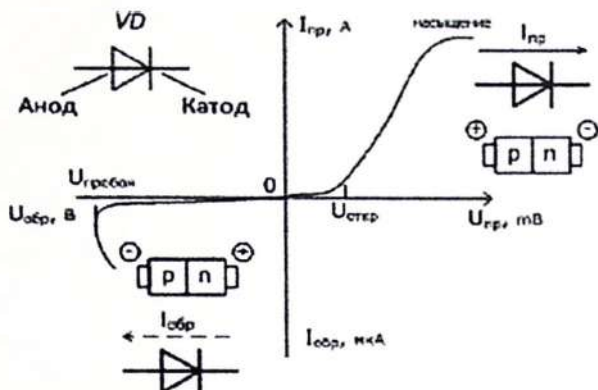
Strukturaviy ravishda, diod kassaga o'ralgan p-n-birikmasidan iborat (mikromodulyar ochiq karkaslardan tashqari) va ikkita qo'rg'oshin: p-mintaqadan - anod, n-mintaqadan - katoddan.

O'sha. diyot - bu tokni faqat bitta yo'nalishda - anoddan katodgacha o'tkazadigan yarimo'tkazgichli qurilma.

Qurilma orqali oqimning qo'llaniladigan voltajga bog'liqligi $I = f(U)$ moslamaning oqim kuchlanish xarakteristikasi (VAC) deb ataladi. Diyotning bir tomonlama o'tkazuvchanligi uning $I - V$ xarakteristikasidan ko'rinadi (52-rasm).

Maqsadiga qarab yarimo'tkazgichli diodlar rektifikator, universal, impuls, zener diodalari va stabilizatorlar, tunnel va teskari diodlar, LED va fotodiodlarga bo'linadi.

Bir tomonlama o'tkazuvchanlik diyotning rektifikatsion xususiyatlarini aniqlaydi. To'g'ridan-to'g'ri ulanish bilan ("+" anodga va "-" katodga) diyod ochiq va u orqali etarlicha katta old oqim oqadi. Orqaga ulanishda ("-" anodga va "+" katodga) diyod qulflanadi, ammo kichik teskari oqim oqadi.



52-rasm. - Diyodning oqim kuchlanish xarakteristikasi

Rektifier diyotlari past chastotali o'zgaruvchan tokni (odatda 50 kHz dan kam) doimiyga aylantirish uchun mo'ljallangan, ya'ni. to'g'rilash uchun. Ularning asosiy parametrlari - maksimal ruxsat etilgan old oqim $I_{пр max}$ va maksimal ruxsat etilgan teskari kuchlanish $U_{обр max}$. Ushbu parametrlar cheklash deb ataladi - ulardan oshib ketish qurilmani qisman yoki to'liq o'chirib qo'yishi mumkin.

Ushbu parametrlarni oshirish uchun p-n-birikmalarning ketma-ket parallel, ko'priqli yoki boshqa bog'lanishlari bo'lgan diodli ustunlar, to'plamlar, matritsalar ishlab chiqariladi.

Universal diodlar keng chastota diapazonidagi oqimlarni to'g'rilash uchun ishlatiladi (bir necha yuz megagertsgacha). Ushbu diodalarning parametrlari rektifikatsiya qiluvchi diodalarning parametrlari bilan bir xil, faqat qo'shimcha qurilmalar kiritiladi: maksimal ish chastotasi (MGts) va diodaning sig'imi (pF).

Pulse diodlari impuls signalini konvertatsiya qilish uchun mo'ljallangan va yuqori tezlikda ishlaydigan impuls davrlarida qo'llaniladi. Ushbu diodalarga qo'yiladigan talablar qurilmaning etkazib beriladigan kuchlanishning impuls xususiyatiga tezkor ta'sirini ta'minlash bilan bog'liq - diyotning yopiq holatdan ochiq holatga va aksincha qisqa o'tish davri.

Zener diodlari - bu yarimo'tkazgichli diodlar, ularning bo'ylab kuchlanish pasayishi oqim oqimiga ozgina bog'liq. Voltajni barqarorlashtirish uchun xizmat qilish.

Varikaplar - ishlash printsipi p-n-birikmaning xususiyatiga asoslanib, unga teskari kuchlanish qiymati o'zgarganda to'siq sig'iminining qiymatini o'zgartiradi. Ular o'zgaruvchan kondansatörler sifatida ishlatiladi, voltaj boshqariladi. O'chirish sxemalarida varikaplar teskari yo'nalishda yoqiladi.

LEDlar yarimo'tkazgichli diodlardir, ularning printsipi to'g'ridan-to'g'ri oqim u orqali o'tayotganda p-n-birikma orqali yorug'lik chiqarilishiga asoslangan.

Fotodiodlar - teskari oqim p-n-birikmaning yoritilishiga bog'liq.

Shotti diodlari metall-yarimo'tkazgichli o'tishga asoslangan bo'lib, ular an'anaviy diodalarga qaraganda ancha yuqori tezlikka ega.



53-rasm. Diodlarning an'anaviy grafik belgilanishi

15.2. Transistorlar.

Transistor - bu elektr signallarini kuchaytirish, yaratish va aylantirish, shuningdek elektr zanjirlarini almashtirish uchun mo'ljallangan yarimo'tkazgichli qurilma.

Transistorning o'ziga xos xususiyati - bu kuchlanish va oqimni kuchaytirish qobiliyatidir - tranzistorning kirish qismida ishlaydigan kuchlanish va oqimlar uning chiqishida sezilarli darajada yuqori kuchlanish va oqimlarning paydo bo'lishiga olib keladi.

Raqamli elektronika va impuls zanjirlarining ko'payishi bilan tranzistorning asosiy xususiyati uning boshqarish signali ta'sirida ochiq va yopiq holatda bo'lish qobiliyatidir.

Transistor o'z nomini tran (sfer) (re) sistor - boshqariladigan qarshilik inglizcha ikkita so'zining qisqartmasidan oldi. Ushbu nom tasodifiy emas, chunki tranzistorga qo'llaniladigan kirish kuchlanishi ta'sirida uning chiqish terminallari orasidagi qarshilik juda keng doirada tartibga solinishi mumkin.

Transistor zanjirdagi oqimni noldan maksimal qiymatgacha tartibga solishga imkon beradi.

Transistorlar tasnifi:

- harakat tamoyiliga ko'ra: maydon (bir qutbli), bipolyar, birlashtirilgan.

- tarqalgan kuchning qiymati bo'yicha: past, o'rta va yuqori.

- cheklovchi chastotaning qiymati bo'yicha: past, o'rta, yuqori va yuqori chastota.

- ish kuchlanishining qiymati bo'yicha: past va yuqori kuchlanish.

- funktsional maqsadi bo'yicha: universal, kuchaytiruvchi, kalit va boshqalar.

- dizayn jihatidan: qadoqlanmagan holda va dizayndagi holda, qattiq va egiluvchan uchlari bilan.

Amalga oshirilgan funktsiyalarga qarab, tranzistorlar uchta rejimda ishlashi mumkin:

- 1) Faol rejim - analog qurilmalarda elektr signallarini kuchaytirish uchun ishlatiladi. Transistorning qarshiligi noldan maksimal qiymatgacha o'zgaradi - ular tranzistor "ochiladi" yoki "yopiladi" deyishadi.

- 2) to'yinganlik rejimi - tranzistorning qarshiligi nolga intiladi. Bunday holda, tranzistor yopiq o'rni kontaktiga teng.

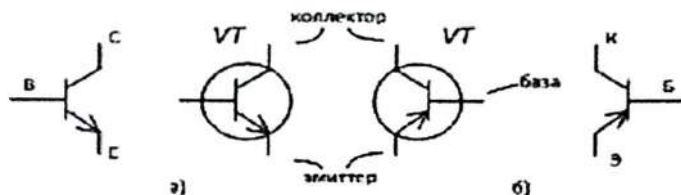
- 3) chiqib ketish rejimi - tranzistor yopiq va yuqori qarshilikka ega, a'ni. bu ochiq o'rni kontaktiga tengdir.

Doygunlik va uzilish rejimlari raqamli, impulsli va kommutatsion davrlarda qo'llaniladi.

Bipolyar tranzistor - bu elektr signallarining kuchini kuchaytiradigan ikkita pn birikmasi va uchta terminali bo'lgan yarimo'tkazgichli qurilma.

Bipolyar tranzistorlarda oqim ikki turdagi zaryad tashuvchilarning harakatiga bog'liq: elektronlar va ularning nomlarini aniqlaydigan teshiklar.

Diagrammalarda tranzistorlarni ham aylana shaklida, ham bo'lmasdan tasvirlashga ruxsat beriladi (3-rasm). Ok transistorda oqim oqimining yo'nalishini ko'rsatadi.



54-rasm - An'anaviy ravishda n-p-n (a) va p-n-p (b) tranzistorlarning grafik belgilanishi

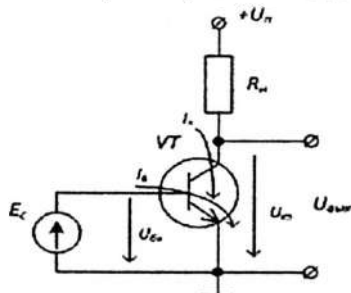
Transistorning asosini yarimo'tkazgichli plastinka tashkil etadi, unda o'zgaruvchan o'tkazuvchanlik turlari bilan uchta bo'lim hosil bo'ladi - elektron va teshik. Qatlamlarning almashinishiga qarab transistor strukturasi ikki turi ajratiladi: n-p-n (54-rasm, a) va p-n-p (54-rasm, b).

Emitter (E) - zaryad tashuvchilarning manbai bo'lgan qatlam (elektronlar yoki teshiklar) va qurilma oqimini yaratadi;

Kollektor (K) - emitentdan keladigan zaryad tashuvchilarni qabul qiluvchi qatlam;

Baza (B) - tranzistor oqimini boshqaradigan o'rta qatlam.

Transistor elektr pallasida yoqilganda uning elektrodlaridan biri kiritiladi (kirish o'zgaruvchan signal manbai yoqiladi), ikkinchisi chiqadi (yuk yoqiladi), uchinchi elektrod nisbatan keng tarqalgan kirish va chiqish. Ko'pgina hollarda umumiy emitrli elektron ishlatiladi (4-rasm). Baza uchun 1 V dan ortiq bo'lmagan kuchlanish, kollektorga 1 V dan yuqori, masalan +5 V, +12 V, +24 V va boshqalar qo'llaniladi.



55-rasm - Umumiy emitentli bipolyar tranzistorni yoqish sxemalari

Kollektor oqimi faqat Ib oqimi tushganda paydo bo'ladi (Ube tomonidan belgilanadi). Ib qancha ko'p bo'lsa, shuncha Ik bo'ladi. Ib mA birliklari bilan o'lchanadi va kollektor oqimi o'nlab va yuzlab mA bilan o'lchanadi, ya'ni. IbIk. Shuning uchun bazaga kichik amplituda o'zgaruvchan signal qo'llanilganda kichik Ib o'zgaradi va katta Ic unga mutanosib ravishda o'zgaradi. Yuklanish qarshiligi kollektori sxemaga kiritilganida, kirish shaklini takrorlaydigan, ammo kattaroq amplituda bo'lgan signal ajratiladi, ya'ni. kuchaytirilgan signal.

Transistorlarning ruxsat etilgan maksimal parametrlariga birinchi navbatda quyidagilar kiradi: $P_{k.max}$ kollektorida eng katta ruxsat etilgan quvvat, kollektor va emitent $U_{k.max}$ orasidagi kuchlanish, $I_{k.max}$ kollektor oqimi.

Cheklovchi parametrlarni oshirish uchun bir holatga ilova qilingan bir necha yuzgacha parallel ulangan tranzistorlar soni bo'lishi mumkin bo'lgan tranzistorli agregatlar ishlab chiqariladi.

Bipolyar tranzistorlar hozirda, ayniqsa impulsli quvvat texnologiyasida kamroq va kamroq qo'llaniladi. Ularning o'rnini dala effektli tranzistorlar MOSFET va birlashgan IGBT tranzistorlar egallaydi, bu elektronika sohasida shubhasiz afzalliklarga ega.

Maydon tranzistorilarida tok faqat bitta belgining (elektronlar yoki teshiklar) tashuvchilar harakati bilan aniqlanadi. Bipolyarlardan farqli o'laroq, tranzistor oqimi elektr maydon tomonidan boshqariladi, bu o'tkazgich kanalining kesimini o'zgartiradi.

Kirish pallasida oqim oqimi bo'lmaganligi sababli, ushbu sxemadan quvvat sarfi deyarli nolga teng, bu shubhasiz dala effektli tranzistorning afzalligi.

Strukturaviy ravishda tranzistor n yoki p tipidagi o'tkazgich kanalidan iborat bo'lib, uning uchida mintaqalar joylashgan: zaryad tashuvchilarni chiqaradigan manba va tashuvchilarni qabul qiladigan drenaj. Kanalning kesimini tartibga solish uchun ishlatiladigan elektrodga darvoza deyiladi.

Maydon tranzistori - bu o'tkazgich kanalining kesimini o'zgartirib, zanjirdagi oqimni tartibga soluvchi yarimo'tkazgichli qurilma.

p-n-birikmasi shaklida va izolyatsiya qilingan eshikli dala-effektli tranzistorlar mavjud.

Yarimo'tkazgich kanali va metall eshik o'rtasida izolyatsiya qilingan eshikli Maydon tranzistorilarida dielektrikning izolyatsion

qatlami - MIS tranzistorlari (metall - dielektrik - yarimo'tkazgich), maxsus holat - kremniy oksidi - MOS tranzistorlari mavjud.

O'rnatilgan kanalli MOS tranzistorining dastlabki o'tkazuvchanligi bor, u kirish signali bo'lmagan taqdirda ($U_{zi} = 0$) maksimalning yarmiga teng bo'ladi. $U_{zi} = 0$ kuchlanishli induksion kanalli MOS tranzistorlarida chiqish oqimi yo'q, $I_c = 0$, chunki dastlab o'tkazuvchi kanal yo'q.

Induksion kanalga ega bo'lgan MOSFET-lar MOSFET-lar deb ham ataladi. Ular asosan asosiy elementlar sifatida, masalan, quvvat manbalarini almashtirishda ishlatiladi.

MOS tranzistorlariga asoslangan asosiy elementlar bir qator afzalliklarga ega: signal zanjiri boshqarish harakati manbasiga galvanik ravishda ulanmagan, boshqaruv zanjiri tokni iste'mol qilmaydi va ikki tomonlama o'tkazuvchanlikka ega. Maydon transistorlari, bipolyarlardan farqli o'laroq, haddan tashqari issiqlikka chidamli.

Takrorlash uchun savollar

1. Yarimo'tkazgichli diod nima sababdan tokni faqat bir lomonga o'tkazadi?

2. p-n o'tish nima?

3. Yarimo'tkazgich qarshiligi p-n o'tishga qanday bog'liq?

4. Tranzistorda to'g'ri va teskari p-n o'tishlar uning qaysi sohalarida bo'ladi?

5. p-n-p va n-p-n turdagi tranzistorlar nimasi bilan farqlanadi?

6. Yarimo'tkazgichlarda musbat ion bilan kovak orasida farq bormi?

7. Nima sababdan tashqi sharoitlar o'zgarmagani holda elektronkovak jufti to'xtovsiz hosil bo'lib tursada, yarimo'tkazgichda erkin zaryad tashuvchilar soni o'zgarmaydi?

8. Germaniyga fosfor, rux, kaliy kiritilsa, qanday turdagi o'tkazuvchanlik hosil bo'ladi?

9. Nima sababdan bir xil kuchlanishda to'g'ri p-n o'tishdagi tok, teskari o'tishdagi tokka nisbatan ancha katta bo'ladi?

16-§. YARIMO'TKAZGICH INTEGRAL SXEMALARNI TAYYORLASH.

Integral mikrosxemalar elektr asboblarning sifat darajasidagi yangi turi bo'lib elektron qurilmalarning asosiy negiz elementi hisoblanadilar.

16.1. Integral mikrosxema (IMS)

Integral mikrosxema (IMS) elektr jihatdan o'zaro bog'langan elektr radiomateriallar (tranzistorlar, diodlar, rezistorlar, kondensatorlar va boshqalar) majmui bo'lib, yagona texnologik siklda bajariladi, ya'ni bir vatqning o'zida yagona konstruksiya (asos)da ma'lum axborotni qayta ishlash funksiyasini bajaradi.

IMSlarning asosiy xossasi shundaki, u murakkab funksiyalarni bajarish bilan birga kuchaytirgich, trigger, hisoblagich, xotira qurilmasi va boshqa funksiyalarni ham bajaradi. Xuddi shu funksiyalarni bajarish uchun diskret elementlarda mos keluvchi sxemani yig'ish talab qilinardi.

IMSlar uchun ikki asosiy belgi mavjud: konstruktiv va texnologik. Konstruktiv belgisi shundaki, IMSning barcha elementlari asosiy asos ichida yoki sirtida joylashadi, elektr jihatdan birlashtirilgan va yagona qobiqqa joylashtirilgan bo'lib, yagona hisoblanadi. IMS elementlarning hammasi yoki bir qismi va elementlararo bog'lanishlar yagona texnologik siklda bajariladi. SHu sababli integral mikrosxemalar yuqori ishonchlilikka va kichik tannarxga ega.

Hozirgi kunda yasaliş turi va hosil bo'ladigan tuzilmaga ko'ra IMSlarning uchta prinsipial turi mavjud: yarim o'tkazgichli, pardali va gibrid. Har bir IMS turi konstruksiyasi, mikrosxema tarkibiga kiradigan element va komponentlar sonini ifodalovchi integratsiya darajasi bilan xarakterlanadi.

Element deb biror elektroradioelement (tranzistor, diod, rezistor, kondensator va boshqalar) funksiyasini amalga oshiruvchi IMS qismiga aytiladi va u kristall yoki asosdan ajralmagan konstruksiyada yasaladi.

IMS komponentasi deb uning diskret element funksiyasini bajardigan, lekin avvaliga mustaqil mahsulot kabi montaj qilinadigan qismiga aytiladi.

Asosiy IMS konstruktiv belgilaridan biri bo'lib asos turi hisoblanadi. Bu belgiga ko'ra IMSlar ikki turga bo'linadi: yarim o'tkazgichli va dielektrik.

Asos sifatida yarim o'tkazgichli materiallar orasida kremniy va galliy arsenidi keng qo'llaniladi. IMSning barcha elementlari yoki elementlarning bir qismi yarim o'tkazgichli monokristall plastina ko'rinishida asos ichida joylashadi.

Dielektrik asosli IMSlarda elementlar uning sirtida joylashadi. Yarim o'tkazgich asosli mikrosxemalarning asosiy afzalligi – elementlarning juda katta integratsiya darajasi hisoblanadi, lekin uning nominal parametrlari diapazoni juda cheklangan bo'lib ular bir – biridan izolyasiyalanishni talab qiladi. Dielektrik asosli mikrosxemalarning afzalligi – elementlarning juda yaxshi izolyasiyasi, ularning xossalari barqarorligi, hamda elementlar turi va elektr parametrlari tanlovining kengligi.

16.2. Pardali va gibrid mikrosxemalar.

Pardali IS – bu dielektrik asos sirtiga surtilgan elementlari parda ko'rinishida bajarilgan mikrosxema. Pardalar past bosimda turli materiallardan yuqqa pardalar ko'rinishida cho'kmalar hosil qilish yo'li bilan olinadi.

Parda hosil qilish usuli va unga bog'liq bo'lgan qalinligiga ko'ra **yuqqa pardali IS** (parda qalinligi 1 – 2 mkm gacha) va **qalin pardali IS** (parda qalinligi 10 – 20 mkm gacha va katta) larga bo'linadi.

Hozirgi kunda barqaror pardali diodlar va tranzistorlar mavjud emas, shu sababli pardali ISlar faqat passiv elementlar (rezistorlar, kondensatorlar va x.z.) dan tashkil topadi.

Gibrid IS (yoki GIS) – bu pardali passiv elementlar bilan diskret aktiv elementlar kombinatsiyasidan tashkil topgan, yagona dielektrik asosda joylashgan mikrosxema. Diskret komponentlarni osma elementlar deb atashadi. Qobiqsiz yoki mikrominiatyur metall qobiqli mikrosxemalar gibrid IMSlar uchun aktiv elementlar bo'lib hisoblanadilar.

Gibrid integral mikrosxemalarning asosiy afzalligi: nisbatan qisqa ishlab chiqish vaqtida analog va raqamli mikrosxemalarning keng turlarini yaratish imkoniyati; keng nomentkaluturaga ega bo'lgan

passiv elementlar hosil qilish imkoniyati; MDYA – asboblari, diodli va tranzistorli matritsalar va yuqori yaroqli mikrosxemalar chiqishi.

Yarim o'tkazgichli IMSlar. Tranzistorning ishlatilish turiga ko'ra yarim o'tkazgichli IMSlarni *bipolyar* va *MDYA IMS* larga ajratish qabul qilingan. Bundan tashqari, oxirgi vaqtlarda boshqariluvchi o'tishli maydoniy tranzistorlar yasalgan IMSlardan foydalanish katta ahamiyat kasb etmoqda. Bu sinfga galliy arsenidida yasalgan IMSlar, zatvori SHottki diodi ko'rinishida bajarilgan maydoniy tranzistorlar kiradi. Hozirgi kunda bir vaqtning o'zida ham bipolyar, ham maydoniy tranzistorlar qo'llanilgan IMSlar yaratish tendensiyasi belgilanmoqda.

Ikkala sinfga mansub yarim o'tkazgichli ISlar texnologiyasi yarim o'tkazgich kristallini galma – gal donor va akseptor kiritmalar bilan legirlash (kiritish)ga asoslangan. Natijada sirt ostida turli o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yupqa qatlamlar, ya'ni $n-p-n$ yoki $p-n-p$ tuzilmali tranzistorlar hosil bo'ladi. Bir tranzistorning o'lchamlari enigi bir necha mikrometrlarni tashkil etadi. Alohida elementlarning izolyasiyasi yoki $p-n$ o'tish yordamida, yoki dielektrik parda yordamida amalga oshirilishi mumkin. Tranzistorli tuzilma faqat tranzistorlarni emas, balki boshqa elementlar (diodlar, rezistorlar, kondensatorlar) yasashda ham qo'llaniladi.

Mikroelektronikada bipolyar tranzistorlardan tashqari ko'p emitterli va ko'p kollektorli tranzistorlar ham qo'llaniladi.

Ko'p emitterli tranzistorlar (KET) umumiy baza qatlami bilan birlashtirilgan bir kollektor va bir necha (8-10 gacha va ko'p) emitterdan tashkil topgan. Ular tranzistor – tranzistorli mantiq (TTM) sxemalarni yaratishda qo'llaniladi.

Ko'p kollektorli tranzistor tuzilmasi ham, KET tuzilmasiga o'xshash bo'ladi, lekin integral – injeksion mantiq (I^2M) deb ataluvchi injeksion manbali mantiqiy sxemalar yasashda qo'llaniladi.

Diodlar. Diodlar bitta $p-n$ o'tishga ega. Lekin bipolyar tranzistorli IMSlarda asosiy tuzilma sifatida tranzistor tanlangan, shuning uchun diodlar tranzistorning diod ulanishi yordamida hosil qilinadi. Bunday ulanishlarning beshta varianti mavjud. Agar diod yasash uchun emitter – baza o'tishdagi $p-n$ o'tish qo'llanilsa, u holda kollektor – baza o'tishdagi $p-n$ o'tish uziq bo'lishi kerak.

Rezistorlar. Bipolyar tranzistorli IMSlarda rezistor hosil qilish uchun bipolyar tranzistor tuzilmasining biror sohasi: emitter, kollektor yoki baza qo'llaniladi. Emitter sohalari asosida kichik qarshilikka ega

bo'lgan rezistorlar hosil qilinadi. Baza qatlami asosida bajarilgan rezistorlarda ancha katta qarshiliklar olinadi.

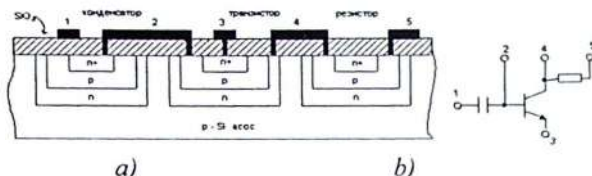
16.3. Kondensatorlar.

Bipolyar tranzistorli IMSlarda teskari yo'nalishda siljigan $r-n$ o'tishlar asosida yasalgan kondensatorlar qo'llaniladi. Kondensatorlarning shakllanishi yagona texnologik siklda tranzistor va rezistorlar tayyorlash bilan bir vaqtning o'zida amalga oshiriladi. Demak ularni yasash uchun qo'shimcha texnologik amallar talab qilinmaydi.

MDYA – tranzistorlar. IMSlarda asosan zatvori izolyasiyalangan va kanali induksiyaalangan MDYA–tranzistorlar qo'llaniladi. Tranzistor kanallari r - va n - turli bo'lishi mumkin. MDYA–tranzistorlar faqat tranzistorlar sifatida emas, balki kondensatorlar va rezistorlar sifatida ham qo'llaniladi, ya'ni barcha sxema funksiyalari birgina MDYA – tuzilmalarda amalga oshiriladi. Agar dielektrik sifatida SiO_2 qo'llanilsa, u holda bu tranzistorlar MOYA–tranzistorlar deb ataladi. MDYA – tuzilmalarni yaratishda elementlarni bir – biridan izolyasiya qilish operatsiyasi mavjud emas, chunki qo'shni tranzistorlarning istok va stok sohalari bir–biriga yo'nalgan tomonda ulangan $p-n$ o'tishlar bilan izolyasiyalangan. SHu sababli MDYA–tranzistorlar bir–biriga juda yaqin joylashishi mumkin, demak katta zichlikni ta'minlaydi.

Bipolyar va MDYA IMSlar *planar* yoki *planar – epitaksial* texnologiyada yasaladi. Planar texnologiyada $n-p-n$ tranzistor tuzilmasini yasashda p -turdagi yarim o'tkazgichli plastinaning alohida sohalariga teshiklari mavjud bo'lgan maxsus maskalar orqali mahalliy legirlash amalga oshiriladi. Maskalarolnini plastina sirtini egallovchi kremniy ikki oksidi SiO_2 o'ynaydi. Bu pardada maxsus usullar (fotolitografiya) yordamida darcha deb ataluvchi teshiklar shakllanadi. Kiritmalar yoki diffuziya (yuqori temperaturada ularning konsentratsiya gradienti ta'sirida kiritma atomlarini yarim o'tkazgichli asosga kiritish), yoki ionli legirlash yordamida amalga oshiriladi. Ionli legirlashda maxsus manbalardan olingan kiritma ionlari tezlashadi va elektr maydonda fokuslanadilar, asosga tushadilar va yarim o'tkazgichning sirt qatlamiga singadilar.

Planar texnologiyada yasalgan yarim o'tkazgichli bipolyar tuzilmali IMS namunasi va uning ekvivalent elektr sxemasi 56 a, b – rasmda keltirilgan.



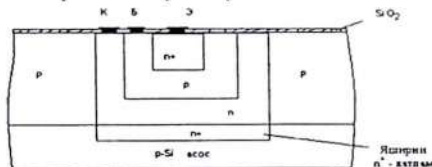
56-rasm. IMS namunasi va uning ekvivalent elektr sxemasi

Diametri 76 mmli yagona asosda bir varakayiga usulda bir vaqtning o'zida har biri 10 tadan 2000 ta element (tranzistorlar, rezistorlar, kondensatorlar)dan tashkil topgan 5000 mikrosxema yaratish mumkin. Diametri 120 mm bo'lgan plastinada o'nlab milliontagacha element joylashtirish mumkin.

Zamonaviy IMSlar qotishmali planar – epitaksial texnologiyada yasaladi. Bu texnologiya planar texnologiyadan shunisi bilan farq qiladiki, barcha elementlar p -turdagi asosda o'stirilgan n -turdagi kremniy qatlamida hosil qilinadi. Epitaksiya deb kristall tuzilmasi asosnikidan bo'lgan qatlam o'stirishga aytiladi.

Planar – epitaksial texnologiyada yasalgan tranzistorlar ancha tejamli, hamda planarliga nisbatan yaxshilangan parametr va xarakteristikalarga ega.

Buning uchun asosga epitaksiyadan avval n^+ - qatlam kiritiladi. Bu holda tranzistor orqali tok kollektordagi yuqoriomli rezitordan emas, balki kichikomli n^+ - qatlam orqali oqib o'tadi.



57-rasm. Raqamli sxemalar asosida sodda tranzistorli kalit (ventil) sxema.

Mikrosxema turli elementlarini elektr jihatdan birlashtirish uchun metallizatsiyalash qo'llaniladi. Metallizatsiyalash jarayonida oltin, kumush, xrom yoki alyuminiydan yupqa metall pardalar hosil qilinadi. Kremniyli IMSlarda metallizatsiyalash uchun alyuminiydan keng foydalaniladi.

Sxemotexnik belgilariga ko'ra mikrosxemalar ikki sinfga bo'linadi. IMS bajarayotgan asosiy vazifa – elektr signali (tok yoki kuchlanish) ni ko'rinishida berilayotgan axborotni qayta ishlash hisoblanadi. Elektr signallari uzluksiz (analog) yoki diskret (raqamli) shaklda ifodalanishi mumkin.

SHu sababli, analog signallarni qayta ishlaydigan mikrosxemalar – analog integral mikrosxemalar (AIS), raqamli signallarni qayta ishlaydiganlari esa – raqamli integral sxemalar (RIS) deb ataladi.

Raqamli sxemalar asosida sodda tranzistorli kalit (ventil) sxemalar yotadi. Kalitlar ikkita turg'un holatni egallashi mumkin: uzilgan va ulangan. Sodda kalitlar asosida ancha murakkab sxemalar yasaladi: mantiqiy, bibarqaror, triggerli (ishga tushuruvchi), shifratoli, komporatorlar va boshqa, asosan hisoblash texnikasida qo'llaniladigan. Ular raqamli shaklda ifodilangan axborotni qabul qilish, saqlash, qayta ishlash va uzatish fuqsiyasini bajaradilar.

Integral mikrosxemalarning murakkablik darajasi komponent integratsiya darajasi kattaligi bilan ifodalanadi. Bu kattalik raqamli IMSlar uchun kristallda joylashishi mumkin bo'lgan mantiqiy ventillar soni bilan belgilanadi.

100 ta dan kam ventilga ega bo'lgan IMSlar kichik integratsiya darajasiga ega bo'lgan IMSlarga kiradi. O'rta darajali ISlar 10^2 , katta ISlar $10^2 \div 10^5$, o'ta katta ISlar $10^5 \div 10^7$ va ultra katta ISlar 10^7 darajadan ortiq ventillardan tashkil topadi. Bunday sinflanish tizimi analog mikrosxemalar uchun ham qabul qilingan.

Takrorlash uchun savollar

1. Mantiqiy IMS parametrlari Axborotni kodlash usuliga ko'ra mantiqiy elementlar potensial va impuls?
2. Bipolyar tranzistorlarda yasalgan kalit sxemalar?
3. Maydoniy tranzistorlarda bajarilgan kalit sxemalar?
4. Bir turdagi MDYa – tranzistorlarda bajarilgan kalit sxemalar?
5. MDYa – tranzistorlarda bajarilgan kalit sxemalar?
6. Mantiqiy integral sxemalar negiz elementlari
7. Tranzistor – tranzistorli mantiq elementlari (TTM)?
8. Emitterlari bog'langan mantiq elementi (EBM).

17-§. GERMANIY EPITAKSIYASI.

Hozirgi paytda katta va o'ta katta integral sxemalar olishda metall bazali tranzistorlarning yangi turlarini yaratish alohida ahamiyatga ega. Ammo kub panjarali va parametri kremniynikiga yaqin bo'lgan metall plyonkalarni amalda hosil qilish mumkin emas. Shuning uchun ham xususiyatlari metallnikiga yaqin bo'lgan silisidlarni (kremniyning biron bir metall bilan birikmasini) ishlatish maqsadga muvofiqdir. Bunday silisidlar ikkita: NiSi_2 va CoSi_2 .

Ammo CoSi_2 panjara doimiysi kremniynikiga juda yaqin bo'lgani uchun metall bazali tranzistorlarda uni ishlatish qulayroq bo'ladi. Shunday qilib, metall bazali tranzistorlarda Si - CoSi_2 - Si tizimi ishlatilishi mumkin. Si va CoSi_2 larning fizik parametrlari va kristallografik parametrlari 3 - jadvalda keltirilgan.

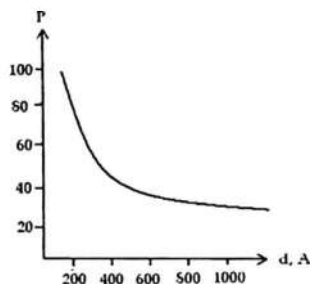
CoSi_2 ni MNE va QFE usullari bilan olishni yuqoridagi paragraflarda ko'rib chiqqanmiz.

CoSi_2 plyonkasining fizik xususiyatlari plyonkaning qalinligiga kichik qalinliklarda bog'liq bo'ladi, chunki kichik qalinliklarda plyonkaning xususiyatlariga asosning ta'siri katta bo'ladi. Masalan, (58 – rasm) da solishtirma qarshilikning plyonka qalinligiga bog'liqligi keltirilgan

3-jadval

Si va CoSi_2 uchun kristall panjara parametrlari

Kristall, plyonka	Panjara turi	Panjara doimiysi	ρ , mkOm·sm
CoSi_2	kubik	5,38	20-30
Si	kubik	5,43	$\geq 10^6$

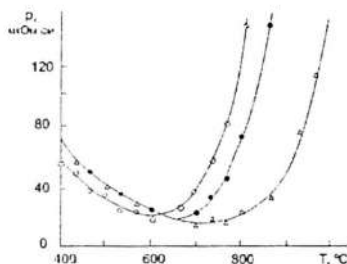


58 – rasm: CoSi_2/Si tizimi uchun solishtirma qarshilikning plyonka qalinligiga bog'liqligi.

Demak, plyonka qalinligi 400-500 Å dan katta bo'lganda unga asosning ta'siri deyarli sezilmaydi. Plyonka mukammalligi (bir jinsliligi, silliqiligi, kristall panjarada nuqsonlarning kamligi) o'stirish haroratiga juda xam bog'liq bo'ladi. (59-rasm) da solishtirma qarshilikning haroratga bog'liqlik grafigi keltirilgan.

Ilmiy tadqiqotlarning ko'rsatishicha, solishtirma qarshilik eng kichik bo'lganida plyonka epitaksial va eng mukammal bular ekan.

300-350°C gacha hosil qilingan plyonka amorf bo'ladi; 450-500°C da polikristall bo'ladi; 500-600°C oraligida monokristall bo'ladi-yu, ammo orientatsiyasi bir xil bulmaydi (tekstura) va unda har xil nuqsonlar ko'p bo'ladi; 600-700°C da plyonka monokristall va nuqsonlari eng kam holda bo'ladi; 700-750°C dan keyin asosdan kremniy atomlari plyonka tarkibiga kirib boradi va stexiometrik tartib



59 – rasm: MNE usuli bilan o'stirilgan $\text{CoSi}_2/\text{Si}<100>$ plyonkasi solishtirma qarshiligining haroratga bog'liqligi.

buziladi, bu esa qarshilikning ortishiga olib keladi; 800-900°C va undan katta haroratlarda plyonkalar orolcha-orolcha bo'lib ajralib ketadi; keyingi qizdirishlar CoSi_2 ning parchalanib ketishini va yuzadan C_6 hamda Si atomlar holida uchib chiqishini vujudga keltiradi.

Takrorlash uchun savollar

1. Germaniy epitaksiyasi nima?
2. 300-350°C gacha hosil qilingan plyonka qanaqa xususiyatga ega bo'ladi?
3. Si va CoSi_2 uchun kristall panjara parametrlarini qanday yo'l orqali aniqlash mumkin?
4. 600-700°C da olingan plyonkaning xususiyatlarini keltiring?

18-§. EPITAKSIYA USULI.

Biror monokristallning yuza qismida plyonkalar hosil qilganimizda ma'lum bir optimal haroratgacha qizdirmaguncha plyonkaning chuqurlik buyicha tarkibi har xil bo'ladi. Masalan, QFE usuli bilan CoSi_2 plyonkasini hosil qilish uchun Si ning yuzasiga Co o'tkaziladi. Ammo, xona haroratidayoq diffuziya hisobiga plyonkada ham, asosning yuza va yuza osti qismlarida ham elementar hamda kimyoviy tarkib har xil bo'lishi mumkin.

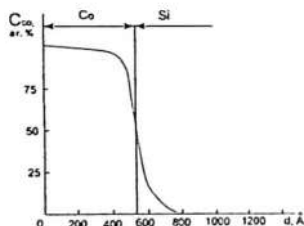
18.1. EPITAKSIAL QATLAMLARNING PROFIL BO'YICHA KIMYOVIY TARKIBI.

(60-rasm) dan ko'rinadiki, ideal holda 500 Å gacha faqat C_0 bo'lib, keyin uning konsentrasiyasi tezda 0 ga teng bulishi kerak. Real holda esa plyonkadagi C_0 atomlari o'rnining bir qismini Si atomlari egalaydi, asosning bir qismini esa C_0 atomlari egallaydi. Bunda atomlar aralashib ketgan qismda kimyoviy tarkib ham har xil bulishi mumkin. Masalan, Co_3Si , Co_2Si , CoSi , CoSi_2 , CoSi_3 , .

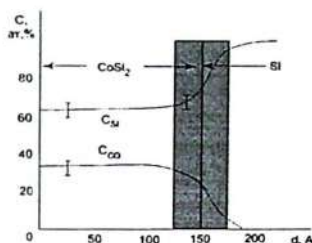
Qizdirilgan holda esa, kimyoviy birikmalarning hosil bulishi ko'payadi. Faraz qilaylik, ma'lum haroratda epitaksial plyonka hosil bulsin. Masalan, CoSi_2 uchun epitaksial plyonka hosil qilish uchun optimal harorat 650°C bo'ladi.

61-rasmdan ko'rinadiki, eng idealga yaqin holatda kimyoviy tarkib uch qismdan iborat bo'ladi:

- ma'lum bir qalinlikdagi mukammal epitaksial plyonka,
- o'tish qatlami (u ham epitaksial, ammo tarkibi o'zgarib boradi),
- asos, ya'ni Si.



60– rasm: Xona harorati sharoiti uchun Co/Si chegaraviy qatlami Co atomlari konsentrasiyasining chuqurlik (profil) bo'yicha o'zgarishi



61 – rasm: $\text{CoSi}_2/\text{Si}<100>$ uchun S_{Co} va S_{Si} konsentrasiyalarning profil' (chuqurlik) bo'yicha joylashishi

Plyonkalarining kimyoviy va elementar tarkibini chuqurlik buyicha aniqlash uchun ko'p hollarda Oje-elektronlarning spektroskopiyasi (OES) usuli yuzalarni ionlar bilan yedirish usuli bilan birga ishlatiladi.

Bu usulda ionlar bilan yuza ediriladi, buning uchun qancha vaqtda qancha edirish oldindan kalibrovka qilinadi, edirilgan joyga elektron dastasi tushirilib, OES usuli yordamida elementar va kimyoviy tarkib aniqlanadi. Bu holda to'g'ri axborot olish uchun edirilgan yuzaning kattaligi elektron dastasining diametridan kamida 5 - 6 marta katta bo'lishi kerak.

Takrorlash uchun savollar

1. Qanday epitaksiya usullarni bilasiz?
2. Epitaksial qatlamlarning profil bo'yicha kimyoviy tarkibini ayting?
3. Eng idealga yaqin holatda kimyoviy tarkib necha qismdan iborat bo'ladi?
4. Plyonkalarining kimyoviy va elementar tarkibini qanday mikroskoplarda aniqlash mumkin?

19-§. BUG‘LATGICHLAR. OMIK KONTAKTLAR UCHUN ERITMALAR. GERMANIY BILAN KONTAKT HOSIL QILUVCHI QOTISHMALAR.

Ommik kontaktlarning asosiy xususiyatlari va tok oqimining mexanizmlari. Qurilmaning faol maydonini integral mikrosxemaning boshqa elementlari yoki tarkibiy qismlari bilan yoki qurilmaning diskret versiyasi holatida uning korpusining tashqi terminallari bilan ulash uchun ohmik aloqa ishlatiladi. Odatda, ohmik kontakt Me-i 'yoki Me - // tuzilishga ega.

Ma'lumki, metall va yarimo'tkazgich o'rtasidagi potentsial to'siq tunnel-shaffof bo'lmasa yoki potentsial to'siq bo'lmasa yoki elektronlar uchun shaffof bo'lsa, metall-yarim o'tkazgich aloqasi rektifikatsiya (to'siq) bo'lishi mumkin. Ohmik aloqa odatda quyidagi holatlarda hosil bo'ladi: [14]:

- metall va yarimo'tkazgich o'rtasida potentsial to'siq yo'q, ya'ni tarmoqli bo'shliqda sirt holati zichligi past bo'lgan n-tipli yarimo'tkazgich uchun metaldan elektronlarning ishlash funktsiyasiga ega bo'lgan metall tanlanadi. yarimo'tkazgich elektroniga yaqinlikdan (birinchi turdagi aloqa);

- potentsial to'siq mavjud, ammo u tor (tunnel-shaffof), bunga odatda yarimo'tkazgichning sirtga yaqin mintaqasini og'ir doping yordamida erishiladi (ikkinchi turdagi aloqa);

- potentsial to'siq mavjud, ammo tashuvchilarning termion emissiyasi tufayli u past va osonlikcha engib chiqadi, bu odatda yarimo'tkazgichning kimyoviy tarkibini kontaktga yaqin joyda, masalan, kontaktga yaqin bo'lgan tor qavat hosil qilish orqali amalga oshiriladi. (uchinchi turdagi aloqa).

Ohmik kontaktlar quyosh batareyalari dizaynining muhim tarkibiy qismidir. Quyosh batareyasidagi kontaktlarning qarshiligidagi ruxsat etilgan quvvat yo'qotishlari odatda chiqish quvvati $\sim 1\%$ ni tashkil etadi, bu esa kontaktlarning zanglashiga olib keladigan kuchlanishining 6 mV ga teng bo'lishiga to'g'ri keladi. Element bitta yoritish sharoitida ishlaganda ($C = 1$), bunday yo'qotishlar qattiq orqa kontakt p ($p = 0,2$ Ohm-sm² va oldingi mash kontakt pc. = 0,01 Ohm-sm.) Qarshilik bilan mumkin. "elementlarning samaradorligi, birinchi taxminiy ko'rsatkichdagi PC qiymatlari radiatsiya kontsentratsiyasi koeffitsientiga teskari proporsionaldir va shuning uchun yuqori nurlanishda ishlatiladigan

quyosh batareyalari uchun kontaktlarni ishlab chiqarish texnologiyasiga yuqori talablar qo'yiladi.

Omik kontakt quyidagi talablarga javob berishi kerak:

- bunday kontaktning qarshiligi juda past bo'lishi kerak ($L \rightarrow 0$); amalda, yarimo'tkazgichning hajm qarshiligiga nisbatan ahamiyatsiz bo'lishi mumkin;

- kontaktni AOK qilmaslik kerak, chunki kontaktni quyish paytida oqim kuchayadi;

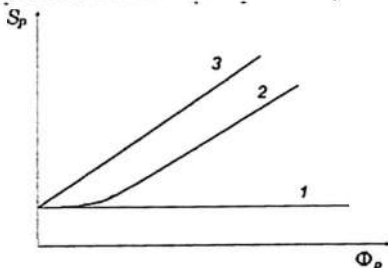
- Kontaktning I - V xarakteristikasi chiziqli bo'lishi kerak.

Keling, omik kontaktlarning asosiy parametrlarini ko'rib chiqaylik. Kontaktida rekombinatsiya darajasi

$$S_p = \frac{\Phi_3}{(p_{rp} - p_0)} = \frac{pV_p}{(p_{rp} - p_0)} \quad (19.1)$$

bu erda F7, - kontakt orqali zaryad tashuvchilar oqimining zichligi; (y ; $\varphi - p_0$) - kontaktdagi zaryad tashuvchilarning ortiqcha konsentratsiyasi; p_{rp} - aloqa chegarasi yaqinidagi tashuvchilarning konsentratsiyasi; U_r - aloqa chegarasi yaqinida tashuvchi oqim tezligi.

Katta F da 8R tezligi aloqa vositasi orqali tashuvchining harakatlanish tezligi bilan aniqlanadi. Harakatning maksimal tezligi issiqlik darajasidan oshib ketishi mumkin emas (62-rasm).



62-rasm. Kontaktida zaryad tashuvchilarning rekombinatsiya tezligining aloqa orqali zaryad tashuvchilar oqimining zichligiga bog'liqligi:

1 - cheksiz yuqori rekombinatsiya tezligi bilan ideal aloqa;

2 - tezlik bilan haqiqiy aloqa 5) zaryad tashuvchilarning maksimal harakat tezligiga teng; 3 - Br tezligi bilan haqiqiy aloqa, tashuvchilarning harakatining maksimal tezligidan kam.

Omik kontaktga qarshilik: $p_k = \frac{U}{j}$

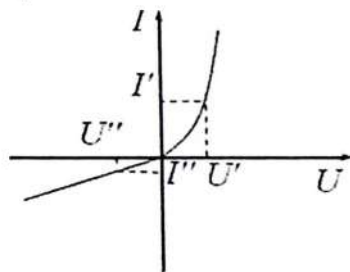
statik, $p_k^d = \left(\frac{\partial I}{\partial U}\right)^{-1} \int_{u=0}$ bu erda y - joriy zichlik;

Lineer bo'lmagan parametrlar: $k = \frac{I'}{I''}$

- rektifikatsiya koeffitsienti, 1 ga qanchalik yaqin bo'lsa, shuncha yaxshi bo'ladi aloqa sifati;

$$\beta = \frac{p_k}{p_k^d} \quad (19.2)$$

- noxizilik koeffitsienti, p 1 ga qanchalik yaqin bo'lsa, ham yaxshiroq ohmik aloqa.



63-rasm. Omik kontaktning xarakteristikasi
VAX

Omik kontaktning asosiy xarakteristikasi - bu uning aloqa maydoni birligiga kamaytirilgan qarshiligi (63-rasm). Kontakt qarshiligi ketma-ket bog'liq bo'lgan qarshilik va aloqa maydoni va potentsial to'siqdan elektronlarning o'tishi bilan bog'liq bo'lgan qarshilikdan iborat.

Aloqa maydonining qarshiligi og'ir doping qilingan maydonning qarshiligi va o'tishning qarshiligi? "-" - dir.

Og'ir dopingli mintaqaning qarshiligi odatda juda past. Masalan, qalinligi 1 mkm va elektronning harakatchanligi taxminan $10^3 \text{ sm}^2 / (\text{Vs})$ bo'lgan "-" CaAz qatlamining (" $= 10^{19} \text{ sm}^3$ ") qarshiligi taxminan $6 - \text{KG}^4 \text{ Ohm/sm}^2$.

Pn ning qarshiligi (xususan, "-" - o'tish) elektronlarning konsentratsiyasiga teskari proporsionaldir.

Muayyan kontakt qarshiligi nisbati bo'yicha nol kuchlanish kuchlanishida aniqlanadi.

Past kuchlanish pasayganda (20 mV dan kam)

pH1 - bu ishlayotgan quyosh batareyasining kontaktga chidamliligi uchun yaxshi taxmin. Odatda, yarimo'tkazgichda zaryad tashuvchilar kontsentratsiyasining oshishi bilan pc0 keskin pasayadi va harorat pasayganda ortadi.

Nazariy hisoblash uchun bir necha usullar mavjud (ammo, amalda, kompyuterga interfeysdagi qatlamlar (masalan, tabiiy oksidlar), sirtning shikastlanishi, ozchilik zaryad tashuvchilarni quyilishi va chuqur kirishma darajalari sezilarli darajada ta'sir qilishi mumkin. ushbu omillarni hisobga olishning murakkabligi nazariy va eksperimental ma'lumotlarni taqqoslashni qiyinlashtiradi va shuning uchun ommik kontaktlarga oid tadqiqotlarning asosiy qismi asosan past empedansli kontaktlarni olishga imkon beradigan texnologik usullarni o'rganishga qaratilgan.

Yarimo'tkazgich - metall aloqa interfeysida potentsial Shotti to'sig'i hosil bo'lganligi sababli, zaryad oqimining asosiy mexanizmlari termion maydonni chiqarish va to'g'ridan-to'g'ri tunnel qilish bo'ladi. Bunday samarali kontakti yaratishning odatiy usuli bu metallga tutash bo'lgan ingichka yarimo'tkazgich qatlamining og'ir dopingidir, bu esa to'siq qalinligini 10 nm gacha kamaytiradi. Ushbu yupqa, og'ir dopingli mintaqa hosil bo'lganda, kompensatsiyalovchi aralashmalar kiritilishiga yoki zaryad tashuvchilar kontsentratsiyasini kamaytirishi mumkin bo'lgan nuqsonlarning paydo bo'lishiga yo'l qo'y-maslik kerak. Shunday qilib, kontaktlarning xususiyatlari sezilarli darajada ularni ishlab chiqarish usullarining xususiyatlariga bog'liq bo'lishi mumkin.

$$p_{co} = \left(\frac{dU}{dJ} \right) \int_{U=0}$$

A4 va A'B 'guruhlarining yarim o'tkazgichlari (nitridlar va /? - InAz bundan mustasno) odatda tarmoqli bo'shliq chuqurligida joylashgan sirt holatlarining yuqori kontsentratsiyasiga ega, bu esa Fermi sathining sirt ustida qattiq pimplanishiga olib keladi. Shuning uchun, ohmik kontakti yaratish uchun ularga ikki yo'l bilan kirish mumkin:

1) sirt holatining zichligini kamaytirish, masalan, oltingugurt o'z ichiga olgan eritmalar bilan ishlov berish,

2) ikkinchi yoki uchinchi turdagi kontaktlardan foydalaning.

Yarimo'tkazgichli dasturlarning aksariyati ingichka potentsial to'siq orqali tashuvchi tunnelni ishlatadi.

Oqim oqimining tunnel mexanizmi bilan bunday aloqalar ikki sinfga bo'linadi:

1) ilgari n4 yoki p4 tipdagi o'tkazuvchanlik mintaqalari bilan ohmik aloqa hosil qiluvchi metall qatlam asosida passiv;

2) faol, unda metall (yoki qotishma tarkibiy qismlaridan biri) yarim o'tkazgich yuzasida yotgandan so'ng, uning ichiga chuqur tarqaladi yoki yarimo'tkazgich materiallari bilan birlashib, / r - yoki p-tipdagi hududlarni hosil qiladi.

Takrorlash uchun savollar

1. Kristall va amorf qattiq jismlar?
2. Olmos va sfalerit tuzilmalari?
3. Metallar. Yarimotkazgichlar. Dielektriklar?
4. Kristall yarimolkazgichlarda nuqsonlar?
5. Omik kontaktlar uchun eritmalar qanday yo'l orqali tayyorlanadi?

20-§. GETEROO'TISHLAR VA ULARNING XOSSALARINI O'RGANISH.

Geterotransstsiyalar izotipik va anizotipikdir. Agar heterojunktura bir xil turdagi o'tkazuvchanlikdagi ikkita yarimo'tkazgichlardan (p-p yoki n-n birikma) hosil qilingan bo'lsa, unda bunday heterojunksiya izotipik deyiladi. Anizotipik Geterootishlar har xil turdagi o'tkazuvchanlikdagi yarimo'tkazgichlar (p-n-birikma yoki n-p-birikma) dan hosil bo'ladi¹². Birinchi o'rinda tor o'tkazgichli bo'shliqli yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanlik turini bildiruvchi xat.

Geterotransstsiya uch xil bo'lishi mumkin:

- ideal;
- noideal;
- oraliq qatlam bilan.

Ideal heterojunksiyada, g'ayrioddiydan farqli o'laroq, materiallar orasidagi interfeysda elektronlar uchun mahalliy energiya holati mavjud emas. Oraliq qatlamli heterojunksiya cheklangan qalinlikdagi qo'shimcha qatlam bilan ajratiladi va mahalliy energiya holatlari oraliq qatlamning o'zida ham, uning interfeyslarida ham bo'lishi mumkin.

Geterojunksiyani tashkil etuvchi yarimo'tkazgichlarning kristall panjarali parametrlari yaqin bo'lishi kerak, bu esa material tanlashni cheklaydi. Geterojunksiyani tashkil etuvchi ikkita yarimo'tkazgichning kristall panjarasida nuqsonlar bo'lmasligi uchun, hech bo'lmaganda, ikkita material bir xil turdagi kristall panjaraga, yaqin kristalli panjara davrlariga va bir xil harorat kengayish koeffitsientiga ega bo'lishi shart. Bunday holda, geterojunksiyada mexanik kuchlanishlar hosil bo'lmaydi. Geteroo'tishlarda eng ko'p ishlatiladigan yarimo'tkazgichlarning ba'zi parametrlari 4 -jadvalda keltirilgan.

Hozirgi vaqtda yarimo'tkazgichlar eng ko'p o'rganilgan: germaniy-galyum arsenidi (Ge-GaAs), gallium arsenidi-indiy arsenidi (GaAs-InAs), germaniy-kremniy (Ge-Si). Heterojunksiya yaratish uchun eng yaxshi juftlardan biri bu GaAs-AlGaAs.

¹² Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. /Сост. П. А. Шильев, Д. А. Павлов. — Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. — 18 с.

Jadval. 4. Geterojunksiyalar yaratish uchun ishlatiladigan yarimo'tkazgichli materiallarning parametrlari

Parametrlari	Si	Ge	GaAs	AlAs	InAs	GaP	InP	GaSb	AlSb	InSb
a, nm	0.5431	0.5658	0.5653	0.5660	0.6058	0.5451	0.5869	0.6096	0.6136	0.6479
$\hbar\omega_{LO}$, мэВ	64	37	36	50	30	51	43	29	42	24
$E_g^{(300K)}$ эВ	1.12	0.66	1.42	2.15	0.35	2.27	1.34	0.75	1.62	0.18
ϵ	11.9	16.2	13.2	10.1	15.1	11.1	12.6	15.7	12.0	16.8
μ_n , м ² /В·с	0.15	0.39	0.92		3.3	0.02	0.5	0.77	0.02	8
μ_p , м ² /В·с	0.045	0.19	0.04		0.05	0.012	0.01	0.1	0.04	0.13

Har xil yarimo'tkazgichli materiallar har xil tasmalar kengligiga ega bo'lganligi sababli, heterojunksion mintaqada energiya bo'shlig'ining uzilishi sodir bo'ladi¹³. Heterojunksiyada energiya diapazonining uzilishlari ijobiy yoki salbiy bo'lishi mumkin. Energiya diapazonlarining uzilishiga qarab, har xil turdagi heterojunktatsiyalar hosil bo'ladi:

1) qamrab oluvchi o'tish. Bu ΔE_c o'tkazuvchanlik bandidagi bo'shliq va ΔE_v valentlik diapazonidagi bo'shliq musbat bo'lganda paydo bo'ladi. O'rnatilgan heterojunksiya hosil bo'ladi, masalan, GaAs-AlGaAs yarimo'tkazgich juftini tanlashda. Odatda, bu turdagi heterojunksiya standart heterojunksiya yoki I tipli birikma deb ataladi.

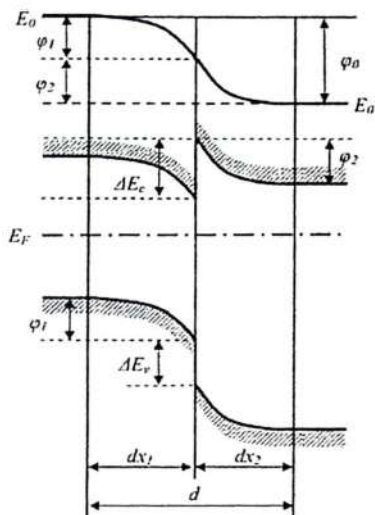
2) qadam o'tish. Bu zonaning uzilishlaridan biri ijobiy, ikkinchisi salbiy bo'lsa sodir bo'ladi. Ushbu turdagi heterojunksiya odatda II turdagi birikma deb ataladi. InP-In_{0.52}Al_{0.48}A heterojunksiyasida qadam o'tish hosil bo'ladi.

3) uzluksiz heterojunksiya. Bunday o'tish qo'shni yarimo'tkazgichli materiallarning energiya bo'shlig'i umuman bir-biriga to'g'ri kelmasa sodir bo'ladi. Uzluksiz birikma III tipli heterojunksiya deb ham ataladi. Bunday o'tishning klassik namunasi InAs-GaSb heterojunksiyasidir¹⁴.

p-n geterojunksiyaning muvozanat holatidagi energiya diagrammasiga misol 1-rasmda ko'rsatilgan.

¹³ Савиных В. Л. Физические основы электроники. Учебное пособие. — Новосибирск: СибГУТИ, 2003. — 77 с.

¹⁴ Глазачев А. В. Петрович В. П. Физические основы электроники. Конспект лекций — Томск: Томский политехнический университет, 2015. — 224 с.



64-rasm. p-n heterojunksiyaning muvozanat holatidagi soddalashtirilgan energiya diagrammasi

Geteroo'tishni tashkil etuvchi yarimo'tkazgichlarning har biri har xil turdagi elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi mumkin. Shuning uchun, har bir yarimo'tkazgich jufti uchun, asosan, to'rt xil turdagi heterostrukturani amalga oshirish mumkin: $p_1 - n_2$; $n_1 - n_2$; $n_1 - p_2$ va $p_1 - p_2$.

GeSi, InGaAs, AlGaAs yoki InAlAs kabi yarimo'tkazgichli birikmalarning qattiq eritmalarini qiziqarli xususiyatga ega. Yarimo'tkazgichlarning boshlang'ich foizini (AlAs va GaAs) yoki (InAlAs va InAlAs) foizini o'zgartirib, heterojunksiyaning energiya diagrammasida, masalan, tarmoqli oralig'ini, kristall panjarali pog'onani yoki ΔE_c cho'qqisining balandligini sozlash mumkin¹⁵.

Geteroo'tishlar har xil yarimo'tkazgichli qurilmalarda qo'llaniladi. Masalan, energiya o'tish sxemasida tepalik bilan hosil qilingan

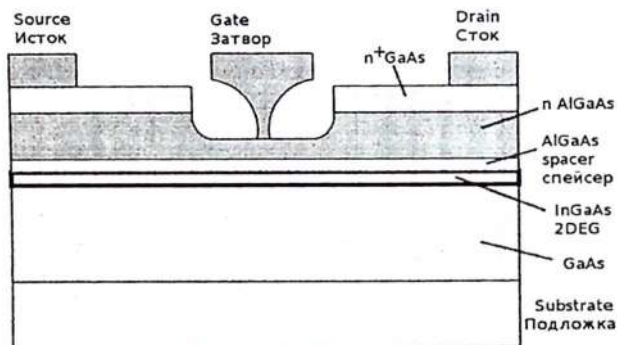
¹⁵ Электронные приборы на основе полупроводниковых соединений: Учебно-методическое пособие. /Б. С. Колосницын, С. В. Гранько. — Минск: БГУИР, 2017. — 94 с.

potentsial quduq samaradorlikni oshirishga imkon beradi. yarimo'tkazgichli lazer yoki LED kabi yorug'lik chiqaradigan elektron qurilmalar.

HBT bipolar tranzistorlar emitentida heterojunkturlardan foydalanish emitent pallasida teskari tokning oshishidan qo'rqmasdan, asosiy o'tkazuvchanlikni oshirishga imkon beradi. Shunday qilib, tranzistorning chastotali xususiyatlarini yaxshilash yoki an'anaviy tranzistor tuzilishiga qaraganda yuqori oqimlarga erishish mumkin¹⁶.

Geteroo'tishlar ikki o'lchovli elektron gazni hosil qilish imkonini beradi, bu esa elektron ta'sirini yoki bipolar tranzistorlarda elektronlarning harakatchanligini oshirish imkonini beradi. Bu sizga 600 gigagertsi chastotali tranzistorlarni yaratishga imkon beradi.

Bu holda, ikki o'lchovli gazda elektron harakatchanligini yaxshilash uchun yarimo'tkazgichlar orasiga tez-tez ajratuvchi qo'shiladi. Ajratuvchi sifatida tozalanmagan yarimo'tkazgichdan foydalanish mumkin. Dala effektli HEMT tranzistoridagi heterojunksiyaning o'xshash tuzilishi 2-rasmda ko'rsatilgan.



65-rasm. HEMT tranzistoridagi heterojunksiyaning tuzilishi

Bunday holda, heterojunksiyani amalga oshirishning ikkita varianti mumkin. Pseudomorfik yoki metamorfik heterojunksiya. Pseudomorfik heterojunksiyada ajratuvchi qalinligi shu qadar nozikki, u qo'shni yarimo'tkazgichli materialning kristall panjarasi parametrlariga

¹⁶ Гетеропереход. Материал из Википедии — свободной энциклопедии.
url:<https://ru.wikipedia.org/wiki/Гетеропереход>

cho'zilgan. Metamorfik heterojunksiyada ajratgichning kimyoviy tarkibi shunday tanlanganki, uning kristall panjarasi davri qo'shni yarim-o'tkazgichli materialning kristall panjarasi davriga to'g'ri keladi¹⁷.

Masalan, GaAs-InGaAs heterojunksiyasini yaratishda, ularning orasiga InAlAs ajratuvchi joylashtiriladi, uning kristall panjarasi galiy arsenidi GaAs va InGaAs qattiq eritmasiga mos keladigan tarzda tanlangan.

Geteroo'tishlar tushunchasi. Ikkita har xil moddalarning bir-biriga tutashuvi (kontaktga keltirilishi) ga geteroo'tishlar (GO') deyiladi. GO' har xil turlari mavjud bo'lib, jumladan;

1. Ikkita har xil yarim o'tkazgich asosidagi GO'. Misol, GaAs va Ge, GaP va Si, CdTe va CdS va boshqalar.

2. Metall va yarim o'tkazgich asosidagi GO' (SHotki bareri misolida). Misol, Au va Si, Ge va Ag va boshqalar.

3. Metall va yarim o'tkazgich orasidagi omik kontakt.

20.1. Geteroo'tishlarning energetik diagrammasi.

Geteroo'tishlarning fizik va elektrik xossalarini o'rganish va uni tahlil qilish ularning energetik diagrammalarini tuzish asosida olib boriladi. SHuning uchun qisqacha GaAs-Ge geteroo'tishining energetik diagrammasi misolida ko'rib o'tamiz. Faraz qilaylik, berilgan yarim o'tkazgichlarning hajmdagi xususiyatlari bo'linish chegarasigacha o'zgarmaydi va chegara qismida keskin bir materialdan boshqa material xususiyati boshqasiga o'zgaradi. GaAs va Ge materiali uchun man qilingan zonalar kengligi (E_g) 1,45 va 0,7 eV ga teng. (63-rasm).

Chiqish ishining kattaligi Fermi sathidan to vakuum sathigacha bajarilgan ish miqdoriga teng bo'lgani uchun va Fermi sathining kirishmalar konsentratsiyasiga bog'likligi sababli, uning o'rniga elektronga moyillikni olish maqsadga muvofiqdir, ya'ni o'tkazuvchanlik zonasi chegarasidan vakuum sathigacha bajarilishi kerak bo'lgan ish kirishmalar energiyasiga bog'lik emas. 5-jadvalda GaAs va Ge ni xarakterlaydigan energetik diagramma tuzish uchun kerak bo'ladigan parametrlar keltirilgan.

¹⁷ Транзистор с высокой подвижностью электронов. Материал из Википедии — свободной энциклопедии.

url:https://ru.wikipedia.org/wiki/Транзистор_с_высокой_подвижностью_электронов

5-jadval.

Parametrlar	GaAs	Ge
Elektronga moyillik, χ va man qilingan zona kengligi, E_g , (eV)	4,07 1,45	4,13 0,7
Kompensatsiya qilinmagan donorlar konsentratsiyasi, $N_d - N_a$, sm^{-3}	10^{16}	
Kompensatsiya qilinmagan akseptorlar konsentratsiyasi, $N_a - N_d$, sm^{-3}		$3 \cdot 10^{16}$
$E_c - E_g = \delta_{\text{GaAs}}$, eV	0,1	
$E_g - E_v = \delta_{\text{GaAs}}$, eV		0,14
Panjara doimiyligi, α , $\text{\AA}^\circ$	5,654	5,658
Nisbiy dielektrik kirituvchanlik, ϵ	11,5	16

Elektronning $E_{g'p}$ sathdagi energiyasi uning $E_{g'n}$ sathdagi energiyasidan kam, shuning uchun Fermi sathlari tenglashuvi uchun (materiallar kontaktga keltirilgan hol) bir qism elektronlar GaAs dan Ge ga o'tadi. Bunday harakat (kuchish) chegaraviy qismda arsenid galliida E_c sathining yuqoriga qayrilishiga olib keladi. YA'ni 63-rasmdagi V_{dn} va V_{dp} uzilishlar hosil bo'ladi. Fermi sathining siljishi

$$E_{g'p} - E_{g'n} = (\chi_{Ge} + E_{g(Ge)} - \delta_{Ge}) - (\chi_{GaAs} + \delta_{GaAs}) = V_{dn} + V_{dp} \quad (7)$$

va bu miqdor 0,52 eV ga teng bo'ladi. Gomoo'tishdagi kabi, chegara yaqinida χ_n va χ_p qalinliklarda zaryadga kambag'allashgan hududlar mavjud bo'lib, zaryad saqlanish qonuniga asosan

$$X_n \text{ va } \chi_p = N_a/N_d \quad (20.1)$$

saqlanishi kerak. Puasson tenglamasiga asosan

$$V_{Dn} = N_D \chi_n^2 / 2\epsilon_{\text{GaAs}} \text{ va } V_{Dp} = N_A \chi_p^2 / 2\epsilon_{\text{Ge}} \quad (20.2),$$

bu tenglamadan

$$V_{Dn}/V_{Dp} = N_A \epsilon_{\text{Ge}} / N_D \epsilon_{\text{GaAs}} \quad (20.3)$$

kelib chiqadi. Bizning hol uchun bu nisbat 4:1 munosabatdadir. SHuning uchun, bu nisbat 0,42 eV va 0,10 eV ga tengdir. Bu ko'rilgan mulohazalardan quyidagi energetik diagrammani chizish mumkin (23-Rasm).

Oddiy geometrik mulohazalar asosida ΔE_c uzilish uchun quyidagi tenglikni keltirish mumkin.

$$\Delta E_c = \delta_{\text{GaAs}} + V_{Dn} - (E_{g(Ge)} - \delta_{\text{Ge}}) + V_{Dp} \quad (20.4)$$

va (20.4) tenglamani hisobga olib

$$\Delta E_c = \chi_{\text{Ge}} - \chi_{\text{GaAs}} \quad (20.5)$$

hosil bo'ladi.

Valent zonadagi energetik uzilish uchun esa quyidagi tenglikni keltirish mumkin.

$$\Delta E_V = (E_{g(\text{GaAs})} - E_{g(\text{Ge})}) - (\chi_{\text{Ge}} - \chi_{\text{GaAs}}) \quad (20.6)$$

va (20.5)→(20.6) natijasida

$$\Delta E_C + \Delta E_V = E_{g(\text{GaAs})} - E_{g(\text{Ge})} \quad (20.7)$$

hosil bo'ladi. Xuddi shunday mulohaza asosida boshqa getero-juftliklar uchun ham energetik diagrammalarni tuzish mumkin. Bu diagrammalar ajralish chegarasida zaryad bo'lmagan hol uchun to'g'ri bo'ladi.

Geterojunksiya - har xil kimyoviy tarkibli ikkita yarimo'tkazgichli kristallar orasidagi aloqa, bunda bitta yarimo'tkazgichli kristalning kristalli panjarasi boshqa yarimo'tkazgichning kristalli panjarasiga kristalli tuzilishini buzmasdan o'tadi.

Takrorlash uchun savollar

1. Donar va akseptor aralashmali yarimo'tkazgichlar mavzusini o'qitishda texnologiyalarni o'rni?
2. Yarim o'tkazgichlarning elektr xususiyatlari?
3. Yarim o'tkazgich xususiy o'tkazuvchanligi paytidagi elektronlar va teshiklarning harakat sxemasi?
4. Geteroo'tishlarning energetik diagrammasi?

V-BOB. YARIMO‘TKAZGICHLARDA FOTOEFFEKT XODISALARI.

21-§. YARIMO‘TKAZGICHLI MATERIALLAR ORASIDAGI GETEROJUFTLIKLAR

Geterojuftliklar tanlash asosan ikkita kristallografik parametрни hisobga olishga asoslanadi. Bular panjara doimiyliги va issiqlikdan kengayish koeffitsientlaridir.

21.1. Yarimo‘tkazgichlar materiallar asosidagi geterojuftliklar.

Panjaralar nomuvofiqligi agar bir necha foizni tashkil qilsa, u holda ajralish chegarasidagi holatlar zichligi 10^{14} sm^{-2} va undan yuqori bo‘lishi mumkin, natijada geteroo‘tish xususiyatlari shu chegaraviy holatlarga bog‘lik bo‘lishi mumkin. Bunday holatlar juftlanmagan valentlari yoki «bebosh» aloqalar hisobiga bo‘ladi. SHular tufayli ajralish chegarasida quyidagi hollar kelib chiqadi;

a) ajralish chegarasida energetik sohalarining qayrilishi,

b) ajralish chegarasida ortiqcha asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilarning kuchli rekombinatsiyasi.

Agar ajralish chegarasidagi holatlar zichligi 10^{13} sm^{-2} va undan kamroq bo‘lsa, aytish mumkinki chegaraviy holatlar o‘tish chegarasiga kam ta’sir qiladi va geteroo‘tish xususiyatlari tashkil qiluvchi materiallar orasida hosil bo‘lgan guteroo‘tish xossalari bilan aniqlanadi. Shuning uchun asosan geterojuftliklar tanlashda panjaralar doimiyligini farqi 1 % va undan kamroq bo‘lishi maqsadga muvofiqdir. quyidagi 6-jadvalda ayrim geterojuftliklar va ularning parametrlari keltirilgan.

6-jadval.

Materiallar	E_g, eV	a, A°	Zona tuzilishi	IKK, oS^{-1}	kirishmalar	Elektronga moyillik, eV
GaAs	1,43	5,654	To‘g‘ri	5,8	e, Te, Zn	4,07
Ge	0,66	5,658	To‘g‘rimas	5,7	l, Ga, In	4,13
ZnSe	2,67	5,667	To‘g‘ri	7,0	Al, Ga,	4,09
Ge	0,66	5,658	To‘g‘rimas	5,7	InAl, Ga, In	4,13
AlAs	2,15	5,661	To‘g‘rimas	5,2	ZnSe, Te	3,5
GaAs	1,43	5,654	To‘g‘ri	5,8		4,07

Geteroo'tishli materiallar olish texnologiyasi asosan uch usulga asoslangan. Bular jumlasiga suyuq va gaz fazadan epitaksiya usuli, molekulyap-nurli epitaksiya usuli va vakuumdan ustirish usullaridir.

Getero n-p o'tishlarning afzalliklari. QE geteroo'tishli materiallar asosida tayyorlanganda quyidagi afzalliklarga ega bo'lishi mumkin.

1) Agar keng sohali birinchi yarim o'tkazgichning man qilingan sohasi E_{g1} va keyingi yarim o'tkazgichning man qilingan sohasi E_{g2} bo'lsa, va $E_{g1} > E_{g2}$, holat uchun qisqa to'lqinli diapazonda spektral sezgirlikning o'sishi kuzatiladi.

2) Birinchi yarim o'tkazgichni «optik darcha» sifatida qaralib uni maksimal ravishda kirishmalar kiritish (yorug'lik o'tishiga to'sqinlik qilmaydigan darajada) vositasi bilan QE ning ketma-ketlik qarshiligini kamaytirish imkoniyati tug'iladi.

3) Birinchi yarim o'tkazgichni qalin qilib olish mumkin bo'lgani uchun, QE ning har xil nurlanish radiatsiyasiga chidamliligi ortadi. Bu esa QE larini koinotda ishlatilganida muhim ahamiyat kasb etadi.

Takrorlash uchun savollar

1. Lyuminessension nurlanish?
2. Yarim o'tkazgich tarkibidagi qo'shimchalar?
3. Fotoo'tkazuvchanlik?
4. Xususiy fotoo'tkazuvchanlik?
5. Statsionar fotoo'tkazuvchanlikni o'lchash?

22-§. QUYOSH ELEMENTLARIGA KONTAKT OLISH JARAYONI MARSHRUTI.

Omik kontaktlar xususiyatlari o'rganish. Quyida berilgan 7-jadvalda ayrim yarim o'tkazgichli QE lari tayyorlanishda ishlatiladigan materiallar uchun omik kontaktlar keltirilgan.

7-jadval.

Yarim o'tkazgichli material	ρ , Om sm	p- yoki n- kirishmaning konsentratsiya si	Kontakt materiali	Kontakt turi	Keltirilgan qarshilik, om/sm ²
R-Si	-	10^{19}	Al	aktiv	10^{-6}
P-Si	-	10^{15}	Al	aktiv	$5 \cdot 10^{-4}$
P-Si	0,5	-	Al	aktiv	10^{-3}
P-Si	2	-	Ni	passiv	-
P-Si	har qanday	har qanday	Pt-Pt-Si		10^{-4}
n-Si	$5 \cdot 10^{-3}$	-	Al	passiv	$4 \cdot 10^{-3}$
n-Si	-	10^{19}	Ag-Pd- Ti	passiv	
n-GaAs	-	$2 \cdot 10^{16}$	Ni- AuGe-Ni	aktiv	$8 \cdot 10^{-5}$
p-InP	1-10	-	Au-Zn- Au	aktiv	10^{-3}

Quyosh elementlariga taalluqli kontaktlarga qo'yiladigan talablarni ko'rib chiqamiz. Jadvalda QE lari uchun ishlatilgan klassik kontaktlar keltirilgan. Umuman olganda hozirgi zamon QE lari uchun ishlab chiqilgan kontaktlarning o'nlab har xil materialdan olingan «aktiv» va «passiv» turlari yaratilgan. SHunga qaramasdan ularga qo'yiladigan talablarning asosiy qismlari quyidagilardan iborat:

1. Kontaktning keltirilgan qarshiligi kichkina bo'lishi kerak. ($\rho_{ko} \rightarrow 0$)

2. Frontal tomonga olinadigan kontakt to'rsimon ko'rinishda bo'lgani uchun, uning qarshiligini kamaytirish maqsadida uning kesimini oshirish kerak (ya'ni kontakt qalin bo'lishi kerak). Buning uchun QE eritilgan qalayga (pripoyga) tushiriladi, shuning uchun kontaktning qatlamlari shu jarayonga chidamli bo'lishi kerak.

3. Kontaktning xususiyatlari keyingi har xil texnologik jarayonlar davomida saqlanib qolishi kerak, xususan bu ko'proq frontal kontaktga tegishli.

4. QE larini germetizatsiya qiluvchi qatlamlar olingandan keyin kontakt parametrlari uzoq vaqt davomida (20 yil va undan ko'proq vaqt davomida) tashqi muhit ta'siriga chidashi kerak.

5. Kontakt olinadigan materiallar iloji boricha arzonroq bo'lishi, nodir materiallar qo'llanmasligi (Er sharoitida ishlaydigan QE lari uchun) kerak.

6. Orqa tomondan nurni qaytaruvchi kontaktga ega bo'lgan QE lari olish uchun material tanlanganda nurni qaytarish koeffitsientini hisobga olish kerak.

Kristalli kremniy asosidagi QE keng qo'llaniladi. Bu QE larida asosan quyidagi kontaktlar qo'llaniladi; r-tipdagi Si uchun Al, Al-Ti Pd-Ag va p-tipdagi Si uchun Ti-Pd-Ag. Bu kontaktlar asosan vakuumda uchirish usuli bilan olinadi.

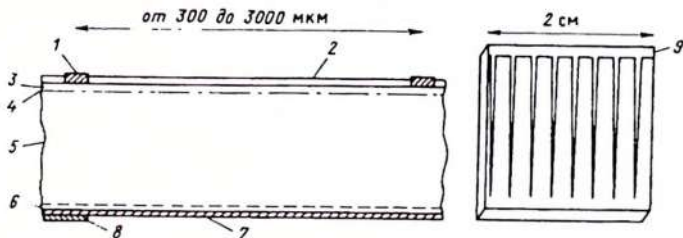
Odatda p^+ -Si uchun Ag yaxshi tunnellanish xususiyatiga asoslangan kontakt bo'lib hisoblanadi ($F_v=0,6-0,7$ eV). Ammo bu tizimning adgeziyasi yomon, shuning uchun Si bilan Ag orasiga oraliq yupqa qatlam Ti kiritiladi. Bunday kontaktlarda Ag ning qalinligi 2-3 mkm va titanning qalinligi 1 mkm ga yaqin bo'lishi kerak. Bunday qalin qatlamlarni vakuumda uchirib olish mushkil vazifadir. Bu kontaktlarda tabiiy sharoitda o'tkazilgan tajribalar natijasiga ko'ra bu sistemaning korroziyaga uchrashi mumkinligi aniqlangan va bu jarayon suv bug'ining yutilishiga asoslangani aniqlangan. SHuning uchun keyinchalik titan va kumush orasiga palladiy kiritish tavsiya etilgan va natijada kontaktning elektr toki va haroratga chidamliligi oshirilgan. Bu kontaktning birdan-bir kamchiligi uning nisbatan qimmatligidir. Bu erda nafaqat materiallar nodirligi, shu bilan birga vakuumda uchirish jarayonining katta isrofgarchilikka olib kelishini ham hisobga olish kerak (90% yaqini chiqindiga chiqadi).

Quyosh elementlariga kontakt olish jarayoni marshruti. Kontakt olish jarayonining asosiy operatsiyalarini ketma-ketligini quyidagilardan iborat.

- Si n-p tuzilmasini kontakt olishga tayyorlash (ximik yoki ximik-mexanik usul bilan kontakt olinadigan yuzani tozalash);
- strukturaga fotorezist o'tqazish;
- fotoshablon yordamida kontakt rasmini tushirish;

- fotorezistni mustahkamlash;
- vakuum qurilmasidan foydalanib ketma-ketlik bilan kontakt materiallarini uchirish;
- kontakt adgeziyasini yaxshilash uchun kontaktga issiqlik bilan ishlov berish;
- fotorezistni yuzadan olib tashlash;
- kontakt kesim yuzasini oshirish uchun qalaylash;
- frontal yuzadan nur qaytarishini kamaytirish uchun uni oksid bilan qoplash;
- QE tuzilmasidan shunt beradigan qismlarni kesib olib tashlash;
- QE ning parametrlarini o'lchash.

QE frontal qismidagi yupqa diffuzion jarayon orqali hosil qilingan fosfor kirishmali qatlam odatda katta yuza qarshiligiga ega bo'ladi va uning qiymati odatda $50-100 \text{ Om/m}^3$. Bunday qarshilikni kamaytirish va tuzilma samaradorligini saqlash uchun tashqi (frontal) yuzaga to'rsimon (setka) kontakt olinadi. Bu kontakt birinchidan yuzani ko'p to'smasligi, ikkinchidan omik bo'lishi, uchinchiidan yupqa diffuzion qatlamni teshmasligi kerak. 66 va 67-rasm.

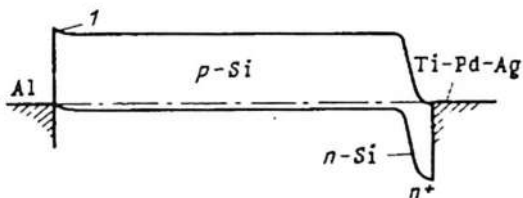


66-rasm. Kremniy quyosh elementining frontal kontakt ko'rinishiga oid misol. 1- yuzadagi to'rsimon kontakt (ko'p qatlamli + priпой), 2 - shaffoflantiruvchi qatlam, 3 - legirlangan p-tipdagi yupqa qatlam (0,2 mkm), 4 - 0,5 mkm qalinlikdagi xajmiy zaryad qatlami, 5 - 200 mkm qalinlikdagi baza qatlami, 6 - 0,5 mkm qalinlikdagi n^+ - qatlam, 7 - orqa tomondagi kontakt qatlami, 8 - tok jamlovchi shina, 9 - to'rsimon tok jamlovchi shina.

Izlanishlar natijasi shuni ko'rsatadiki, odatda yuzada mikroskopik kattalikdagi teshilgan uchastkalar hosil bo'lishi mumkin (yupqa diffuzion qatlamlar olinganda) va bunday hollarda R_{sh} qarshiligi kamayishi

va I_0 ning qiymati ortishi mumkin. Buning oldini olish maqsadida kontakt olinadigan yuzaga metall maskalar yoki polimer materialdan qilingan va kontakt rasmi tushirilgan fotorezist maskalar yordamida yoki akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar ustiga kontakt olinadi.

Kontaktning geometrik shakli (topologiyasi) kontakt olinadigan yuza kattaligiga, diffuzion qatlamning qalinligiga va QE larining qaysi sharoitda ishlashiga qarab tanlab olinadi.



67-rasm. Tipik kremniy asosidagi quyosh elementiga oid energetik zonali diagramma; p-qatlam o'lchami kattalashtirilgan. 1 – orqa tomonga yaqin qismdagi elektr maydoni.

Odatda yuzaga tushayotgan nurni yulini to'smaslik uchun yuzani to'sish ko'effitsientining kattaligi 10 % dan oshirmaslikka harakat qilinishi kerak. Konsentrlashtirilgan (zichlashtirilgan) quyosh nurlari bilan ishlaydigan QE larda esa yuzani to'sish ko'effitsienti quyosh nurini zichlashtirish ko'effitsientiga bog'lik bo'lib, ayrim hollarda u 50 % oshiqroq bo'lishi ham mumkin.

Takrorlash uchun savollar

1. Quyosh elementlariga kontakt olish jarayonining o'tkazilish tartibi quyidagicha amalga oshiriladi?
2. Si p – n tuzilmasini kontakt olishga tayyorlash (kimyoviy yoki kimyoviy mexanik usul bilan kontakt olinadigan yuzani tozalash)?
3. strukturaga fotorezist o'tqazish?
4. fotoshablon yordamida kontakt rasmini tushirish?
5. fotorezistni mustahkamlash?
6. vakuum qurilmasidan foydalanib ketma – ketlik bilan kontakt materiallarini uchirish?

7. kontakt adgeziyasini yaxshilash uchun kontaktga issiqlik bilan ishlov berish?

8. fotorezistni yuzadan olib tashlash?

9. kontakt kesim yuzasini oshirish uchun qalaylash?

10. frontal yuzadan nur qaytarishini kamaytirish uchun uni oksid bilan qoplash?

11. Quyosh elementi tuzilmasidan shunt beradigan qismlarni kesib olib tashlash?

12. Quyosh elementining parametrlarini o'lchash.

23-§. AKSLANISHNI KAMAYTIRUVCHI QATLAMLAR OLISH TEXNOLOGIYASI.

Quyosh elementari samaradorligini oshirishning yana bir yo'li elementning yuza qismidan bo'ladigan nur qaytarilish hodisasini kamaytirishdir. Misol uchun sayqallangan kremniy plastinasi yuzasidan (0,35-1,1 mkm diapazondagi) tushayotgan nurning akslanish koeffitsienti 0,45 dan oshishi mumkin. Bu hodisa asosan Si va atmosfera orasida nur sindirish koeffitsientining nomuvofiqligidir, ya'ni kremniy uchun $n = 3,6$ bo'lgani holda, havo uchun bu ko'rsatkich birga teng. Bunday sharoitda tushayotgan nurning qaytishini kamaytirish uchun, yarim o'tkazgichli material ustini sindirish ko'rsatkichini muvofiq-lashtiruvchi, har xil oksid materiallar, bilan qoplash kerak bo'ladi. Bunday materiallardan QE texnologiyasida ishlatiladiganlari bir-muncha bo'lib, ularga quyidagilar misol bo'la oladi, SiO , SiO_2 , SnO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , ZnS va hokazolar. Odatda qoplanayotgan material-lar sindirish ko'rsatkichi quyidagini tengsizlikni qanoatlantirishi kerak, ya'ni $n_1 < n_2$ bo'lishi kerak. Yuzaga olinayotgan akslanishni kamay-tiruvchi qatlam bir yoki ikki qavatli har xil materialdan iborat bo'lishi mumkin. U holda $n_1 < n_{1k} < n_{2k} < n_2$ bo'lishi kerak.

23.1. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlarning xususiyatlari.

Ayrim hollarda quyosh elementi yuzasidan bo'layotgan issiqlikdan nurlanishni oshirishga to'g'ri keladi. Sayqallashgan Si yuzasidan, kirishmalar konsentratsiyasi $(1-2) \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$, bo'lganda QE da issiqlik-dan muvofiq-lashtiruvchi qoplamasiz issiqlikdan nurlanish ko'rsatkichi bor yug'i 0,19-0,24 ga teng bo'ladi. Element isib ketmasligi uchun issiqlikdan nurlanish koeffitsientini 0,9 gacha oshirish kerak bo'ladi. Buning uchun QE yuzasi ikki qatlamli oksid bilan qoplanib, ikkinchi qatlam issiqlikdan muvofiqlantiruvchi bo'lib uning qalinligi 40-80 mkm ga borishi va $n = 1,51$ yaqin olinishi kerak va tushayotgan spektrning yutilishi, yuzadagi issiqlikni 30-40 °S da saqlash uchun, to'liq uzunligi 3-30 mkm ga to'g'ri kelishi kerak bo'ladi. Bu hodisalar asosan koinotda ishlatiladigan QE lariga ko'proq taalluqlidir.

Ikki qavatli akslanishni kamaytiruvchi qatlamlarni parametrlarini to'g'ri tanlash akslanishni kamaytirishni to'g'ri hisoblashga bog'lik bo'lib, asosan birinchi qavat qatlami parametrlarini to'g'ri tanlashni

taqozo etadi. Misol uchun ko'pincha birinchi qavat qatlamining sindirish ko'rsatkichini $n = 2,3$ ga teng deb olinadi va bu birinchi qavat qatlami sifatida ZnS materialini olish bilan bog'likdir, ya'ni issiqlikdan nurlanishni kamaytirish uchun $n = (n_{\text{ik}}n_{\text{Si}})^{1/2} = (1,5 \times 3,7)^{1/2} = 2,3$ tengligi kelib chiqadi. Albatta ZnS o'rniga olinadigan boshqa materiallar ham mavjud. Misol uchun Ta, Ti, Ce oksidlari. Ikkinchi qavat qatlami materiallari misoliga $n = 1,6-1,8$ ga teng bo'lgan In_2O_3 , SnO_2 , SiO_x olinishi mumkin.

Kremniy asosidagi QE larini bir qatlamli effektiv akslanishni kamaytiruvchi material bo'lib, Ta_2O_5 hisoblaniladi va uning yordamida akslanishni 10 % dan kamroq qilish mumkin, ikki qatlamli qoplamalar bilan esa akslanishni 2 % kamaytirish hakida ma'lumotlar mavjud.

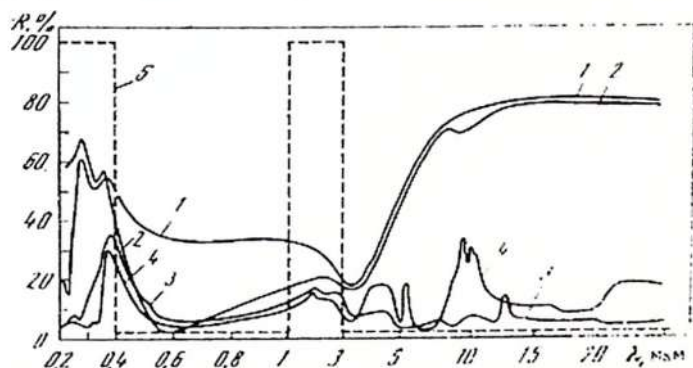
Kremniy asosidagi fotoqabullagichlar sirtiga yupqa akslanishni kamaytiruvchi qatlamning qalinligi $\lambda/4$ ga teng bo'lishi kerak. So'nggi vaqtlarda kremniy tuzilmalarida SiO_2 o'rniga nitrid kremniyli Si_3N_4 olinayapti va uning sindirish ko'rsatkichi $2 \pm 0,1$ ga teng. Bu qoplama yuzadan akslanishni kamaytiribgina qolmasdan shu bilan birga yuzani passivatsiya ham qiladi va uning ishonchlilikini oshiradi. Odatda, sirtiga nitrid kremniy o'tqazilgan fotoqabullagichlarda ularni korpusga o'rnatishga hojat qolmaydi. Akslanishni kamaytirish usullaridan yana biri bu yuza sirtini teksturalashdir. Bu usulning mohiyati shundan iboratki, yuza sirtida akslanishni kamaytiruvchi relef hosil qilinadi, ya'ni sirt ma'lum kristallografik yo'nalishda emirish xususiyati bo'lgan eritmalar yordamida ishlov beriladi.

23.2. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish usullari.

Bunday qatlamlar olish usullari xilma-xil bo'lishiga qaramasdan asosan quyida keltirilgan uch xil usul asosiy bo'lib hisoblanadi. Bunga sabab ularning imkoniligi va nisbatan qoniqarligidadir.

Vakuumda uchirish usuli bilan akslanishni kamaytiradigan qatlamlar olish. Bu usul bilan deyarli turli xil qatlamlar olish mumkin. Buni biz kremniy monooksidi olish misolida ko'rib o'tamiz. Umuman kremniy oksidlari (SiO va SiO_2 lar) mikroelektronikada qo'llaniladigan asosiy materiallardan hisoblanadi va ularni olish **rasm** texnologiyasi ko'pchilikka ma'lum. Fotoelektrik tizimlarda ular optik parametrlarining to'g'ri kelishi nuqtai nazaridan ishlatiladi. Kremniyli QE lari ishlaydigan optik diapazon Er sharoiti uchun bu 0,4-1,1 mkm dir.

Shuning uchun antirefleksion qatlam shu diapazonda tushayotgan nurni maksimal o'tkazish xususiyatiga ega bo'lishi kerak. Kremniy oksidi aralashmasi SiO_x ning sindirish ko'rsatkichi 1,6-1,8 ga tengdir. Optika qonunlariga asosan uning qoplamadagi qalinligi 950-1100 Å bo'lishi kerak. Bu monooksidni vakuumda uchirish usuli bilan olish uchun uning maydalangan (0,5-1 mm) fraksiyasi olinadi. Akslantirishni kamaytiruvchi qatlam qalinligini nazorat qilish uchun asosiy namunalar bilan birga «yo'ldosh» namuna ham olinadi va nazorat ishlari «yo'ldosh» namunada olib boriladi. «Yo'ldosh» namuna sifatida shaffof materiallar, masalan shisha olinadi. Akslanishni kamaytiruvchi qatlam qalinligi interferensiya hodisasiga asoslanib, interferometri bor bo'lgan mikroskoplar yordamida aniqlanadi. Bundan tashqari ma'lumotnomalardan olingan jadvallar yordamida olingan oksidning rangiga qarab qalinlikni ma'lum aniqlikda topish mumkin. 68-rasmda har xil materialdan tayyorlangan akslanishni kamaytiruvchi optik qoplamalarning akslanish koeffitsientining tushayotgan yorug'lik to'lqin uzunligiga qarab o'zgarishi keltirilgan.



68-rasm. Har xil birikmalar asosidagi qatlamlar olingan kremniydan tayyorlangan quyosh elementlari qaytarish koeffitsientining spektral o'zgarishi. 1- qatlam-siz; 2 – SiO ($d = 0,15$ mkm); 3 – ZnS ($d = 0,15$ mkm) + kremniy organik lak ($\ell = 50$ mkm); 4 - ZnS ($d = 0,15$ mkm) + kremniy organikli kauchuk + shisha plastina ($\ell = 0,5$ mm); 5 – ideal sovutilgan hol.

23.3. Piroliz usuli bilan akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish.

Piroliz usuli bilan akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish usulini SnO_2 misolida ko'rib o'tamiz. SnO_2 asosidagi akslanishni kamaytiruvchi qatlamning yaxshi tomonlaridan biri uning legirlash imkoniyati mavjudligidadir. Natijada uning elektr tokiga qarshiligini minglab marotaba o'zgartirish mumkin. Bu birikma ximiyaviy ta'sirga o'ta chidamlidir. Bu qoplamaning olish texnologiyasi SnCl_2 va SnCl_4 birikmalaridan 450-600 °S da piroliz qilishga asoslangan. 68- rasmda SnO_2 ni piroliz qilish usuli ko'rsatilgan. Bu oksid tarkibiga p-tip material olish uchun ftor (G') va r-tip material olish uchun surma (Sb) kiritiladi. Natijada keltirilgan sirt qarshiligini 10 $\text{Om}/\square$ gacha tushirish mumkin. SHishaga olingan qalay oksidi tahlili shuni ko'rsatadiki qalinligi 750-1100 °A bo'lganda ham shaffoflik ko'effitsientini 95 % etkazish mumkin. Qarshilikni kamaytirish hisobiga esa QE ga olinadigan kontaktning bevosita akslanishni kamaytiruvchi qoplama ustiga olish imkoniyati tug'iladi.

23.4. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlarni termik yo'l bilan olish usuli.

Qatlamlarni termik ishlov berish usuli bilan olish eng ko'p ishlatiladigan usul bo'lib, bu usul mikroelektronikada tuzilmalar sirtini passivatsiya qilishda ko'p ishlatiladi. Termik usulni asosan SiO_2 olishda ishlatiladi. Bu usulning asosi texnologik jarayon davomida kremniyli tuzilmaning sirtini kislorod ta'sirida okslanishidadir. Haroratning kattaligiga qarab va jarayon sharoitiga qarab kremniy oksidi xususiyatlari o'zgarishi mumkin. Usul shartli ravishda ikkiga bo'linadi, a) «quruq» usul va b) «ho'l» usulga. Bu usullar orasidagi farq jarayon haroratining qiymati va jarayonni o'tkazilish sharoitidadir. «quruq» usulni o'tkazish jarayoni 1100 °S va undan ortiq haroratda olib boriladi, «ho'l» usulda harorat 200 °S gacha pastroq haroratda qo'shimcha kislorod atmosferasida olib boriladi. Ayrim hollarda kislorodga qo'shimcha suv bug'i ham beriladi. Bu usul bilan olingan qatlamlar mikroelektronikada quyidagi vazifalarni bajarishi mumkin.

1) Fotolitografik jarayonda «niqob» (maska) sifatida ishlatilib, kontakt olishda qo'llaniladi.

2) QE larida akslanishni kamaytiruvchi qatlam sifatida ishlatiladi.

3) Ayrim kremniy tuzilmalarida yuzani passivatsiya va ixota qiluvchi qatlam sifatida ishlatilishi mumkin.

Qoplamalarning qalinligi ko'p jihatdan texnologik jarayon sharoitiga va haroratga bog'lik bo'lib, ularni nazorat qilish muhim ahamiyat kasb etadi.

Takrorlash uchun savollar

1. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish texnologiyasi?
2. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlarning xususiyatlari?
3. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish usullari?
4. Piroliz usuli bilan akslanishni kamaytiruvchi qatlamlar olish?
5. Akslanishni kamaytiruvchi qatlamlarni termik yo'l bilan olish usuli?

24-§. QUYOSH ELEMENTLARI TEXNOLOGIYASIDA FOTOLITOGRAFIYA USULINING QO‘LLANILISHI.

Hozirgi zamon mikroelektronikasining yutuqlari ko‘p jihatdan fotolitografiya usulini qo‘llanilishiga bog‘liqdir. Bu usul bilan YAO‘ tuzilmalarda katta aniqlikda avvaldan berilgan topologiyaga ega bo‘lgan shakl tushiriladi, va keyinchalik unga texnologik ishlov beriladi. Bu usul vositalari bilan har xil materialga, jumladan dielektriklarga, yarim o‘tkazgichli materialga, metallarga proeksion rasmlar tushirish mumkin.

24.1. Fotolitografiya usuli va uning mohiyati.

Fotolitografik usul (FLU) bilan materialga (YAO‘, metall, dielektrik) ishlov berilganda avvaliga kerakli shakllar alohida maxsus yorug‘likka sezgir materialda – fotorezistda (fotorezist kerakli material sirtiga olinadi) olinadi. Fotorezistga (FR) rasm maxsus qurilmalar orqali tushiriladi. FLG usuli vositasida 1-3 mkm o‘lchamdagi shakllarni 0,2-0,6 mkm aniqlikda tushirish mumkin. FLU usulida shakl olishda qilinadigan asosiy jarayonlar 26-Rasmda berilgan. Bu jarayonlar quyidagi tartibda bajariladigan texnologik operatsiyalardan iborat.

- materialga FR o‘tkazish,
- fotorezistni mustahkamlash,
- fotoshablon yordamida shakl tushirish,
- shaklni nurlantirish (proyavlenie),
- keraksiz joylarni emirish,
- ortiqcha FRni olib tashlash.

Fotorezistlar. FR lar – yorug‘likka sezgir material bo‘lib, yorug‘lik ta’siri ostida eruvchanligining o‘zgarishi hodisasiga asoslanib shakl ishlanadi. Asosan FR lar ultrabinafsha nurlar ta’sirida aktivlantiriladi. Fotorezist polimer materiallardan tayyorlanadi. FR pozitiv va negativ bo‘ladi. Agar uning eruvchanligi nur ta’sirida ortsa, – pozitiv deyiladi, agar kamaysa – negativ deyiladi.

24.2. Fotolitografiya usulida qo'llaniladigan materiallar.

Fotolitografiya jarayonini o'tkazishga materialni tayyorlash muhim texnologik jarayon bo'lib hisoblanadi. FLU ni qo'llashda namunaga quyidagi talablar qo'yiladi.

1) Namuna sirtida nuqsonlar bo'lmasligi (iflosliklar, mexanik chiziqlar va hokazolar).

2) Har xil fizik yoki ximik holatlarning namuna sirtida bo'lmasligi (namuna atomidan boshqa atomlar).

3) Kerakli adgeziyaga ega bo'lgan FR tanlash.

Namuna sirtiga avvaldan o'tqazilgan dielektrik qatlamlarning qalinligi etarli bo'lishi kerak.

Namuna sirtiga FR qatlamini olish jarayoni. FR qatlamini olishning bir necha usuli mavjud. Bulardan biri sentrifuga yordamida FR qatlamini olishdir. Ma'lum tezlikda aylanayotgan sentrifugaga mahkamlangan namuna sirtiga tomchi ko'rinishdagi FR tushiriladi. FR ning jarayon davomida oqishi va yupqa qatlam hosil qilishi kuzatiladi va undan erituvchining bug'lanishi kuzatilib, uning ovushoqligi ma'lum darajaga kelguncha foydalaniladi. FR oqish jarayoni to'xtashigacha jarayon davom ettiriladi. Odatda qalinlik bo'yicha bir tekis yupqa qatlam hosil bo'lishi uchun sentrifuga aylanish tezligi 1500-6000 ayl/min bo'lishi maqsadga muvofiqdir. Bu usulning afzalliklari qurilmaning soddaligi, yupqa qatlamlar olish imkoniyati mavjudligidadir.

Purkash usulida esa FR siqilgan havo yordamida namuna sirtiga sochiladi. Bu usul FR ning qalin olinishiga imkoniyat beradi. Eng soddra usullardan biri namunani FR ga botirish usulidir. FR ni quritish jarayoni. FR ni termokamerada yoki infraqizil nurlar vositasida quritish usullari mavjud. +uritish 80-100°S ayrim hollarda 120-140 °S da olib boriladi.

24.3. Fotoshablon yordamida rasm tushirish.

Fotoshablon – tushirishi kerak bo'lgan namuna ustidagi shaklning aksi (negativ FR uchun) yoki o'zi (pozitiv FR uchun) ko'rinishida bo'ladi. Fotoshablonni namuna bilan ustma-ust tushirish va nurlantirish odatda bir dastgoxda o'tkaziladi. Fotoshablonni namuna bilan ustma-ust tushirish imtiyozli, mas'ul jarayon bo'lib, u FLU aniqligini belgilovchi operatsiyadir. Ustma-ust tushirish jarayoni mikroskop

ostida o'tkaziladi. Bu jarayondan keyin shu juftlik yoritiladi, buning uchun asosan kontakt usuli qo'llaniladi. YORug'lik FR qatlamidan o'tib qisman yutiladi va FR ning fotosezgir qismini aktivlashtiradi. Fotorezist yoritilib aktivlashtirilgandan keyin, aktivlashgan (ya'ni yorug'lik tushgan joylari (yoki aksincha joylari) kimyoviy usul bilan emiriladi va natijada kerakli shakl hosil bo'ladi. Bu jarayon «ochish» deb ataladi. «Ochish» (proyavka) botirish yoki pulverizatsiya usuli bilan bajariladi. Bu jarayonda nazorat qilish mikroskop ostida bajariladi va berilgan shaklning aniq bo'lishiga ahamiyat beriladi. «Ochish» jarayonining aniqligi, uning haroratiga, «ochqich reaktiv»-ning (proyavitel) konsentratsiyasiga va yoritish vaqtiga (ekspozitsiyaga) bog'likdir.

24.4. Metall va dielektrik qatlamlarda shakl hosil qilish.

Yupqa qatlamda (metall, dielektrik yoki YAO') shakl hosil qilish uchun avvaliga FR yordamida niqob hosil qilinadi, keyin FLU ni qo'llab shakl hosil qilinadi. Bu jarayonda asosiy operatsiyalardan biri shakl hosil qilish uchun, ximik emirish jarayonidir. Ximik emirish jarayonida, FR bilan himoya qilinmagan, joylarga emirilishi kerak. Ammo ayrim hollarda emirilish ichkarigagina emas, balki yon tomonga ham ketishi mumkin. Bu esa shaklni qisman buzilishiga va aniqlikning kamayishiga olib kelishi mumkin. Bu jarayon asosan tanlab olingan fotorezistning adgeziya xususiyatiga bog'likdir.

Kremniy oksidi (SiO_2) qatlamiga shakllarni olish. SiO_2 ga olingan FR ni emirish uchun asosan ximik eritmalar ishlatiladi. Masalan, 40 % li ftorli ammoniydan (NH_4F) 88-91 hajmiy % va konsentrlangan (48 %) li HG' dan 9-12 hajmiy % li eritma tayyorlanadi. Emirish tezligi jarayon o'tkazilayotgan sharoitga qarab 0,04-0,5 mkm/daqqa bo'lishi mumkin.

Juda yupqa qatlamlarni nazoratli emirish uchun esa 15 ml 48 % HG', 10 ml 70 % li HNO_3 , 300 ml H_2O tarkib olinib, emirish sur'ati 0,012 mkm/daqqa qilib olinadi.

Alyuminiy asosidagi qatlamlarni emirish. Al asosidagi olingan qatlamlarni emirish uchun kislotali va ishkorli eritmalaridan foydalaniladi. Asosiy emirivchi sifatida ortofosfor kislotasi olinadi. Misol sifatida quyidagi tarkibni keltiramiz, 80-95 ml H_3PO_4 + 5 ml HNO_3 +

(1-20 ml) H_2O ni $40\text{ }^{\circ}S$ da ishlatilganda alyuminiyning emirish sur'ati 0,2 mkm/daqiqa bo'ladi.

Quyidagi 8-jadvalda har xil materialdan bo'lgan yupqa qatlamlarni emirish uchun kerak bo'lgan ayrim tarkiblar ro'yxati keltirilgan.

8-jadval.

Qoplama materiali	Emiruvchi eritma tarkibi
Mis	Xlorli temir, ammoniy persulfati, HcI , HG^+
Kumush	Temir nitriti, KJ va J ning suvdagi eritmasi
Oltin	$SHox$ arogi, KJ va J ning suvdagi eritmasi
Molibden	Kaliy ferrotsianidi, H_2SO_4 va HNO_3
Tantal	Fosfor, azot va sirka kislotalari aralashmasi
Nixrom	HcI
Kremniy nitridi	H_3PO_4 va HG^+ , HNO_3 ning $70\text{ }^{\circ}S$ dagi aralashmasi.

FLU ning oxirgi jarayoni – qolgan joylardan FR ni olib tashlashdir. FR ni olib tashlashning bir necha usullari mavjud bo'lib, bulardan kislotalarda ishlov berish, organik erituvchilarni qo'llash, plazmoximik usullar mavjuddir.

Kislotalar bilan ishlov berib FR olib tashlash $60\text{ }^{\circ}S$ gacha isitilgan konsentrlangan sulfat yoki azot kislotalari (yoki ularning aralashmalari) da 5-30 daqiqa davomida olib boriladi. Bu kislotalar qo'llanilganda FR olib tashlanayotgan tuzilma tarkibida shu kislotalar ta'sir qiladigan moddalar bo'lmasligi shart.

Organik erituvchilar bilan ishlov berilganda (bular qatoriga dioksan dimetilformamid, toluol, ksilol, yoki ularning aralashmalari kirishi mumkin) haroratni $60-100\text{ }^{\circ}S$ qilib olinadi va ishlov berish vaqti fotorezistning markasiga va uning qalinligiga qrab 1-15 daqiqa atrofida olinadi. Plazmoximik usul asosan yuqori samaradorli qurilmalarda zavodlarda ishlatilishi mumkin.

Takrorlash uchun savollar

1. Fotolitografiya usuli va uning mohiyati?
2. Fotolitografiya usulida qo'llaniladigan materiallar?
3. Fotoshablon yordamida rasm tushirish?
4. Metall va dielektrik qatlamlarda shakl hosil qilish?
5. Kremniy oksidi (SiO_2) qatlamiga shakllarni olish?
6. Alyuminiy asosidagi qatlamlarni emirish?

25-§. KRISTALL KREMNIYLI QUYOSH ELEMENTLARI.

Kristalli kremniy quyosh elementlari - bu sotuvda mavjud bo'lgan quyosh panellarida ishlatiladigan eng keng tarqalgan quyosh elementlari, bu 2011 yilda global quyosh elementlari bozorining 85 foizdan ortig'ini tashkil etadi. Kristalli kremniyli quyosh elementlari laboratoriyada quvvatni konversion samaradorligini bitta kristalli xujayralar uchun 25% dan yuqori va ko'pkristalli xujayralar uchun 20% dan yuqori samaradorlikka ega. Biroq, tijorat maqsadlarida ishlab chiqarilgan quyosh modullari hozirda standart sinov sharoitida 18% dan 22% gacha samaradorlikka erishmoqda.

Tadqiqotlar. AQSh Energetika vazirligi tomonidan olib borilayotgan izlanishlar xarajatlarni kamaytirishning innovatsion usullariga bag'ishlangan. Xom ashyo talablarini kamaytirish, shu jumladan ultra yupqa kristalli kremniy changni yutish qatlamlarini yaratish, notafel gofret texnologiyalarini ishlab chiqish bo'yicha tadqiqotlar va tadqiqotlar olib borilmoqda (notch - bu kremniy litoglarini ingichka gofretga aylantirishda isrof qilinadigan kremniy kukuni) va o'sishni optimallashtirish jarayonlari.

Quyidagi Quyosh Energiyasi FDA Ar-ge va kristalli kremniy texnologiyalari va loyihalari g'oliblari haqida ko'proq bilib oling.

Kristalli kremniyli quyosh elementlarining afzalliklari quyidagilardan iborat:

O'stirish: Joylashtirish loyihalari uchun kapital olish uchun juda muhim bo'lgan loyihaning ishonchliligi va barqarorligini baholash bo'yicha muhim ma'lumotlar to'plami mavjud.

Ishlash: Standart ravishda ishlab chiqarilgan kremniy xujayrasi, boshqa ommaviy ishlab chiqariladigan bitta-ulanish moslamasidan yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. Yuqori samaradorlik o'rnatishning yakuniy narxini pasaytiradi, chunki ma'lum bir quvvat uchun kamroq quyosh batareyalari ishlab chiqarilishi va o'rnatilishi kerak.

Ishonchliligi: Kristalli kremniy hujayralar modulning ishlash muddatini 25 yildan ko'proq vaqtga etkazadi va uzoq muddatli degradatsiyani ko'rsatmaydi.

Ko'plik: Kremniy er qobig'ida eng ko'p tarqalgan ikkinchi element (kislordan keyin).

Ishlab chiqarish. Odatda kristalli kremniyli quyosh elementlari monokristalli (monokristalli) kremniy yoki ko'p kristalli kremniydan

ishlab chiqariladi. Monokristalli xujayralar psevdokvadratli kremniy gofretlardan, shishalardan kesilgan gofrolardan, Czochralskiy jarayoni yordamida o'stirilgan, suzuvchi zonalar, lenta o'stirish yoki boshqa yangi texnologiyalardan tayyorlanadi. Ko'p kristalli kremniyli quyosh elementlari an'anaviy ravishda kvarts krujkalariga quyilgan ingotlardan kesilgan to'rtburchaklar kremniy substratlaridan tayyorlanadi. Ushbu ishlab chiqarish texnologiyalari va fotoelektr energiyasida ishlatiladigan kremniy turlari haqida ko'proq ma'lumotni Energiya asoslari veb-saytidan olishingiz mumkin.

Quyosh xujayrasi tomonidan aks ettirilgan va shuning uchun oqim hosil qilish uchun ishlatilmaydigan yorug'lik miqdorini kamaytirish uchun kremniy yuzasiga aksariyat aks ettiruvchi qoplama (ARC) qo'llaniladi, ko'pincha titaniumdioksit (TiO_2) yoki kremniy nitridi (SiN). Yorug'likni olish va yutishni kuchaytirish uchun quyosh xujayrasining yuqori qismida kimyoviy o'lik jarayoni natijasida hosil bo'lgan mikrometr o'lchamdagi piramidal tuzilmalar bilan tekstura qilish mumkin.

p-n birikmasini yaratish uchun odatda bor-dopingli p-tipli kremniy substratining yuqori qismida fosforli dopingli n + mintaqasi hosil bo'ladi. Alyuminiy kabi metall elektrod orqa kontakti hosil qiladi, oldingi aloqa ko'pincha ARC qatlami ustidan ekranga bosilgan kumush xamir bilan hosil bo'ladi.

Kristalli kremniyli quyosh xujayrasidagi zaryad tashuvchilarni yig'ish p va n dopingli qatlamlar ichida ozchilik zaryad tashuvchilarning tarqalishi orqali amalga oshiriladi. Uzoq diffuziya uzunligi (> 200 mikrometr) optik yutilish sodir bo'ladigan quyosh elementlari qalinligining butun diapazonida tashuvchilarni ushlashga yordam beradi.

Polikristalli kremniy - quyosh energiyasining asosiy xom ashyosi bozori to'g'risida. Fotovoltaik quyosh energiyasi bugungi kunda har yili ishga tushirilgan quvvat hajmi va jalb qilingan investitsiyalar hajmi jihatidan ham jahon elektr energetikasining muhim, eng yirik tarmog'iga aylandi. Aytish kifoya, 2017 yilda global miqyosda gaz, ko'mir va yadro ishlab chiqarishga qaraganda ko'proq quyosh energiyasiga sarmoyalar kiritildi.

Har yili dunyoda o'rnatiladigan quyosh modullarining 90% dan ortig'i kristalli kremniy asosida ishlab chiqarilgan bo'lib, ular kremniy quyosh (fotoelektrik) batareyalar deb nomlanadi.

Bunday panellarni ishlab chiqarish uchun ishlatiladigan asosiy xom ashyo polikremniy yoki polikremniy (polikremniy) deb nomlanadi.

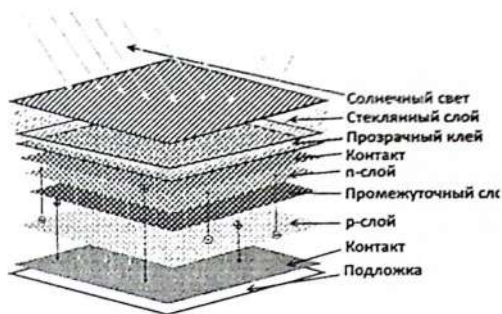
Kremniy ikkinchi eng keng tarqalgan kimyoviy element hisoblanadi, ammo u tabiatda deyarli sof shaklda uchramaydi. Elektron va quyosh sanoatida foydalanishga yaroqli bo'lgan soflikdagi polikremniy izolyatsiya qilinishi va tegishli kimyoviy jarayonlar yordamida ishlab chiqarilishi kerak.

Olingan xom ashyodan (polikremniy) ingot eritiladi, so'ngra plitalarga bo'linadi (Rossiya Federatsiyasida "Solar Silicon Technologies" mas'uliyati cheklangan jamiyati shu bilan shug'ullanadi) va quyosh batareyalari allaqachon quyosh moduli bo'lgan plitalardan yasalgan. yig'ilgan. Bu qisqacha qilib aytganda, kremniy fotoelektr modullarini ishlab chiqarish jarayoni, ammo biz bugun bu haqda to'xtamaymiz, biz global polikristalli kremniy bozori haqida gaplashamiz.

Polikristalli kremniy quyosh elementlarini ishlab chiqarish uchun asosiy xom ashyo bo'lganligi sababli, ushbu xom ashyo bozorining holati umuman quyosh energiyasining rivojlanishiga ta'sir qiladi. Quyidagi grafikada ko'rsatilgandek, boshqa quyosh batareyalari tarkibiy qismlarining narxi pasayishi bilan, bunga, xususan, yuqori mehnat unumdorligi sabab, yakuniy mahsulot narxida xom ashyoning (polisilimon) ulushi umuman oshadi.

25.1. Mono va polikristalli quyosh panellari.

Polikristalli quyosh panellari yoki monokristalli quyosh panellari an'anaviy ravishda tanlashda birinchi savol. Samaradorlikni, xarajatlarni, kerakli modullar sonini, ishlash barqarorligini baholash va taqqoslash. To'lovni qoplash asosan foydalanish shartlariga bog'liq. Fotovoltaik batareyalar parametrlari va imkoniyatlarini to'g'ri baholash ortiqcha to'lovlarni amalga oshirmaslikka va foydali variantni tanlashga imkon beradi.



69-rasm. Quyosh panellari materiallarining qatlamlar bo'yicha miqdori.

Quyosh panellari materiallarining qatlamlar bo'yicha miqdori 69-rasmga keltirigan va xususiyatlari xamda texnologiyasining ahamiyatiga muxim rol tutadi. Quyosh energiyasidan foydalanish, uni elektr energiyasiga aylantirish uchun asosiy qurilmalar plitkalar panellari, modullarga, massivlarga birlashtirilgan maxsus materiallar plitalari. Qurilmalar, shuningdek, batareyalar, fotovoltaiik, fotoelektr elementlari deb ham ataladi, ammo ularni quyosh kollektorlari bilan adashtirmaslik kerak, bular har xil mahsulotlar: birinchisi elektr energiyasini ishlab chiqaradi, ikkinchisi - issiqlik.

Quyosh nurlari (ultrabinafsha) nurlari bilan yoritilgan joyda, ko'pincha uyning tomida joylashgan fotovoltaiik plitalardan yasalgan modullar radiatorni yutadi, bu inverter tomonidan stabilizatorlar, boshqaruvchilar, batareyalar orqali elektr tarmog'iga o'tadigan oqimga aylanadi. xizmat ko'rsatiladigan ob'ekt yoki energiya kompaniyalari tarmog'iga sotish uchun.

Plitalarni yaratish uchun material, texnologiya samaradorlikka, $kVt / soat$ ishlab chiqarishga to'g'ridan-to'g'ri ta'sir qiladi, chunki turli xil tuzilmalar nurlanishni samaraliroq qabul qilib, uni elektr energiyasini ishlab chiqarish jarayonida uzatishi mumkin.

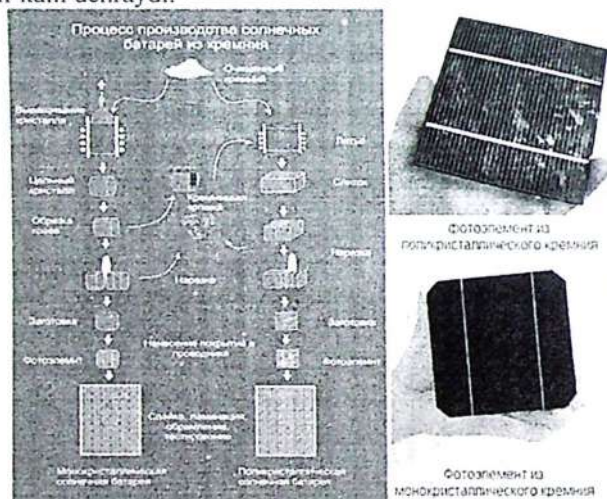
Quyosh panellarinin turlari, mono va polikristal. Quyosh panellarinin turlari:

- kremniy - Si kristallaridan, ma'lum bir mo'rtlikka ega bo'lgan qattiq plitkalar. Standart, an'anaviy mahsulotlar. Eng samarali va,

ehtimol, bitta yuqori samarali echim, agar siz klassik ma'noda yaxshi tizimga ega bo'lsangiz, uni qaytarish, qaytarish bilan mustahkam tizim kerak. Ko'pincha ular "quyosh panellari" atamasi yordamida tushuniladi;

- plyonka - samaradorlik kremniyga qaraganda 3 baravar past, u yopishtirilishi mumkin bo'lgan elastik plyonka. Asosiy afzallik - ulardan foydalanish qulayligi, o'rnatish va shakllarni o'zgartirish qobiliyati. Film quyosh batareyalari yangilikdir, mahsulot yaxshilanishi mumkin, ammo hozirgi paytda ularni jiddiy tizim uchun ko'rib chiqish qiyin. Elastik fotoelektr elementlari kremniynikiga qaraganda ancha qimmat, ular ishlash muddati davomida to'lamaydilar, bu ancha qisqa (10-12 yilga nisbatan 15-20 yil);

- gallium arsenidi, amorf kremniydan - ayniqsa ilg'or texnologiyalar, eng samarali batareyalar, ammo juda qimmat, ular bozorda kamdan-kam uchraydi.



70-rasm. Zamonaviy quyosh panellari materiallarining qatlamlar bo'yicha miqdori.

Si fotovoltaiik batareyalar monokristalli, polikristalli bo'linadi. Panel plitalari Si urug'i atrofida massa hosil qilish orqali hosil bo'ladi - bu ikkita variant o'rtasidagi farqni keltirib chiqaradigan jarayon.

Tugatish bosqichlari bir xil - ular p-, n-birikmalar hosil qiladi, elektr kontaktlarini, oqim o'tkazuvchi liniyalarni o'rnatadi, akslantirish qatlamini qo'llaydi. 70-rasmda zamonaviy quyosh panellari materiallarining qatlamlar bo'yicha miqdori keltirilgan.

Monokristalli batareyalar. 1950-yillarda kremniy monokristallarini yaratish texnologiyasining paydo bo'lishi bilan quyosh energiyasida inqilob boshlandi. Bugungi kunga kelib, bu usul nafaqat samarali va dolzarb, balki ommaviy mahsulot sifatida eng samarali quyosh monopanellarini yaratish uchun yagona hisoblanadi.

Monokristalli quyosh elementlari (mono - bitta), nomidan ko'rinib turibdiki, bitta qattiq kremniy kristalidan iborat.

Mono va poli-fotovoltaik plitkalarini ishlab chiqarish texnologiyasi har xil, shuning uchun ularning har xil xususiyatlari. Birinchi holda, Czochralski usuli qo'llaniladi - kristall asta-sekin eritilgan Si dan o'stiriladi. Tayyor mahsulot ko'rsatilgan element zarrachasidan urug' atrofida o'sadi. Sovutganda silindrsimon geometriyaga ega bo'lgan so'nggi kremniy xujayrasi hosil bo'ladi.

Monokristalli quyosh panellarining o'ziga xos xususiyati soya va tuzilishning bir xilligi bo'lib, u ham yuqori tozaligiga ega kremniyni ko'rsatadi. Narx, samaradorlik - poli va mono-quyosh panellarining asosiy farqi, agar biz ularni umumiy va yuzaki tavsiflasak, lekin bu mezon odatda o'rtacha tanlov protsedurasi uchun asosiy hisoblanadi.

Takrorlash uchun savollar

1. Kristalli kremniyli quyosh elementlarining afzalliklari?
2. Mono va polikristalli quyosh panellari?
3. Monokristalli batareyalar?
4. Zamonaviy quyosh panellari materiallarining qatlamlar bo'yicha miqdori?

26-§. YUPQA QATLAMLI QUYOSH ELEMENTLARI.

Yupqa plyonka texnologiyasi quyosh energiyasi bozorida tobora ommalashmoqda. 71-rasmda yupqa plyonka asosida ishlab chiqarilgan fotoelementning umumiy ko'rinishi keltirilgan.



71-rasm. Yupqa plyonka asosida ishlab chiqarilgan fotoelementning umumiy ko'rinishi.

Hozirgi vaqtda quyosh elementlari ishlab chiqarishning taxminan 80-85% kristalli modullarga to'g'ri keladi. Ammo ushbu soha mutaxassislarning ishonchlariga ko'ra kelajak ingichka plyonka texnologiyasiga tegishli. Uning etakchi mavqeini ta'minlay oladigan asosiy afzalligi uning arzonligi. Yupqa plyonkali texnologiyadan foydalangan holda ishlab chiqarilgan modullar egiluvchanligi va kam og'irligi tufayli quyosh modullarini har qanday sirtga o'rnatib, hatto kiyimga tikib qo'yishiga imkon beradiganligi sababli moslashuvchan quyosh panellari deb nomlanadi.

Moslashuvchan modullarni ishlab chiqarish uchun polimer materiallardan, amorf kremniydan, alyuminiydan, kadmiy tellurididan va boshqa yarimo'tkazgichlardan plyonkalar ishlatiladi. Ko'pincha ular portativ zaryadlovchi qurilmalar, ya'ni katlanabilan quyosh batareyalari, noutbuklar, videokameralar, uyali telefonlar va yuqori quvvat talab qilmaydigan boshqa elektronika uchun ishlatiladi. Katta miqdordagi energiya ishlab chiqarish uchun katta modul maydoni ham kerak bo'ladi.

Yupqa plyonka texnologiyasi haqida ko'proq ma'lumot. Dastlabki yupqa plyonkali quyosh elementlari amorf kremniy yordamida yaratilgan bo'lib, ular substrat yuzasida yupqa qatlamga yotqizilgan. Ularning samaradorligi atigi 4-5% ni tashkil etdi va xizmat muddati

juda ko'p narsalarni qoldirdi. Amorf modullarning ikkinchi avlodi allaqachon 2-3% yuqori samaradorlikka ega edi va ularning ishlash muddati deyarli kristalli modullarning ishlash muddatiga teng edi. Ammo uchinchi avlod modullarning samaradorligi allaqachon 12% gacha ko'tarildi. Demak, taraqqiyot yuzda.

Katlanadigan quyosh elementlari va katta o'lchamdagi egiluvchan modullarni ishlab chiqarishda kadmiy tellurid va mis-indiy selenid ko'pincha ishlatiladi. Ushbu yarim o'tkazgichlardan foydalanish samaradorlikni 5 dan 10% gacha oshiradi. Va fiziklar har bir qo'shimcha foiz uchun kurashayotganini hisobga olsak, farq juda sezilarli. Yupqa plyonka texnologiyasidan foydalangan holda quyosh batareyalarini ishlab chiqarish haqida ko'proq bilib oling.

Yupqa plyonkali batareyalarning xususiyatlari:

- Ular tarqoq nurda ham yaxshi ishlaydi, shuning uchun yillik quvvatning umumiy hajmi kristalli modullarga qaraganda 10-15% ko'proq.

- Ishlab chiqarishning arzonligi, shuning uchun ushbu turdagi quyosh panellari sizga arzonga tushadi.

- Ular 10 kVt dan ortiq quvvatga ega tizimlarda katta samaradorlikni namoyish etadi.

- Teng quvvat chiqishi bilan yupqa plyonkali modullarning maydoni kristalnikidan 2,5 baravar katta.

- Yuqori kuchlanishli tekshirgichlar va invertorlardan foydalanishni talab qiladi.

Yupqa plyonkali modullardan foydalanish asosli bo'lgan holatlar:

- Bulutli ob-havo hukmron bo'lgan hududlarda. Yupqa plyonkali modullar adashgan yorug'likni yaxshi qabul qiladi.

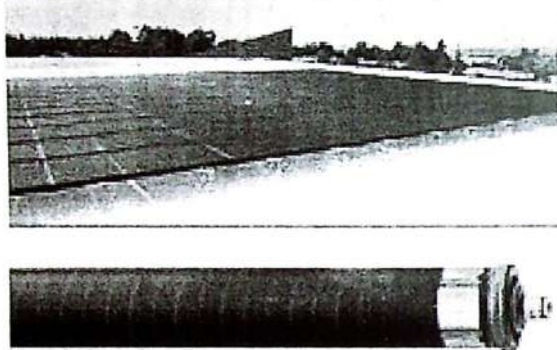
- Issiq iqlimi bo'lgan mamlakatlarda. Yuqori haroratda yupqa qatlamli quyosh elementlari samaraliroq bo'ladi.

- Binoda panellarni o'rnatishga ehtiyoj bor yoki ularni dizayn g'oyalari yoki qurilish echimlari sifatida ishlatish kerak, masalan, jabhada bezatish uchun.

- 20% gacha qisman shaffoflik bilan modullarga ehtiyoj.

26.1. Yassidan silindrsimongacha bo'lgan quyosh elementlari.

Silindrsimon quyosh elementlari birinchi bo'lib Solyndra ("quyosh" va "silindr" so'zlaridan) jozibali nomi bilan Amerikaning kichik kompaniyasi tomonidan ishlab chiqilgan. Ular 2008 yilda o'zlarining yutuqlarini taqdim etdilar va darhol Evropa va Amerika firmalaridan bir nechta yirik buyurtmalarni oldilar. Ularning ishontirishlariga ko'ra, bu ko'rsatkich 1 milliard dollardan oshgan. 72-rasmda silindrsimon quyosh elementlari asosida birinchi fotoelektrik stansiya surati keltirilgan.



72-rasm. Silindrsimon quyosh elementlari asosida birinchi fotoelektrik stansiya.

2008 yilgacha quyosh batareyalari tekis edi. Solyndra, aksincha, quyosh panellariga silindrlil kamerallarni o'rnatishni taklif qildi. Fotoelementning yupqa qatlami shisha naycha yuzasiga surtiladi, shundan so'ng u xuddi shu turdagi boshqa naychaga joylashtiriladi, lekin elektr kontaktlari bilan. Biz uchun allaqachon tanish bo'lgan mis, galliy, selen va indiy elementlar uchun yarimo'tkazgich sifatida ishlatiladi. Silindrsimon quyosh elementlari shakli tufayli ko'proq yorug'likni yutadi va natijada ishlash ko'rsatkichi yuqori bo'ladi. Har bir panel 40 tsilindrdan iborat bo'lib, o'lchamlari 1 dan 2 metrgacha.

Yutilgan yorug'likni ko'paytirish uchun silindrsimon batareyalarni oq tom qoplamasi bilan birgalikda ishlatish tavsiya etiladi. Bunday holda, tomdan aks etgan nurlar silindrlardan o'tadi, bu esa so'rilgan

energiyaning yana 20 foizini beradi. Silindrsimon elementlari bo'lgan batareyalarning yana bir muhim afzalligi - kuchli shamollarga chidamliligi. Ular soatiga 200 km gacha bo'lgan shamolga dosh berishga qodir. Bu quyosh panellarini o'rnatishni osonlashtiradi va arzonlashtiradi.

26.2. Ko'p qatlamli quyosh batareyalari.

Hozirgi vaqtda ishlab chiqarilgan quyosh batareyalarining ko'pchiligida bitta pn birikmasi mavjud. Ya'ni, bunday elementdagi erkin elektronlar faqat energiyani tarmoqli bo'shliqdan katta yoki unga teng bo'lgan fotonlarni yaratadi. Ushbu cheklovni bartaraf etish uchun olimlar quyosh elementlarining kaskadli xujayralar deb nomlangan yangi turini ishlab chiqdilar. Ular quyosh elementlaridan tashkil topgan ko'p qatlamli tuzilishga ega, ularning tarmoqli oralig'i boshqacha.

Kaskadli xujayralardan foydalangan holda ishlab chiqarilgan eng istiqbolli egiluvchan quyosh elementlari 3 pn birikmaga ega. Yuqori qavat a-Si: H asosidagi qotishmadan hosil bo'ladi, ikkinchisi uchun a-SiGe: H qotishmasi ishlatiladi, tarkibida 10-15% germaniy bor, uchinchi qavat uchun germaniyni qotishmadagi ulushi 40-50% gacha. Har bir keyingi qatlam bilan tarmoqli oralig'i kamayadi, shuning uchun har bir keyingi qatlam oldingisidan o'tgan fotonlarni o'zlashtiradi. Quyidagi 9-jadvalda kaskadli quyosh batareyalarining samaradorlik ko'rsatkichlari keltirilgan. Shunisi e'tiborga loyiqki, bunday yuqori samaradorlik darajasi kristalli kremniyga asoslangan quyosh elementlari bilan taqqoslaganda olingan quyosh energiyasi narxini deyarli 2 baravar kamaytirishi mumkin.

9-jadval.

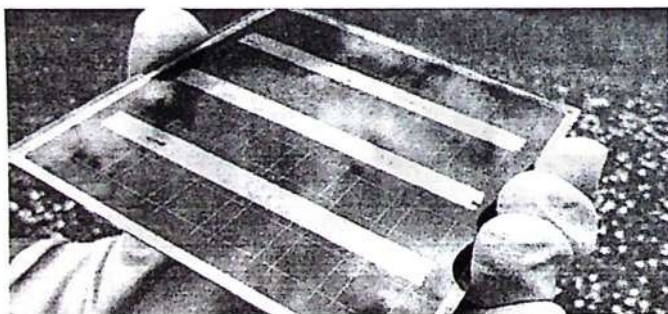
p-n-o'tishli qatlamlar soni	Samaradorlikning nazariy qiymati	Kutilayotgan samaradorlik	Amalga oshirilgan samaradorlik qiymati
1 p-n-o'tishli	30	27	25,1
2 p-n- o'tishli	36	33	30,3
3 p-n- o'tishli	42	38	31,0
4 p-n- o'tishli	47	42	—
5 p-n- o'tishli	49	44	—

26.3. Yupqa plyonkali modullar dunyosidagi eng qiziqarli yutuqlar.

2 yil oldin Moskva davlat universiteti laboratoriyasi mutaxassislari faol qatlam va egiluvchan organik substrat sifatida polimer asosida rulonli organik quyosh elementlarini ishlab chiqdilar. Ularning samaradorligi atigi 4% ni tashkil etdi, ammo ular 80 ° C haroratda 10 ming soat davomida samarali ishlashlari mumkin edi. Bu ularning faoliyati bilan tugamaydi, izlanishlar davom etmoqda, asosiy e'tibor polimer materiallari asosida quyosh elementlariga qaratilgan.

Shveysariyadagi Texnologiyalar va Materialshunoslik Federal Laboratoriyasining mutaxassislari polimer substratda 20,4% samaradorlik bilan quyosh batareyasini yaratdilar. Yarimo'tkazgich sifatida to'rtta element ishlatilgan: selen, indiy, gallyi va mis. Bugungi kunga kelib, bu ro'yxatdagi elementlarga asoslangan SE uchun rekord ko'rsatkich. Avvalgi rekord 18,7 foizni tashkil etgan.

73-rasmdagi indiy, selen va misga asoslangan yupqa plyonkali fotoelementlar uchun bugungi kunda maksimal samaradorlik ko'rsatkichi 19,7% ni tashkil qiladi. Ushbu ko'rsatkichga Yaponiyaning Solar Frontier kompaniyasi erishdi. Yutish plyonkalari selenyum bug'ida issiqlik bilan ishlov berish yordamida puskurtme usuli bilan fotoelementlarga joylashtirildi.



73-rasm. Indiy, selen va misga asoslangan yupqa plyonkali fotoelement

ICP Solar Technologies asl katlanabilen quyosh panelini taqdim etdi. Uni quyoshli joyda aylantirish kifoya va siz quvvat oladigan qurilmani ulashingiz mumkin. Batareya quvvati 12 V kuchlanishdagi 5

Vtni tashkil etadi, rozi bo'ling, ammo bu barcha sayyohlar uchun almashtirib bo'lmaydigan imkoniyatdir. Bunday ko'chma SBni ishlab chiqarish bilan turli firmalar shug'ullanadi. Maksimal quvvati 190 vatt bo'lgan katlanabilen quyosh batareyalari buklanuvchi quyosh batareyasi juda mashhur.

Eng qiziqarli rivojlanishni "mato" quyosh panellari deb atash mumkin. Yapon olimlari atigi 1,2 mm o'lchamdagi mayda silindrsimon quyosh elementlari va mato matoni birlashtirishga qaror qilishdi. Ushbu noodatiy echim kiyim va ko'chma tentlar uchun yuqori texnologik materiallarni yaratishga imkon beradi. "Quyosh" matoning sanoat ishlab chiqarilishi 2015 yil mart oyida rejalashtirilgan.

Yupqa plyonka texnologiyasi quyosh batareyalarini ishlab chiqarishda birinchi o'rinni egallaydimi, kelajak buni ko'rsatadi. Ammo bu sohada olib borilgan faol tadqiqotlar va yaxshi natijalarga ko'ra, yaqin kelajakda olimlar nafaqat samarali quyosh panellarini yaratib berishlari mumkin, balki ayni paytda u umumiy aholi uchun juda qulaydir.

Takrorlash uchun savollar

1. Yupqa qatlamli quyosh elementlari?
2. Yupqa plyonkali batareyalarning xususiyatlari?
3. Yassidan silindrsimongacha bo'lgan quyosh elementlari?
4. Ko'p qatlamli quyosh batareyalari

27-§. QUYOSH ELEMENTLARIDA QO'LLANILADIGAN YUPQA QATLAMLARNING FIZIK XOSSALARI.

Quyosh hujayralarini ishlab chiqarish usullari. Quyosh batareyalarining 85% dan ortig'i mono va poli kremniydan ishlab chiqariladi. Ularni ishlab chiqarish texnologiyasi ancha qiyin, uzoq muddatli va energiya talab qiladigan darajada.

Quyosh monokristalli elementlarini ishlab chiqarishning asosiy bosqichlari:



74-rasm. Monokristalli homashyosi

"Fotoelement monokristalli" kremniyini olish. Xom ashyo sifatida kremniy dioksid (SiO_2) ning yuqori massaviy tarkibiga ega bo'lgan kvarts qumi ishlatiladi. Kisloroddan xalos bo'lish uchun ko'p bosqichli tozalashdan o'tadi. Bu yuqori haroratli eritish va kimyoviy moddalar qo'shilishi bilan sintez qilish orqali sodir bo'ladi. 74-rasmda fotoelement monokristalli homashyosining umumiy ko'rinishi keltirilgan.

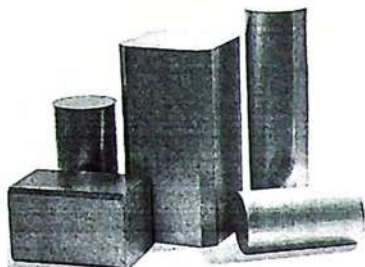
O'sib boruvchi kristallar. Qayta qilingan kremniy shunchaki tarqoq bo'laklardir. Strukturani buyurtma qilish uchun kristallar Czochralski usuli bilan o'stiriladi. Bu shunday bo'ladi: kremniy bo'laklari krujkaga joylashtiriladi, u yerda ular isitiladi va eritiladi. Eritma ichiga urug'tashlanadi - shunday qilib aylantirganda, kelajakdagi kristalning namunasi. Aniq tuzilishga joylashtirilgan atomlar urug'qatlamida qatlam-qatlam bo'lib o'sadi. O'sish jarayoni uzoq, ammo natijada katta, chiroyli va eng muhimi bir hil o'lchamli kristal hosil bo'ladi.

Saralash. Ushbu bosqich kerakli kristalni berish uchun bitta kristalni o'lchash, kalibrlash va qayta ishlashdan boshlanadi. Haqiqat shundaki, krujkani kesmada qoldirganda, u yumaloq shaklga ega, bu keyingi ish uchun juda qulay emas. Shuning uchun unga psevdokvadrat shakli berilgan. Bundan tashqari, karbid - kremniy suspenziyasi yoki olmos singdirilgan simga po'lat iplari bilan qayta ishlangan bitta kristall qalinligi 250-300 mikron bo'lgan plitalarga kesiladi. Ular tozalanadi, nuqsonlari va ishlab chiqarilgan energiya miqdori tekshiriladi.



75-rasm. Czochralski usuli bilan o'stirilgan monokristall

Fotovoltaik 75-rasmda Czochralski usuli bilan o'stirilgan monokristallni yaratish. Bor (B) va fosfor (P) kremniyga qo'shilib, energiya ishlab chiqaradi. Shu sababli, fosfor qatlami erkin elektronlarni (n-turi tomoni), bor tomoni - elektronlarning yo'qligini oladi, ya'ni. teshiklari (p-turi tomoni). Shu sababli fosfor va bor o'rtasida p-n o'tish paydo bo'ladi. Yorug'lik hujayraga tushganda, elektr toki hududida paydo bo'ladigan atom panjarasidan teshiklar va elektronlar urib tushiriladi, ular o'zlarining zaryadlari yo'nalishi bo'yicha tarqaladilar. Agar siz tashqi o'tkazgichni ulasangiz, ular plitaning boshqa qismidagi teshiklarni qoplashga harakat qiladilar, kuchlanish va oqim paydo bo'ladi. Uning rivojlanishi uchun plastinkaning ikkala tomonida o'tkazgichlar lehmlangan. 76-rasmda Czochralski usuli bilan o'stirilgan monokristallni mexanik ishlov berilgandan keying holati keltirilgan.



76-rasm. Czochralski usuli bilan o'stirilgan monokristallni mexanik ishlov berilgandan keying holati.

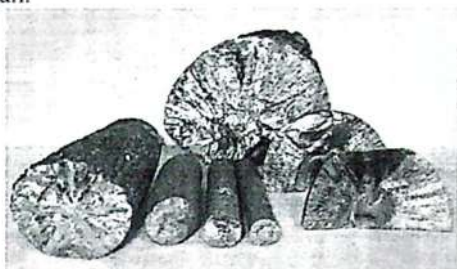
Modullarni yaratish. Plitalar avval zanjirlarga, so'ngra bloklarga ulanadi. Odatda bitta plastinkada 2 Vt quvvat va 0,6 V kuchlanish mavjud. Hujayralar qancha ko'p bo'lsa, batareya shunchalik kuchli bo'ladi. Ularni ketma-ket ulash ma'lum bir kuchlanish darajasini beradi, parallel hosil bo'lgan oqim kuchini oshiradi. Butun modulning kerakli elektr parametrlariga erishish uchun ketma-ket va parallel ulangan elementlar birlashtiriladi. Keyinchalik, hujayralar himoya plyonka bilan qoplanadi, shishaga o'tkaziladi va to'rtburchaklar ramkaga joylashtiriladi, aloqa qutisi birlashtiriladi. Tayyor modul so'nggi sinovdan o'tadi - volt-amper xususiyatlarini o'lchash. Hammasidan foydalanish mumkin!

Quyosh panellarining o'zlari ham kerakli oqim va kuchlanishni olish uchun ketma-ket, parallel yoki ketma-ket parallel bo'lishi mumkin.

Avtomatik yig'ilish bosqichlari to'g'risida vizual video, shu jumladan: lehimleme, laminatlash, katakchalarni almashtirish, aloqa qutisini o'rnatish, shisha va alyuminiy ramka:

Polikristalli batareyalarni ishlab chiqarish faqat kristall o'sishi bilan farq qiladi. Bir nechta ishlab chiqarish usullari mavjud, ammo hozirgi kunda eng ommabop va umumiy ishlab chiqarishning 75 foizini egallagan Siemens - bu jarayondan foydalanib kelmoqda. Usulning mohiyati vodorod va silanning bug'-gaz aralashmasi bilan 650-1300 ° S gacha qizdirilgan kremniy quymalarining yuzasi bilan o'zaro ta'siri natijasida silanni kamaytirish va erkin kremniyni cho'ktirishdan iborat. Bo'shatilgan kremniy atomlari daraxtga o'xshash (dendritik) tuzilishga ega bo'lgan kristall hosil qiladi. 77-rasmda bo'shatilgan kremniy

atomlari daraxtga o'xshash (dendritik) tuzilishga ega bo'lgan kristall holati keltirilgan.



77-rasm. Bo'shatilgan kremniy atomlari daraxtga o'xshash (dendritik) tuzilishga ega bo'lgan kristall holati.

Yupqa plyonkali batareyalar asosan bug'lanish fazasi texnikasi yordamida ishlab chiqariladi. Amorf fotokonvertorlar uchun xom ashyo silan (silan, $\text{SiH}_2\text{n} + 2$). U 1 mikrondan kam qatlam bilan substrat materialiga (shisha, keramika, metall yoki polimer lentalar va boshqalar) püskürtülür. Amorf kremniydagi vodorod (5-20%) uning elektrofizik xususiyatlarini o'zgartiradi va unga yarim o'tkazgich fazilatlarini beradi.

Amorf konvertorlarni ishlab chiqarish kristalliga qaraganda ancha sodda: maydoni 1 m dan ortiq bo'lgan plitalar faqat 250-400 ° S gacha bo'lgan cho'kindi haroratlarda osonlikcha yaratiladi. Bundan tashqari, ularning yarimo'tkazgich xususiyatlarini kerakli parametrlarni olish uchun plyonka tarkibiy qismlarining birikmalarini tanlash orqali boshqarish mumkin.

Quyosh CIGS batareyalarini ishlab chiqarish texnologiyasi, shuningdek, yarim o'tkazgichlarni yotqizishdan iborat. Bu vakuum kameralari va elektron qurollar yordamida amalga oshiriladi. Mis (Cu), indiy (In) yoki galyum (Ga) molibden qatlami bilan qoplangan shisha substratga ketma-ket yotqizish yo'li bilan yotqiziladi. Olingan struktura selen (Se) bug'i bilan ishlanadi.

CIGS batareyalarini tayyorlashning yana bir usuli bor - ekranli bosib chiqarish yoki siyoh purkagich. Bu metall oksidi zarralari suspenziyasidan foydalanishga asoslangan. Uning yopishqoqligi, go'yo bosib chiqarish uchun siyoh olishga imkon beradi. "Qog'oz" turli xil materiallar bo'lishi mumkin: shisha, folga, plastmassa.



78-rasm. Kremniy kristallni etishtirish sxema

Yupqa plyonkali batareyalarni ishlab chiqarish uchun ekranli bosib chiqarish usuli faqat taniqli "quyosh" ishlab chiqaruvchilari tomonidan qo'llaniladi. Bu materiallardan yuqori foydalanish darajasi (90% dan), uskunalarining qiyosiy arzonligi va tayyor mahsulotning yaxshi samaradorligi - 14% kabi afzalliklarga ega.

Galliy arsenid kristallarini ishlab chiqarish, xuddi kremniyning yagona kristallari singari, Chexralskiy usuli bilan - gorizontaal yoki vertikal yo'naltirilgan kristallanish orqali amalga oshirilishi mumkin. Kristallar ularni katta miqdordagi eritmaning erkin yuzasidan tortib olish orqali urug'kristalini olib kelib kristallanish boshlanishini boshlaydi. 78-rasmda kremniy kristallni etishtirish sxemalari ko'rsatilgan.

Quyosh batareyasining fizik printsipli. FEBda energiyani konversiyasi quyosh nurlari ta'sirida bir hil bo'lmagan yarimo'tkazgichli inshootlarda yuzaga keladigan fotovoltaik ta'sirga asoslangan.

Ushbu hodisaning tabiati. FEB strukturasining bir xil emasligini bir xil yarimo'tkazgichni har xil aralashmalar bilan doping qilish (p - n birikmalar hosil qilish) yoki turli yarimo'tkazgichlarni teng bo'lmagan energetik bo'shliq-atom bilan atomlarning ajralib chiqish energiyasi (geterofunksiyalar yaratish) bilan birlashtirish yoki olish orqali olish mumkin. yarim o'tkazgichning kimyoviy tarkibi, bu tarmoqli oralig'ining gradiyenti paydo bo'lishiga olib keladi (gradusli bo'shliqli tuzilmalarni yaratish). Yuqoridagi usullarning turli xil kombinatsiyalari ham mumkin.

Konvertatsiya qilish samaradorligi bir hil bo'lmagan yarimo'tkazgich strukturasining elektrofizik xususiyatlariga, shuningdek, quyosh panellarining optik xususiyatlariga bog'liq bo'lib, ular orasida

nur o'tkazganda yarimo'tkazgichlarda ichki fotoelektrik ta'sir hodisalari tufayli eng muhim rol fotokondüktivlik o'ynaydi. quyosh nuri.

Quyosh elementlarining ishlash printsipini zamonaviy quyosh va kosmik energetikada keng qo'llaniladigan p-n-birikmasi bo'lgan konvertorlar misolida tushuntirish mumkin. Elektron-teshikli birikma bir kristalli yarimo'tkazgichli materialning ma'lum bir o'tkazuvchanlik turiga (ya'ni, p- yoki n-tipdagi) kirishma bilan plastinasini doping yordamida hosil bo'ladi, bu esa aksincha bo'lgan sirt qatlamini yaratishni ta'minlaydi. o'tkazuvchanlik turi. U erda mavjud bo'lgan asosiy erkin zaryad tashuvchilarni zararsizlantirish va qarama-qarshi belgining o'tkazuvchanligini yaratish uchun ushbu qavatdagi dopantning konsentratsiyasi asosdagi (asl yagona kristalli) materialdagi kirishma konsentratsiyasidan ancha yuqori bo'lishi kerak. N-qatlamda kompensatsiyalanmagan musbat hajmli zaryad va p-qavatdagi salbiy hajmli zaryadga ega bo'lgan tükenme zonalari, zaryad oqimi natijasida n va p qatlamlari chegarasida hosil bo'ladi. Ushbu zonalar birgalikda p-n-birikmani hosil qiladi.

O'tish paytida yuzaga keladigan potentsial to'siq (kontakt potentsiali farqi) ko'pchilik zaryad tashuvchilarning o'tishiga to'siqlik qiladi, ya'ni. p-qatlam tomonidan elektronlar, ammo ozchilik tashuvchilar qarama-qarshi yo'nalishlarda erkin o'tishadi. PV-ni quyosh nuri bilan nurlantirish orqali foto-emf olish imkoniyatini aniqlaydigan p-n birikmalarining bu xususiyati.

FEBning har ikki qatlamida yorug'lik natijasida hosil bo'lgan muvozanatsiz zaryad tashuvchilar (elektron teshik juftlari) p-n-o'tish joyida ajratiladi: ozchilik tashuvchilar (ya'ni elektronlar) o'tish joyidan erkin o'tishadi, asosiy tashuvchilar (teshiklar) esa kechiktiriladi. Shunday qilib, quyosh nurlanishining ta'siri ostida muvozanatsiz ozchilik zaryad tashuvchilar oqimi, fotoelektronlar va teshiklar p-n birikmasi orqali ikkala yo'nalishda ham oqadi, bu esa FEB ishlashi uchun zarur bo'lgan narsadir. Agar biz endi tashqi zanjirni yopadigan bo'lsak, unda n-qavatdagi elektronlar, yuk ustida ish olib borgan holda, p-qavatiga qaytadi va u erda FEB ichida teskari yo'nalishda harakatlanadigan teshiklar bilan birlashadi (birlashadi). FEB ning yarimo'tkazgich strukturasi yuzasida elektronlarni yig'ish va tashqi zanjirga olib tashlash uchun aloqa tizimi mavjud. Konverterning old

tomonida yoritilgan yuzasida, kontaktlar panjara yoki taroq shaklida amalga oshiriladi va orqa yuzada ular mustahkam bo'lishi mumkin.

FEBdagi qaytarib bo'lmaydigan energiya yo'qotishlari quyidagilar bilan bog'liq:

- proyektor yuzasidan quyosh nurlanishining aks etishi,
- FEB orqali nurlanishning bir qismi uning ichiga singib ketmasdan o'tishi,
- ortiqcha foton energiyasini panjaraning termal tebranishlariga sochish,
- hosil bo'lgan fotokupllarning yuzalarida va FEB hajmida rekombinatsiyasi,
- konvertorning ichki qarshiligi,
- va boshqa ba'zi jismoniy jarayonlar.

28-§. MIS SULFID ASOSIDAGI QUYOSH ELEMENTLARI.

Geterostrukturaga asoslangan mis sulfidi - kadmiy sulfide. Yupqa plyonkali quyosh elementlari orasida yetakchi o'rinni AlIBYI birikmalarining yupqa plyonkalari, xususan kadmiy sulfidiga asoslangan turli xil heterostrukturalar egallaydi [169, 170]. Ushbu yarimo'tkazgich materialidan tayyorlangan birinchi quyosh elementlarida [171] kumush, mis, oltin yoki platinaning yarim shaffof qatlamlari ajratib turuvchi to'siq hosil qilish uchun kadmiyum sulfid yuzasiga yotqizilgan. Deyarli barcha keyingi quyosh elementlari mis sulfidi - kadmiyum sulfidli heterojuntsiya asosida olingan; bundan tashqari, mis sulfid kimyoviy reaksiya jarayonida kadmiy atomlarini mis atomlariga almashtirish orqali hosil bo'lgan (90-95 °S haroratda). monoxlorid mis bilan kadmiy sulfidini [172, 173] yoki qattiq fazada [174]. Ikkinchi holda, mis monoxloridi vakuumda puskurterek kadmiyum sulfid plyonkalari yuzasiga oldindan yotqizilgan.

Birinchi usul "nam" deb nomlanadi. U ishlatilganda Quyosh elementlari yuzasi va geterojunksiyaning o'zi kimyoviy zarb paytida ko'paygan donlarning ko'plab depressiyalari va o'simtalarini tufayli rivojlangan xususiyatga ega. Ushbu holat quyosh elementlari yuzasidan yorug'likning aks etish koeffitsientini pasaytiradi, ammo teskari to'yinganlik oqimini oshiradi.

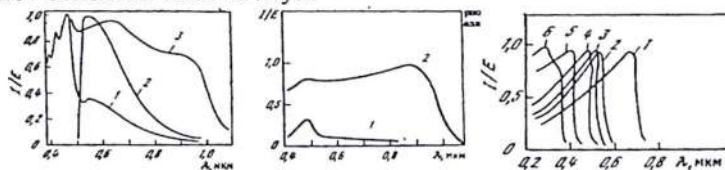
"Quruq" deb nomlangan ikkinchi usulga ko'ra deyarli tekislikdagi heterojunksiya hosil bo'ladi, substratga nisbatan tekis-parallel, ammo qattiq fazada reaksiya paytida olingan mis sulfidli plyonkalarining nurga nisbatan sezgirligi plyonkalarining nurlanishidan bir oz pastroq. "ho'l" usul bilan hosil bo'lgan.

Keng tarqalgan mis sulfidiga asoslangan yupqa plyonkali quyosh elementlarining ikki turi mavjud - kadmiy sulfidli geterosistema: orqa to'siq va old to'siq [13, 19].

Old to'siqni loyihalashda kadmiyum sulfid plyonkasi yarim-yopiq hajmda vakuumda, molibden plyonkasi, polimid plyonkasi yoki rux bilan qoplangan mis plyonkaning 200-300 °C gacha qizdirilgan substrat ustiga yotqiziladi. qatlam. Keyin "quruq" u - yuzlab angstromlar; 3 - minglab angstromlar

79-rasm. Mis sulfid-kadmiyum sulfidli heterosistemaga asoslangan oldingi to'siqli quyosh xujayrasining spektral sezgirligi yotqizilgan mis

tokini yig'uvchi kontaktlari bilan u 2 - navbati bilan issiqlik bilan ishlov berishdan oldin va keyin



79-rasm. Selenid (1) va sulfid (2-6) mis qatlamlarini vakuumli bug'lanishi natijasida hosil bo'lgan oldingi to'siqli quyosh elementlarining spektrga sezgirliги har xil yarimo'tkazgich birikmalarining asosiy qatlamlarida.

Zf 2 — CdS, 3 — Zn iCdo,9S,
4 — ZnO isCdo'ssS, 5 — ZnO 4Cdo eS,
6 — ZnS

yoki "ho'l" usul mis sulfid qatlamini hosil qiladi. Ushbu qatlam bilan aloqa stencil niqoblari orqali vakuumda bug'langan mis chiziqlar panjarasi shaklida qo'llaniladi yoki o'tkazuvchan pasta yordamida (yoki uni himoya polimer plyonkasining yopishqoq qatlami bilan bosish orqali oltin bilan qoplangan mis to'rti yopishtirish orqali hosil bo'ladi)).

Orqa to'siqli quyosh elementlarini ishlab chiqarishda kadmiy mis sulfid qatlami xuddi shu tarzda isitiladigan shisha plyonkada yoki shaf-fof o'tkazuvchan qatlamli SnO_2 va indiy Ip_2Os (ITO) oksidi oksidlari qatlami yoki kadmiy mis stannat Cd_2SnO_4 bilan shisha plastinkada qo'llaniladi [175], shuningdek, mis sulfidi - sulfidli heterojunksiya yaratildi kadmiy va bu holda mis sulfid qatlami bilan aloqa doimiy bo'lishi mumkin, mis qatlamining bug'lanishi natijasida olinadi, chunki orqa to'siqli ingichka plyonka elementi yoritilgan. shisha tomondan.

Kadmiy sulfid qatlamining qalinligi odatda 2 dan 40 μm gacha, mis sulfid qatlami 0,05 dan 0,15 μm gacha. Mis sulfidining 1,2 eV, kadmiy sulfidining 2,4 eV tarmoqli oralig'i [176];

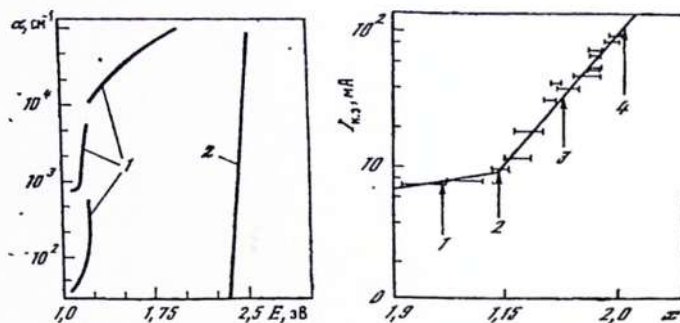
qisqa to'lqinli mintaqadagi orqa to'siq elementlarining spektral sezgirliги (79-rasm, egri chiziq 2) yo'q - bu holda kadmiy sulfidining nurga nisbatan yuqori qatlami deyarli barchasini yutib yuboradigan oyna filtri vazifasini bajaradi. to'lqin uzunligi 0,5 μm dan kam bo'lgan nurlanish. Mis sulfidi bilan kadmiy mis sulfidli geterosistema

(egri 1) va orqa to'siqli quyosh xujayrasi (egri 2) asosidagi oldingi to'siqli quyosh xujayrasining spektral sezgirligi mis sulfid bilan "nam" usulda ishlab chiqarilgan elementlar uchun olingan. bir necha yuz angstrom qalinligi qatlami [177]. Mis sulfid qatlamining qalinligi 0,15 mkm ga oshishi bilan bir qator ishlarda olib borilgan o'lchovlar ko'rsatilgandek, spektrning uzun to'liqlik mintaqasidagi oldingi to'siqli elementlarining spektral sezgirligi [138, 172, 178], keskin ortadi (79-rasmga qarang, egri chiziq 3) ... Mis sulfidi - kadmiy sulfidli geterosistemaga asoslangan old to'siqli quyosh xujayrasining spektral sezgirligiga ta'sir issiqlik ta'sirida, hujayra ishlab chiqarilgandan va uning ishchi yuzasida mis mis chiziqlar bilan yotqizilgandan so'ng amalga oshirildi. 79-rasm [179].

Ehtimol, issiqlik bilan ishlov berish jarayonida mis atomlarining kontaktlardan elementlarning sirt qatlamiga tarqalishi mis sulfid qatlamining stokiometrik tarkibini ham, uning nurga sezgirligini ham yaxshilaydi. Issiqlik bilan ishlov berishdan oldin Elementlarning uzun to'liqlik uzunlikdagi sezgirlik chekkasining holati (79-rasmga qarang, 1-egri chiziq) kadmiy sulfidning yutilish chekkasiga to'g'ri keladi (Eg = 2.4 eV). Bu shundan dalolat beradiki, mis sulfidi - kadmiy sulfidli geterosistemi asosidagi old to'siqli quyosh elementlarining sezgirligi qisqa to'liqlik uzunligi kadmiy sulfidiga bog'liq bo'lib, mis sulfid qatlami boshqa barcha spektral diapazonlarda sezgirlik uchun javobgardir. Yarim shaffof mis plyonkani elementlar yuzasiga oldindan cho'ktirishdan keyin issiqlik bilan ishlov berish ta'sirining xuddi shunday o'sishi ham qayd etilgan [138].

Bunday quyosh xujayrasi modeli va uning mis sulfidida yorug'likni deyarli to'liqlik yutishiga asoslangan lenta diagrammasi Ref [176, 180] da keltirilgan. Degenerativ $p \sim \text{Cu}_2\text{S-CHoe}$ nurida hosil bo'ladi (undagi akseptorlarning rolini mis bo'shliqlari bajaradi, bu qatlamni teshik konsentratsiyasiga $10^{43} \text{ sm}^{-3} \sim 3$ tushirish) ortiqcha ozchilik zaryad tashuvchilar - elektronlar heterojunksiya orqali tarqaladi yoki ular kosmik zaryad qatlami maydoni tomonidan kadmiy sulfidiga o'tkaziladi. Mis sulfidining ushbu turdagi quyosh elementlari tomonidan hosil bo'lgan fototokga ustun ta'siri haqidagi taxmin elementlarning sirtini maydalash jarayonida ushbu qatlamni bosqichma-bosqich olib tashlash bo'yicha tajribalar bilan tasdiqlandi va ularning uzoq muddatli pasayishi kuzatildi. to'liqlik uzunligiga sezgirlik.

Kadmiy sulfid qatlamlari yuzasida vakuumda yotqizilgan mis sulfidli plyonkalar, issiqlik bilan ishlov berishdan oldin, deyarli sezgirlikka ega emas va faqat shaffof bo'lib xizmat qilishi mumkin.



80-rasm. Mis sulfid - kadmiy sulfidli geterosistemaga asoslangan old to'siqly yupqa plyonkali elementning qisqa tutashuv tokining misning tarkibidagi bog'liqligi.

1 - durlit + digenit; 2 - durlit; 3 - xalkotsit-durlit; 4 - xalkotsit

Mis sulfid (1) va kadmiy sulfidning (2) yutilish koeffitsientining tok yig'uvchi kontaktlarning geterojunksiyaga spektral bog'liqligi [181]. Bunday holda, elementlarning sezgirligi deyarli butunlay asosiy qatlamning tarkibi va xususiyatlari bilan belgilanadi, masalan, masalan, $E_g = 3.66$ bo'lgan sink sulfid kabi keng bo'shliqli yarimo'tkazgichli materialning ma'lum miqdorini qo'shish orqali. eV dan tsadmiy sulfidiga [170]. Vakuumli yotqizilgan mis sulfidli qatlamlarning bu xususiyati silliq o'zgaruvchan spektral sezgirlikka ega bo'lgan ultrabinafsha va ko'rinadigan nurlanish detektorlarini yaratish uchun ishlatilgan (79-rasm) [181]. Mis sulfid qatlamining tarkibi asosan mis sulfidi - kadmiy sulfidli geterosistemaga asoslangan yupqa plyonkali quyosh elementlarining qisqa tutashuv tokining qiymatini aniqlaydi [138]. Bunday quyosh elementlarining $I_{k,3}$ ning mis sulfid qatlamidagi mis tarkibiga ($a: Cu * S$ formulasida) va birikmaning strukturaviy tarkibiga eksperimental bog'liqligidan (80-rasm) u Ushbu tuzilmaning yuqori sifatli quyosh elementlarini olish uchun kadmiy

sulfid yuzasida mis sulfid qatlamini hosil qilish uchun harakat qilish kerak, bu tarkibida xalkotsitga yaqinroq bo'lishi mumkin.

[182] yilda shunga o'xshash bog'liqlik a: $Cu * S$ formulasida mis sulfidi - kadmiyum sulfid tizimidagi quyosh elementlarining ochiq kuchlanish kuchlanishi uchun berilgan.

Mis sulfid qatlamining ushbu strukturaning yupqa plyonkali quyosh elementlarining xususiyatlariga bunday aniq ta'siri bilan bog'liq holda, tadqiqotchilarning katta e'tiborini o'rganish ularning asosida past rentabellikga ega bo'lgan (monokristalli kremniy yoki gallyum arsenidli quyosh elementlaridan ishlab chiqarilgan batareyaning samaradorligi bilan taqqoslaganda) moslashuvchan quyosh elementlarini yaratish imkoniyati to'g'risida, ammo kuch va vazn nisbati juda yuqori.

Takrorlash uchun savollar

1. Mis sulfid asosidagi quyosh elementlari kamchiliklari va yutug'lari?
2. Mis sulfid asosidagi quyosh elementlarining elektrofizik parametrlarini aniqlash?

29-§. AMORF KREMNIY ASOSIDAGI QUYOSH ELEMENTLARI.

Amorf kremniy yupqa plyonkali fotovoltaik modular. Amorf kremniy modullari bo'lgan quyosh xujayrasining misoli Yupqa plyonka texnologiyasi hozirgi kunda dunyoda ishlab chiqarilgan barcha quyosh modullarining 83 foizga yaqini kristalli bo'lishiga qaramay, ko'pincha fotovoltaik energiyaning kelajagi sifatida qaraladi. Biroq, yupqa plyonkali modul texnologiyasi juda tez va bir necha yo'nalishda rivojlanmoqda. Tijoratlashtiriladigan birinchi ingichka plyonkali modul texnologiyasi amorf kremniy plyonka edi. 3-avlodning modullari allaqachon ishlab chiqilgan. Bir kavşaklı quyosh batareyalari bo'lgan birinchi avlod qisqa muddatli (10 yilgacha) va samaradorligi 4-5% ga ega edi. Ikkinchi avlodda ham bitta birikma elementlari bo'lgan, ammo ularning ishlash muddati deyarli kristalli elementlarning ishlash muddatiga teng edi va samaradorlik 6-8% ni tashkil etdi. Uchinchi avlod eng zamonaviy ko'p qirrali yupqa plyonkali elementlarni o'z ichiga oladi, ular uzoq umr ko'rish bilan yanada yuqori samaradorlikka (12% gacha) erishishga imkon beradi. Bu biz sotadigan 120 Vt quvvatli fotovoltaik mikromorfik tandemli quyosh modullari.

Shuningdek, amorf va kristalli modullarning afzalliklarini birlashtirgan gibrid amorf-kristalli modullar mavjud. Rossiyada bunday ko'p tarmoqli heterostruktura modullari Hevel Solar tomonidan ishlab chiqariladi. Biroq, hozirgi vaqtda bunday modullar qimmatga tushadi va deyarli sotish uchun mavjud emas.

Agar siz ingichka plyonkali modullarga qiziqsangiz (masalan, ularning afzalliklari sizni quyida keltirilgan), hozirgi vaqtda amorf kremniyning uchinchi avlod modullariga e'tibor qaratish mantiqan to'g'ri keladi. Ishlab chiqarishda bunday modullar bir xil kuchga ega kristalli modellarga qaraganda arzonroq bo'lishi kerak, chunki yupqa plyonkali modullarni ishlab chiqarishda kristallga qaraganda taxminan 10 baravar kam kremniy iste'mol qilinadi. Biroq, hozirgi (2017 yildagi) bozor konjunkturasi shundan iboratki, yupqa plyonkali amorf kremniy modullari ishlab chiqarishning katta qismi yopilganligi sababli, ular odatdagi kristalli quyosh panellariga qaraganda tez-tez vattiga ko'proq narxga sotadilar.

Yupqa plyonkali kremniy modullarini ishlab chiqarish hajmi hozirda butun quyosh panellari bozorining bir necha foizini tashkil etadi.

Amorf modullarning afzalliklari. Amorf kremniydan tayyorlangan fotovoltaiik modullar mono va polikristal panellarga nisbatan bir qator afzalliklarga ega, ya'ni:

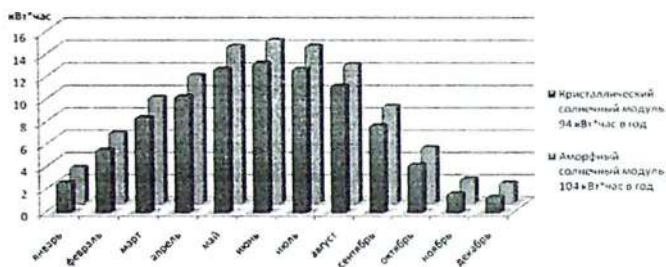
- yuqori haroratlarda yaxshiroq ishlash. Amorf kremniyning yupqa plyonkasidan tayyorlangan fotoelektrik modullar iliq mavsumda ko'proq elektr energiyasi ishlab chiqaradi, kristalli modullar esa harorat ko'tarilganda samaradorligini pasaytiradi. Yupqa plyonkali quyosh modullari qizdirilganda quvvatning pasayishiga kamroq ta'sir qiladi, bunda kristalli modullar 15-20% quvvatni yo'qotadi. 81-rasmda har xil turdagi fotoelektrik modullarni ishlab chiqarishning yorug'lik intensivligiga bog'liqligi keltirilgan.



81-rasm. Har xil turdagi fotoelektrik modullarni ishlab chiqarishning yorug'lik intensivligiga bog'liqligi

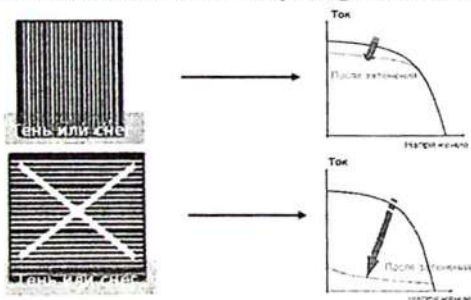
Kam yorug'lik va atrof-muhit nurida ko'proq chiqish. Amorf kremniy modullari yoritish sharoitida ishlashi mumkin, u holda kristalli modullar energiya ishlab chiqarishni to'xtatadi, shuning uchun zaif va tarqoq quyosh nurlarida amorf kremniy fotovoltaiik modullarining ishlashi mono- va polikristalli kremniy panellarga qaraganda ancha yaxshi. Bulutli va yomg'irli ob-havo sharoitida yupqa plyonkali quyosh panellari kristalli panellarga qaraganda 10-20% ko'proq energiya ishlab chiqaradi. 82-rasmda amorf va kristalli modullarni ishlab chiqarishni taqqoslash keltirilgan.

Кристаллический солнечный модуль vs. аморфный солнечный модуль



82-рasm. Amorf va kristalli modullarni ishlab chiqarishni taqqoslash

binoga ko‘rinmas qo‘shilish imkoniyati (derazalarni almashtirish, devorlarning oynalari va boshqalar) ishlab chiqarishdagi nuqsonlarning kamroq ehtimoli. Amorf modullarni ishlab chiqarish jarayoni sodda bo‘lganligi sababli, mahsulotda nuqsonlar sezilarli darajada kam. Kristalli quyosh modullarini ishlab chiqarishda lehim yordamida quyosh elementlarini bir-biriga elektr bilan bog‘lash uchun foydalaniladi. Bu an‘anaviy modullarda juda ko‘p kafolatlar bilan bog‘liq bo‘lgan zaif tomon bo‘lib kelgan va qolmoqda. Yupqa plyonkali quyosh modullari bilan bog‘liq vaziyat umuman boshqacha - modul deyarli har qanday hajmda darhol shakllanadi, alohida quyosh elementlarini lehimlash talab qilinmaydi. 83-rasmda soyaning quyosh yupqa plyonkali modullarini ishlab chiqarishga ta‘siri keltirilgan.



83-рasm. Soyaning quyosh yupqa plyonkali modullarini ishlab chiqarishga ta‘siri

Qisman soylash bilan kam quvvat yo'qotish. Kristalli kremniy modullari modullarning o'zgina soylanishi yoki axloqsizlik bilan ishlashning 25% yoki undan ko'pini yo'qotadi. Yupqa plyonkali modullar ishlab chiqarishni juda o'zgina qisqartiradi, natijada modullarning ishlash muddati davomida yanada yaxshi ishlashga olib keladi (e'tibor bering - ingichka plyonkali mahsulotning pasayishi modulning uzunligi yoki kengligi soylai bo'lishiga bog'liq).

Amorf modullar uchun bitta kamchilik bor, lekin ko'pincha bu ularning afzalliklarini bekor qiladi - polikristalli modullarga nisbatan samaradorlik qariyb 2 baravar past. Biroq, bu standart o'lchov sharoitlari uchun to'g'ri - yorqin va to'g'ridan-to'g'ri quyosh nuri va modulning 25° S haroratida. Haqiqiy sharoitda samaradorlikning bu farqi o'zgina bo'lsa ham kamayadi.

Ikkala shisha va boshqa moslashuvchan shaffof materiallar amorf modullar uchun substrat sifatida ishlatilishi mumkin. Shingl sifatida ishlatiladigan moslashuvchan asosda modullar mavjud, transport uchun rulonlarga o'raladigan modullar mavjud, turli xil uy-ro'zg'or buyumlari - kiyim-kechak, sumka, shlyapa va hk. Shu bilan birga, aksariyat hollarda shisha ustidagi modullar ishlatiladi va shisha modullarning orqa qismini himoya qilish uchun ham ishlatiladi. Bu amorf modullarning ikkinchi muhim kamchiliklariga olib keladi - er-xotin shishadan foydalanish tufayli katta og'irlik (ma'lumki, odatda kristalli modullarning orqa qismida himoya plyonka ishlatiladi). 84-rasm integratsiyalashgan yupqa plyonkali quyoshli modullarni binoga o'rnatilgandagi holati tasviri keltirilgan.



84-rasm. Integratsiyalashgan yupqa plyonkali quyoshli modullarni binoga o'rnatilgandagi holati

Amorf modullarning qo'llanilish maydoni

Amorf modullardan quyidagi hollarda foydalanish tavsiya etiladi:

- odatda bulutli ob-havo bo'lgan mintaqalarda (tarqoq yoki aks etgan yorug'lik);

- modullar odatda 50-60 darajadan ko'proq qizdirilganda issiq iqlim sharoitida;

- agar quyosh batareyasining maydoni va maksimal og'irligi bo'yicha cheklovlar bo'lmasa.

Agar siz fotovoltaik modullarni binoga birlashtirishingiz kerak bo'lsa, amorf modullar deyarli rangli oynadan farq qilmaydi. An'anaviy kristalldan farqli o'laroq, ingichka plyonkali modullar turli xil dizayn va qurilish echimlari uchun ishlatilishi mumkin. An'anaviy uyingizda o'rnatishga qo'shimcha ravishda, bardoshli, zamonaviy va oqlangan amorf kremniy PV modullari yaqin vaqtgacha imkonsiz deb hisoblangan individual elementlar, me'moriy kompozitsiyalar va echimlar sifatida jabhalarni qurish uchun keng qo'llaniladi.

Agar modullarning qisman shaffofligi zarur bo'lsa, amorf modullarni shaffofligi 5 dan 20% gacha (ishlab chiqarilgan quvvatning mos ravishda pasayishi bilan) amalga oshirish mumkin.

Zamonaviy amorf modullar kristalli modullar singari degradatsiyaga ega. Ishlab chiqaruvchi modullarning quvvati 10 yil davomida nominal qiymatining 10 foizidan ko'prog'iga, 25 yil davomida esa 20 foizidan ko'prog'iga kamayishiga kafolat beradi. Bu kristalli kremniy modullarning degradatsiyasi va kafolatlariga mos keladi.

Yuqorida ta'kidlab o'tilganidek, yupqa plyonkali modullar o'rnatilgan quvvatning vattiga ko'proq quvvat ishlab chiqaradi. Buni Moskvadagi Yuqori harorat institutida (IVTAN) har xil turdagi quyosh modullarining uzoq muddatli sinovlari tasdiqlaydi. 10-jadvaldan sinov natijalari shuni ko'rsatadiki, o'rnatilgan har bir kVt quvvatga ega bo'lgan yupqa plyonkali modullar Moskvada yiliga 726 kVt * soat / kVt ishlab chiqaradi, an'anaviy monokristalli modullar esa - yiliga 690 Vt / soat / kVt.

Yil	Yil oyi	Insolatsiyaning o'rtacha kunlik darajasi, V_t / m^2	TSM210 SB	TSMC140	TCM200	MSW180	Canadian Solar 210Br ELPS*	GET AT2**	MLT 265
2015	11	21,7	11,4	14,2	11,8	11,7	11,2	12,6	12,1
2015	12	10,9	4,6	6,6	5,1	6,1	4,6	5,5	5,2
2016	2	40,9	12,9	13,0	12,1	13,3	12,7	12,5	12,5
2016	3	108,8	61,9	55,8	68,5	68,0	66,3	66,8	55,4
2016	4	128,7	82,1	79,7	80,6	66,4	84,0	82,4	66,1
2016	5	172,1	110,6	100,1	108,8	57,8	112,2	114,0	106,8
2016	6	182,7	117,2	113,0	112,9	108,9	116,7	119,5	113,4
2016	7	172,5	115,1	112,9	108,0	106,2	111,6	116,1	108,7
2016	8	177,1	109,6	107,0	107,2	104,3	109,3	115,5	55,1
2016	9	75,8	46,8	46,8	45,1	46,0	46,3	47,4	30,9
2016	10	38,3	24,0	24,4	23,4	24,4	23,7	23,2	23,6
2016	11	23,0	10,4	12,4	10,5	9,9	8,9	10,3	10,6
Umu-miy, kBr^2/kBr			706,821	685,841	593,9975	623,045	707,50095	725,8357	600,3249

Takrorlash uchun savollar

1. Amorf yarimo'tkazgichlar texnologiyasi taraqqiyoti tarixi?
2. Amorf yarimo'tkazgichlarda zonalar holatini ishlatish va tekshirib turish?
3. Fotoelektrik tizimlar?

29.1. Yangi turdagi mikro va nanostrukturaga ega bo'lgan quyosh elementlari.

Ma'lumki kremniy asosida tayyorlangan fotoelementlarning foydali ish ko'effitsienti o'zining chegaraviy qiymatlariga etib bo'ldi. SHu sababli kremniy asosidagi fotoelementlarning foydali ish ko'effitsientlarini oshirish uchun yangi fizik hodisalardan [1] yoki mikro va nano strukturalari mavjud bo'lgan kremniy materialidan [2] foydalanish kerak bo'ladi.

Hozirgi kunda ayrim ilmiy tadqiqot institutlari tomonidan nanotexnologiyani quyosh elementlarini ishlab chiqarish jarayoniga tadbqiq qilish orqali ularning foydali ish ko'effitsientini oshirish bo'yicha izlanishlar olib borilmoqda.

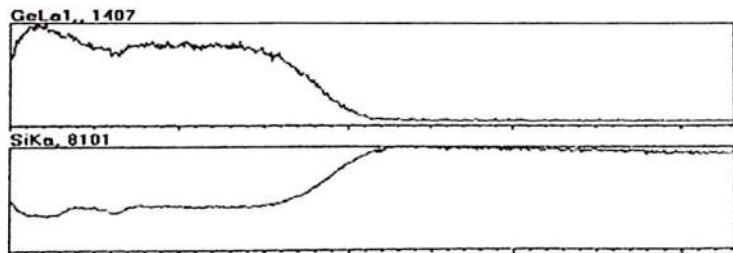
Shu sababli mikro va nano strukturaga ega bo'lgan kremniy materiallarini olish va shu asosida quyosh elementlarini tayyorlash, ilmiy nuqtai nazardan qiziqarli va dolzarb hisoblanadi.

YAngi yaratilgan diffuzion usul yordamida [3] nanoklaster parametrlari, ya'ni zichligi, strukturasi, tarkibi, shuningdek ularning hajm hamda sirtidagi taqsimoti boshqariladigan nanoklasterli kremniyni olish imkoniyati yuzaga keladi. Kirishma atomlarining klasterlarini hosil bo'lishining termodinamik va texnologik sharoitlari asosan kirishma atomlarning tabiati bilan aniqlanishi o'rnatildi. Kirishma atomlari sifatida Ge, Ni va Mn ishlatildi. Bunday kirishmalarni tanlanishiga sabab, ular yordamida kirishma atomlarining turli tabiatga ega bo'lgan, ya'ni elektr betaraf, magnit va zaryadlangan mikro va nanoklasterlarini olish imkonini bilan bog'langandir. Bu esa o'z navbatida sirt va oksid qatlamlariga ega bo'lmagan mukammal mikro va nano geteroo'tishlarni, SHotki to'siqlarini va p-n-o'tishlarni olish imkonini beradi.

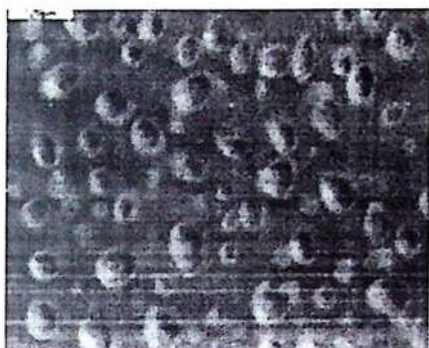
Kirishmalarni legirlash jarayoni [3] da ko'rsatilgan usul bo'yicha amalga oshirildi. Germaniy bilan kremniyni legirlash jarayoni gazli fazadan amalga oshirilgan bo'lsa, nikel kirishmasi esa o'tqazilgan qatlam orqali amalga oshirildi. Legirlash harorati mos ravishda germaniy uchun 1200 °S, nikel uchun 1100 °S tanlangan.

Olingan namunalarga qo'shimcha ravishda turli haroratlarda ishlov berildi [4,5]. Germaniy va nikel kirishmalariga ega bo'lgan kremniy Jeol Super Probe JXA-8800 R/RL rusumidagi rentgen mikrozonldi tahlil qilgichi va infraqizil mikroskop yordamida o'rganildi.

Germaniyni kremniydagi taqsimoti 85-rasmda ko'rsatilgan bo'lsa, kremniyning sirtining tasviri 86-rasmda ko'rsatilgan. Ma'lum bir chuqurlikda taqiqlangan soha kengligi o'zgaruvchi struktura $Si_{1-x}Ge_x$ hosil bo'lishi 1-rasmdan ko'rinib turibdi. Bunday sturkturaning mavjud bo'lishi, yutiladigan quyosh spektrini oshirilishiga olib keladi.



85-rasm. Germaniyni kremniydagi taqsimoti



86-rasm. Kremniyning sirtining tasviri

Kremniy sirtida hosil bo'lgan mikrogeteroo'tishni fotoelementning samaradorligiga qay tarzda ta'sir qilishini aniqlash maqsadida olingan material asosida quyosh elementi tayyorlandi. Mikrogetero o'tishga ega bo'lgan quyosh elementlarining parametrlari 11-jadvalda ko'rsatilgan.

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, mikro getro o'tishga ega bo'lgan quyosh elementlarining foydali ish koeffitsenti sezilarli darajada yuqoridir. Buni 0,67-1,12 eV energiya oralig'ida fotonlarning yutilishi bilan izohlash mumkin.

11-jadval

№	Samaradorlik, (%)		
	Si <P> asosidagi quyosh elementi	Si <P:Ge> asosidagi quyosh elementi	
		SiGe mikrogeteroo'tishga ega bo'lmagan quyosh elementi	Klasterlarning sirt zichligi $3 \times 10^5 \text{ sm}^{-2}$ bo'lgan SiGe mikrogeteroo'tishli quyosh elementi
1.	16,1	16,9	18,6
2.	16,3	16,7	18,8
3.	15,9	16,8	18,7
4.	16,2	16,5	18,5
5.	16,2	16,9	18,9
6.	16,1	16,8	18,5

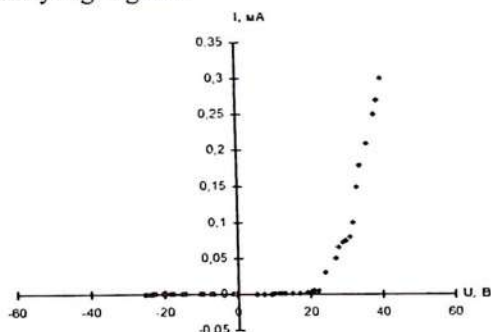
Qiziqarli natijalar nikel kirishmalari bilan legirlangan namunalarda olindi. Haroratli ishlov berishning malum bir oraliqlarida, kremniyda nikel mikroklastlarining nafaqat hosil bo'lishi, balki ularning tartiblanishi kuzatildi. Hosil bo'layotgan mikro klasterlarning konsentrat-

siyasi $N=10^{10} \div 10^{11} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil qiladi. Nikel mikroklastlarlariga ega bo'lgan kremniyning tasviri 87- rasmda ko'rsatilgan.



87-rasm. Nikel mikroklastlariga ega bo'lgan kremniyning tasviri

Kremniy-nikel mikroklaster strukturasi volt-ampere tavsifini (VAT) o'rganish maqsadida maxsus volfram simdan tayyorlangan zondga ega bo'lgan asbob tayyorlandi. Mikrozon uchining qalinligi 0,7 mkm dan kichik bo'lgan. Kremniy sirti x va y yo'nalishi bo'yicha skanerlandi va turli nuqtalardan VAT olindi. Kremniy-nikel mikroklaster strukturasi volt-ampere tavsifi 88 – rasmida keltirilgan. Tasvirdan ko'rinib turibdiki, bunday strukturalarning VATda tokni qo'yilgan maydon qutbiga nosimmetrik bog'lanishi mavjuddir, ya'ni to'g'rilash xususiyatiga egadir.



88 –rasm. Kremniy nikel mikroklasterining VAT

Shuni ta'kidlash joizki, bunday strukturalarda teskari tokning qiymati juda kichik ($J_s < 10^{-6} \text{ A}$) bo'lib, qo'yilgan kuchlanishga bog'liq bo'lmaydi, ya'ni metall-yarimo'tkazgich kontaktiga xos bo'lgan

VATga egadir. Mazkur strukturaning to'g'rilash koeffitsienti $K=I_{to'g'}/I_{tes}$ qo'yilgan kuchlanishga bog'liq ravishda 80-150 qiymatlar-da o'zgaradi.

Bundan tashqari hosil qilingan kremniy- mikroklaster strukturani jadalligi $J \sim 1000$ lyuks bo'lgan yorug'lik bilan yoritish orqali foto-EYUK tadqiq qilindi. O'lchash natijalari shuni ko'rsatdiki, mikrostrukturaning har bir nuqtasi $U_{syu}=100 \div 200$ mB (elektr toki $I_{qt}=2 \cdot 10^{-6}$ A) kuchlanishni beradi, yani mikro va nano element sifatida ishlaydi.

Bunday mikro strukturalarning zichligi $N_s=10^5$ sm^{-2} tashkil qilganligi uchun ularni ketma-ket, yoki parallel ulangan holda integral fotoelementni olish mumkin. Ketma-ket ulanganda elektr kuchlanishi $U_{syu}=1,6 \cdot 10^4$ V ni tashkil qilsa, parallel ulaganda esa tokni qiymati $I_{kt}=0,2$ A bo'lishiga erishish mumkin.

SHunday qilib, mikrogetro o'tish va mikro SHotki to'sig'iga ega bo'lgan kremniy, materiallarining yangi sinfi bo'lib, samaradorligi yuqori bo'lgan fotoelementlarni tayyorlashda qo'llanilishi mumkin.

Takrorlash uchun savollar

1. Yangi yaratilgan diffuzion usul?
2. Mikro strukturalarning zichligi?
3. $Si_{1-x}Ge_x$ hosil bo'lishi?
4. Mikrogetro o'tish va mikro SHotki to'sig'i?

30-§. YARIM O'TKAZGICHLI FOTOELEKTRON ASBOBLARNING FIZIKAVIY ASOSLARI. YARIM O'TKAZGICHLI ASBOBLAR VA ULARNING ISHLASHI.

Fotorezistorlar. Fotodiodlar. Quyosh elementlari. Fototranzistorlar. Fototiristorlar. Yarimo'tkazgichli yorug'lik manbalari (Yorug'lik diodlari, lazerlar. Optoelektron juftlar). Infraqizil fotografik tuzilmalar va tasvir aylantirgichlar.

30.1. Foto qabul qilgich asboblarning ishlash tamoyili

Foto qabul qilgichlarning ishlash tamoyili qattiq jismlardagi ichki fotoeffektidan foydalanishga asoslanadi. Yarimo'tkazgich tomonidan yutiladigan kvantlar yoki panjara, yoki kirishma atomlarining zaryad tashuvchilarni ozod qiladi. Har bir bunday o'tish uchun mazkur material uchun xos bo'lgan minimal energiya talab etilganligi sababli foto qabul qilgichning har bir turi uchun ma'lum bir λ_{chek} uzun to'liqlik chegarasiga ega bo'ladi va quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\lambda = \frac{1,24}{E_2 - E_1}, \quad (30.1)$$

bu yerda, λ mikrometrlarda; E_2 va E_1 – elektron-voltlarda.

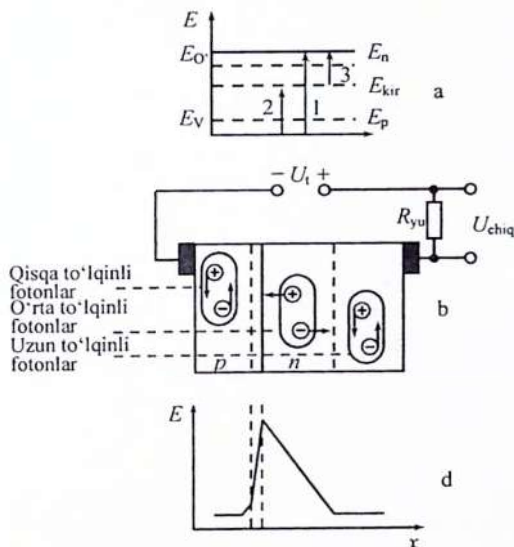
$E_2 - E_1$ farq – “zona–zona” o'tishdagi energetik oraliq (89, a – rasmda o'tish 1 kabi ko'rsatilganidek). Shuningdek “kirishma sath – zona” o'tish bo'lishi mumkin (89, a – rasmdagi o'tish 2). O'tish 3 “zona – kirishma sath” fotoeffekt yuklamada hosil bo'lmaganligi sababli amaliyotda ishlatilishi mumkin emas.

$P-n$ o'tish asosidagi foto qabul qilgich asboblarning ishlash tamoyilini ko'rib chiqamiz (89, b – rasm). Foton yutilganda yarimo'tkazgichda “elektron–kovak” juftligi hosil bo'ladi. Ularning ajralishida fototok paydo bo'ladi. Bunda elektronlar n –sohaga harakatlansa (elektr maydonga qarama-qarshi), kovaklar p –sohaga (maydonga to'g'ri) harakatlanadi.

Foton tomonidan hosil bo'lgan “elektron-kovak” juftligini bo'linish ehtimoli, mazkur juftlik yarimo'tkazgich elektr maydon ta'siri ostida bo'lgan sohada hosil bo'lgan taqdirda yuqori bo'ladi. Muqobil bo'linish – “elektron-kovak” juftligining oddiy rekombinatsiyasidir. Bunda zaryadning siljishi yuz bermaydi va fototokka xech qanday

xissa qo'shmaydi. Yarimo'tkazgichli asbob kristallida elektr maydon bir tekisda taqsimlanmaydi.

Diffuzion p - va n -tur sohalaridagi maydon, kambag'allashgan qatlam nomi bilan ma'lum bo'lgan p - va n -sohalar orasidagi sohaga qaraganda kuchsizroq bo'ladi. Foto qabul qilgichning samarali ishlashi uchun fotonlarning kattagina miqdorda kambag'allashgan qatlamda yutilishi kerak, ya'ni foton kambag'allashgan qatlamgacha bo'lgan va undan keyingi sohalarida yutilishi kerak emas.



89– rasm. Foto qabul qilgich asbobining ishlash tamoyili:
a – energetik diagramma; b – p - n o'tish yaqinidagi jarayonlar;
d – elektr maydonni strukturadagi taqsimoti

Fotonlarning yutilgunicha yarimo'tkazgich ichkarisiga kirish chuqurligi, uning to'liq uzunligiga bog'liq bo'ladi. Kichik to'liq uzunlikka ega bo'lgan fotonlar sirtiga yaqin sohada yutilsa, katta to'liq uzunligiga ega bo'lgan fotonlar butun kristall qalinligi orqali o'tish mumkin.

Keng spektral tavsifni ta'minlash uchun fotodiod kristalli qisqa to'liq uzunlikdagi fotonlarni kirishiga imkon beruvchi juda yupqa p -

qatlamiga va uzun to'liqinli fotonlardan maksimal fototok olish uchun qalin kambag'allashgan qatlamga ega bo'lish kerak.

Kambag'allashgan soha qalinligi mazkur sohada yarimo'tkazgichning solishtirma qarshiligiga va teskari siljishga bog'liq bo'ladi. Kambag'allashgan qatlam teskari siljish qo'yilmaganda ham mavjud bo'ladi. Bu holat noasosiy zaryad tashuvchilarning o'tish orqali diffuziya natijasida hosil bo'ladigan ichki maydoning mavjud bo'lishi bilan tushuntiriladi. Teskari siljish kuchlanishi kambag'allashgan sohani kengaytiradi.

Kambag'allashgan qatlamining ixtiyoriy kuchlanishlardagi o'lgamlari $p-n$ o'tish yaqinida katta solishtirma qarshilikka ega bo'lgan materialdan tayyorlangan asboblarda katta bo'ladi. Kristallning ikkala qarama qarshi sirtida omik kontaktlarni tayyorlash uchun kichik solishtirma qarshilik talab etiladi. $p-n$ o'tishli foto qabul qilgich masalan: quyosh batareyasi kichik solishtirma qarshilikdagi n -turdagi materialga p -turdagi kirishmani diffuziya qilish usuli bilan tayyorlanadi. Diffuzion p -qatlamning kichik qalinligi kichik to'liqin uzunlikdagi fotonlarga katta sezgirlikni ta'minlaydi. Uzun to'liqinli fotonlarga katta sezgirlikni hosil qilish uchun kambag'allashgan sohani nisbatan katta teskari siljishni qo'ygan holda kengaytirish talab etiladi.

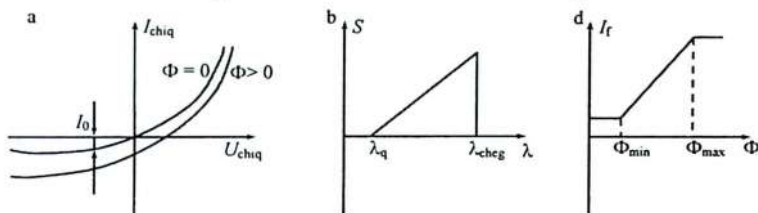
p -turdagi kirishmaning chuqur diffuziyasi kichik to'liqin uzunlikdagi nurlanishlarga sezgirlikni yomonlashtiradi. Biroq "ohista" o'tishni hosil qilish orqali katta to'liqin uzunlikdagi nurlanishlarga yaxshi sezgirlikni ta'minlash uchun kerak bo'lgan siljish kuchlanishni kamaytirishga imkon beradi. Kichik teskari siljishlarda kichik va katta to'liqin uzunlikdagi fotonlarga sezgirlikni oshirish uchun p - va n -sohalar orasida katta solishtirma qarshilikka ega bo'lgan i -qatlam ishlatiladi. i -qatlamiga ega bo'lgan foto qabul qilgichlar $p-i-n$ struktura nomini olishgan. Bunday asboblarda yuqqa diffuzion p -sohaga (nurlanish oqimi tushadi) va yuqori omli kremniy plastinasining boshqa tomonidan qalin diffuzion n -sohaga ega bo'ladi. Odatda $p-i-n$ foto qabul qilgichlarda i qatlam shunday yuqori solishtirma qarshilikka ega bo'ladigan, nol siljishda ham kambag'allashgan qatlam p -qatlamdan i qatlamning taxminan yarim chuqurligiga tarqaydi. 5 V gacha bo'lgan teskari kuchlanishlarda kambag'allashish n -qatlamigacha tarqaydi va birlashish effekti kuzatiladi. Teshilish kuchlanishi 200 V dan yuqori bo'lganligi tufayli nurlanishning katta oqimlarida i -qatlamini to'liq kambag'allashuvini ushlab turish uchun ishlash rejimini birlashish

kuchlanishidan yuqori bo'lgan teskari kuchlanishlarda o'rnatish kerak bo'ladi. Bu esa eng yaxshi to'g'ri chiziqlikni va tezkor likni ta'minlaydi.

30.2. Foto qabul qilgichlarning tavsiflari va parametrlari

Tavsiflari. Foto qabul qilgichlarning asosiy tavsiflari volt–amper, spektral, va energetikdir.

Mazkur tavsiflarning ko'rinishi 90 – rasmda ko'rsatilgan.



90 – rasm. Foto qabul qilgichlarning tavsiflari:

a – volt-amper; b – spektral; d – energetik

Volt-amper ta'siri (VAT) berilgan nurlanish Φ oqimida chiqish tokini fotoqabul qilgich chiqishidagi kuchlanishga bog'liqligidir. Masalan, $p-n$ o'tish asosida fotoqabul qilgichda VAT quyidagi ifoda bilan yoritiladi:

$$I_{chiq} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU_{chiq}}{kT}\right) - 1 \right] - I_f, \quad (30.2)$$

bu yerda, I_0 – $p-n$ o'tishdagi teskari tok; $I_f - \Phi$ yorug'lik oqimi ta'sirida hosil bo'luvchi fototok

Spektral tavsif – fotoqabul qilgich sezgirlikni fotoqabul qilgichga tushayotgan manoxromatik nurlanish to'liq uzunligiga bog'liqligidir. 90, b – rasmda ko'rsatilgan spektrning uzun to'liqlik chegarasi λ_{cheg} foto qabul qilgichga tushayotgan to'liqning maksimal uzunligini aniqlasa, λ_q qisqa to'liqlik chegarasi esa to'liq uzunligi kamayganda strukturaning sust sohasida nurlanishning yutilishini oshishi tufaylidir.

Energetik tavsif (90, d – rasm) fototokni foto qabul qilgichga tushayotgan nurlanish oqimiga bog'liqligini ifodalaydi. Energetik tavsif odatda darajali funksiya ko'rinishi yoritiladi:

$$I_f = \Phi^n, \quad (30.3)$$

bu yerda, n daraja ko'rsatgichi energetik tavsifning chiziqligini ifodalaydi, $n=1$ da tavsif chiziqlidir

$\Phi_{\min} \dots \Phi_{\max}$ qiymatlar sohasi foto qabul qilgichning chiziqligining dinamik oralig'ini aniqlaydi:

$$D_{\Phi N} = 10 \lg \Phi_{\max} / \Phi_{\min}. \quad (30.4)$$

Fotoqabul qilgichning parametrlari. Fotoqabul qilgichning muhim parametri sezgirlikdir. Bu parametрни ma'lum darajada elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan asboblardagi kuchaytirish koeffitsiyentiga o'xshash deb hisoblasa bo'ladi. Umumiy holatda fotoqabul qilgich sezgirligi fotoqabul qilgich chiqishidagi elektr holatini, uning kirishiga birlik optik signal berilganda o'zgarishini yoritadi.

Optik nurlanish energetik va yorug'lik parametrlari bilan tavsiflanadi. Tavsiflovchi parametrga mos ravishda fotoqabul qilgichni nurlanish oqimiga S_{Φ_e} , yorug'lik oqimiga $S_{T_{M_e}}$, nurlanganlikka S_{E_e} va yoritilganlikka S_{E_v} sezgirliklar mavjuddir.

Fotoqabul qilgichning chiqishida o'lchanayotgan elektr parametrga bog'liq ravishda fotoqabul qilgichning tokli va voltli sezgirliklari mavjuddir. Agarda o'lchanayotgan kattalik fototok bo'lsa, tokli sezgirlik (S_I) bo'ladi. O'lchanayotgan kattalik fotosignalning kuchlanishi bo'lgan foto qabul qilgichning sezgirligini voltli sezgirlik (S_V) deyiladi.

Fotoqabul qilgichning sezgirligini aniqlash:

$$\begin{aligned} S_{I\Phi_v} &= \frac{I_{\Phi}}{\Phi_v}; \\ S_{IE_v} &= \frac{I_{\Phi}}{E_v}; \\ S_{I\Phi_e} &= \frac{U_{\Phi}}{\Phi_e}; \\ S_{IE_e} &= \frac{U_{\Phi}}{E_e}, \end{aligned} \quad (5.5)$$

bu yerda, $S_{I\Phi_v}$ – yorug'lik oqimiga tokli sezgirlik; S_{IE_v} – yoritilganlikka tokli sezgirlik; $S_{I\Phi_e}$ – nurlanish oqimiga voltli sezgirlik; S_{IE_e} – nurlanganlikka voltli sezgirlik.

Umuman olganda foto qabul qilgich sezgirligi doimiy kattalik emasdir, xususan nurlanish parametriga bog'liq bo'ladi. Buni hisobga

olish uchun foto qabul qilgichning statik va dinamik differensial sezgirlik degan tushuncha kiritiladi. Statik sezgirlik o'lanayotgan kattaliklarning o'zgarish qiymatlarining nisbatidir.

Sezgirlik tushayotgan nurlanishning to'liq uzunligiga bog'liq bo'ladi. Shuning uchun foto qabul qilgichning berilgan spektral tarkibidagi monoxromatik nurlanishiga monoxromatik va integral sezgirlik mavjuddir. Monoxromatik sezgirlik foto qabul qilgichning monoxromatik nurlanishga sezgirligidir.

Javob berish vaqti. Fotodatchiklarda fototokni o'sish va tushish vaqtiga javob berish vaqti deyiladi. O'sish va tushish vaqti, chiqishda fototok qiymatini o'rnatilgan qiymatning 10% dan 90% gacha va 90% dan 10% gacha o'zgarishi yuz beradigan vaqt oralig'idir. U fotodatchik javob berishi mumkin bo'lgan eng katta signal chastotasini aniqlaydi. Vaqt doimiysi, boshlang'ich nol qiymatdan o'rnatilgan qiymatning 63% ga erishish uchun ketgan vaqtdir. Fotodatchiklarning chastota yo'lagi Δf (MGs) uning o'sish vaqti bilan bog'lan bo'lib, quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\Delta f = \frac{0.35}{t_{0.35}}, \quad (30.6)$$

bu yerda, $t_{0.35}$ – o'sish vaqti (mks).

Fotodiodlarda javob berish vaqti uchta parametrlar bilan aniqlanadi:

1. Dreyf vaqti t_{dr} – fotodiodning kambag'allashgan sohasida zaryad tashuvchilarning jamlanish vaqtini ko'rsatadi.

2. Diffuziya vaqti t_{dif} – fotodiodning kambag'allashmagan sohasida zaryad tashuvchilarning jamlanish vaqtini ko'rsatadi.

3. RC vaqti t_{RC} – diodning tashqi zanjir bilan birgalikdagi vaqt doimiysi.¹⁸

RC vaqti $t_{RC} = 2.2RC$ ifoda bilan aniqlanadi. Bu yerda R – fotodioddagi ketma-ket qarshiliklar va yuklama qarshiligining yig'indisi bo'lsa, C esa fotodiod o'tishi va parazit sig'implarning yig'indisi. O'tish sig'imi fotodiodning diffuzion yuzasiga to'g'ri proporsional bo'lsa, unga qo'yilgan teskari siljishga teskari proporsionaldir. Shuning uchun kichik yuzaga va katta qo'yilgan teskari siljishga ega bo'lgan

¹⁸ Anil K. Maini Lasers and optoelectronics: fundamentals, devices, and applications. 2013 John Wiley and Sons Ltd., UK. p.322.

fotodiod tez o'sish vaqtiga ega bo'ladi. Bundan tashqari parazit sig'imni kalta o'tkazgichlardan foydalanish hisobiga minimallashtirish mumkin. Umumiy o'sish vaqti quyidagi ifoda bilan beriladi:

$$t_{os} = \sqrt{t_{dr}^2 + t_{df}^2 + t_{RC}^2} \quad (30.7)$$

Kvant samaradorligi η . Hamma yutilgan yorug'lik kvantlari ham elektron-kovak juftligini hosil bo'lishiga olib kelmaydi. Mazkur omilni, fotonlarni elektr tokiga o'zgartirilish samaradorligini tavsiflovchi koeffitsiyent yoki, kvant samaradorligi bilan hisobga olish kerak. Kvant samaradorligi deb, bir sekunda paydo bo'lgan elektronlar sonini tushuvchi fotonlar soni nisbatiga aytiladi:

$$\eta = \frac{N_e}{N_f} = \frac{I_f/e}{P/h\nu} = \frac{I_f h\nu}{eP} \quad (30.8)$$

bu yerda, I_f – fototok; e – elektron zaryad; h – Plank doimiysi; ν – nurlanish chastotasi; P – optik nurlanish quvvati.

Shovqinlar. Foydali signaldan farqi qiluvchi elektr yoki optik ko'rinishdagi istalgan g'alayonlanishlarga shovqin deyiladi. Fotoqabul qilgichlarning ishlashining asosida tushuvchi fotonlarni elektr tokiga o'zgartirish yotadi. Shuning uchun ulardan juda kuchsiz optik signallarni ushlash va sezilarli bo'lgan elektr tokini hosil qilish talab etiladi. Biroq amalda elektr signali juda kuchsiz bo'lishi mumkin.

Signal foydali axborotni tashisa, shovqin unga qo'shimcha va foydasiz bo'ladi. Shovqin har doim bo'lsada, uning qabul qiluvchi qurilmaning kirishidagi darajasi muhim hisoblanadi. Bunga sabab qabul qiluvchi qurilma uzatishda o'zining boshlang'ich quvvatini yo'qotgan signal bilan ishlaydi. Shuning uchun shovqin kuchsiz signal fonida sezilarli bo'lib qoladi. Shovqin fotoqabul qiluvchining sezgirlik ostonasiga ta'sir qiladi. Shovqinlarning bir nechta turlari mavjuddir.

Sochma shovqinlar. Sochma shovqinlar elektronlarning diskret tabiati tufayli yuzaga keladi. Elektr toki uzluksiz bir jinsli oqim bo'lmaydi. U alohida elektronlarning diskret zaryadini oqimidir. Yuqorida aytganimizdek fotoqabul qilgichlar elektron-kovak juftligini hosil qilishga olib keladigan fotonlarni yutilishi hisobiga ishlaydi. Elektron-kovak juftligi esa, o'z navbatida tashqi zanjirda tokni hosil bo'lishiga olib keladi. Bu uch bosqichli jarayondir: foton, elektron-kovak, elektron. Fotonlarni tushushi va ularning har birini yutilishi hamda tashuvchilar juftligini hosil bulishi tasodifiy jarayondir. U diskret hodisalar turkumi sifatida yuz beradi. Shuning uchun tok,

berilgan vaqt onida qanchalik elektron-kovak juftligi hosil bo'lganiga bog'liq ravishda tebranib turadi. Sochma shovqin quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$I_{soch}^2 = 2eI_{fo'r}\Delta f, \quad (30.9)$$

bu yerda $I_{fo'r}$ – fototokning (fon toki va signal toki bilan birgalikda) o'rtacha qiymati, Δf – qabul qilgich chastota yo'lagining kengligi.

Issiqlik shovqini. Issiqlik shovqini qabul qilgichning qarshiligi tebranishi tufayli yuzaga keladi. Elektrodlar orasidagi oraliqda elektronlar o'zini tartibsiz tutadi. Ularning issiqlik energiyasi, ularga tasodifiy tarzda harakatlanishiga imkon beradi. Vaqtning har bir onida elektronlarning tasodifiy issiqlik harakatining umumiy oqimi elektrodلarning biriga yoki boshqasiga yo'nalgan bo'ladi. Shunday qilib, signalni o'zgartiradigan doimo o'zgarib turuvchi tasodifiy tok paydo bo'ladi. Issiqlik toki quyidagi ifoda bilan beriladi:

$$I_{shr}^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_t}, \quad (30.10)$$

bu yerda, k – Bolsman doimiysi, T – harorat, Δf – qabul qilgich chastota yo'lagining kengligi; R – qabul qilgich yuklamasining faol qarshiligi (fotoqabul qilgichning faol qarshiligini ham o'z ichiga oladi).

Qorong'ulik toki shovqini. Fotodiodga nurlanish tushmaganda ham fotodiod orqali qorong'ulik toki oqib o'tadi. Uning o'zini tutishi ham tasodifiy bo'lib, u ham shovqinlarning qo'shimcha manbasi bo'ladi. Qorong'ulik tokining shovqin tashkil qiluvchisining I_{shQ} o'rtacha kvadratik qiymati kattaligi I_Q ning o'rtacha qiymati bilan aniqlanadi:

$$I_{shQ}^2 = 2eI_Q\Delta f. \quad (30.11)$$

1/f spektr ko'rinishiga ega bo'lgan ortiqcha shovqin. Mazkur turdagi shovqin texnologiyaning mukammallashtirilmaganligi (sirt rekombinatsiyasi va sirqish, kontakt elektrodلarining nomukammalligi) tufayli fotoqabul qilgich strukturasini mukammallikdan og'ishi natijasida kelib chiqadi. Ortiqcha shovqin haroratga kuchsiz bog'liq bo'ladi. Past chastota (100 Gs dan kichik) sohasida ustunlik qiladi.

Yuqorida keltirilgan shovqinlardan tashqari shovqinlarni kelib chiqishiga fon shovqini, hamda foton shovqini ham o'z hissalarini ko'shadi.

Aniqlash qobiliyati. Shovqinlarni o'lchash rejimiga va fotodiod konstruksiyasiga bog'liqligini hisobga olgan holda ularni tavsiflash uchun aniqlash qobiliyati deb ataluvchi parametr kiritilgan

$$D^* = s_f \sqrt{A \Delta f} / \bar{I}_{sh}, \quad (30.12)$$

bu yerda, D^* sm·Vt⁻¹·Gs^{1/2} da o'lchanadi, $\bar{I}_{sh}$ – shovqin tokining o'rtacha kvadratik qiymati ($\bar{I}_{sh} = \sqrt{I_{sh}^2}$), Δf – foto qabul qilgichning ishchi chastota yo'lagi, s_f – fotosezgirlik. Mazkur parametr tuzilishi va qo'llanilish sharoiti bo'yicha har xil bo'lgan foto qabul qilgichlarning chegaraviy imkoniyatlarini baholash imkoniyatini beradi. Bunda quyidagicha yondoshuv ishlatilgan. Bartaraf qilib bo'lmaydigan shovqin tashkil qiluvchilarning quvvati chastota yo'lagiga Δf proporsionaldir, ya'ni $P_{sh} \sim I_{sh}^2 \sim \Delta f$. Shuning uchun har xil chastota yo'lagida ishlovchi ikkita fotoqabul qilgichlarni shovqin bo'yicha solishtirmoqchi bo'lsak, ularni $\bar{I}_{sh}$ bo'yicha emas, balki $\bar{I}_{sh} / \sqrt{\Delta f}$ bo'yicha solishtirsak ma'qul bo'ladi. Mazkur kattaliklar teng bo'lsa, foto qabul qilgichlar shovqin xossasi bo'yicha ekvivalent hisoblandi. Shovqin quvvati $\sqrt{A}$ ga proporsionaldir. Demak solishtirish uchun $\bar{I}_{sh} / \sqrt{A}$ nisbatni ishlatish kerak. Agarda $\sqrt{A}$ va $\sqrt{\Delta f}$ larga bir qiymatini bersak, u holda $\bar{I}_{sh} / s_f$ nisbat, signal-shovqin nisbati birga teng bo'ladigan nurlanish quvvatini ko'rsatadi, ya'ni eng kichik qiymatni ko'rsatadi. Shunday qilib D^* aniqlash qobiliyati foto qabul qilgichning ostonaviy quvvatiga teskari kattalikdir. Bunda foto qabul qilgichning fotosezgir vuzasi 1 sm² bo'lib, 1 Gs chastota yo'lagida ishlaydi.

30.3. Foto qabul qilgichning opto juftlik elementi sifatidagi parametrlari

Opto juftliklarda foto qabul qilgich nur tarqatgich, ko'pincha IQ-diod bilan birgalikda ishlaydi. Opto juftliklarda ishlatilayotgan nur tarqatgichlar nisbatan tor nurlanish spektriga egadir. Shu sababli bu yerda foto qabul qilgich uchun spektral tavsifning aniq bir ko'rinishi muhim bo'lmaydi. Integral (spektral bo'yicha) parametr o'z ma'nosini yo'qotadi. Eng asosiysi uning sezgirligi qo'llanilayotgan nur tarqatgichning ishchi to'lqin uzunligida maksimal bo'lishidir.

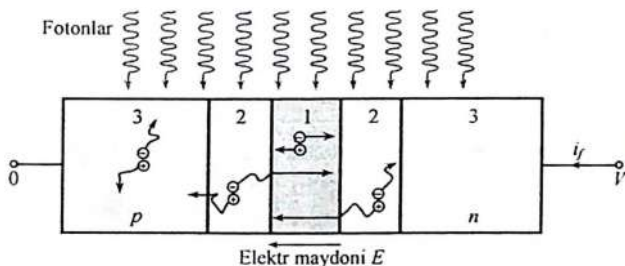
Opto juftliklarda foto qabul qilgichning tezkorligi uzib ulanish vaqti t_{uu} bilan tavsiflanadi. Xozirgi kunda qo'llanilayotgan foto qabul qilgichning asosiy sinflarida $t_{uu} = 10^{-5} \dots 10^{-7}$ s; tez ishlovchi zamonaviy foto qabul qilgichlarda $t_{uu} = 10^{-8} \dots 10^{-10}$ s; optoelektronika istiqbolli foto qabul qilgichlardan 10^{-10} dan 10^{-12} sekundgacha bo'lgan sohaga

siljishni talab etadi. Yuqori tezkorlik rejimi (kichik t_{uu}) yuqori omli yuklamalarda amalga oshirilmaydi. Bundagi uzib ulanish davomiyligi foto qabul qilgich sig'imini sekin zaryadlanish jarayoni bilan aniqlanadi. Bundan tashqari F_{ost} yaqin nurlanish oqimlari bilan ishlaganda yuklama qarshili 10^7 Om atrofida bo'lishi kerak. U holda foto qabul qilgichning sig'imining $C=5...20$ pF zaryadlanish davomiyligi $10^{-4}...10^{-3}$ s ni tashkil qiladi. Natijada foto qabul qilgichlarni ostonaviy rejimda ($\Phi=\Phi_{ost}$ va kichik I_f) ishlaganda yuqori tezkorlikka erishib bo'lmaydi. Xususan opto juftliklarda foto qabul qilgichlar ishlatilganda ostonaviy parametrlar ikkinchi darajali bo'lib qoladi.

30.4. $p-n$ o'tish asosidagi fotodiodlar

Fotodiodli qabul qilgichning ishlash tamoyili harakatchan zaryad tashuvchilarning fotogeneratsiyasiga asoslanadi. Fotodiod, $p-n$ -o'tishga ega bo'lgan asbob bo'lib, uning teskari toki foton yutilishi bilan oshadi. $p-n$ -o'tishli fotodiod katta tezkorlikka ega bo'lsada, ular kuchaytirish xossasiga ega bo'lmaydi.

Yoritilgan sharoitda teskari siljigan $p-n$ -o'tishni ko'rib chiqamiz (91–rasm). Fotonlar α yutilish koeffitsiyenti bilan hamma joyda yutiladi. Foton yutilish bilan elektron-kovak juftligi paydo bo'ladi. Zaryad tashuvchilar, elektr maydon mavjud bo'lgan joydagina ma'lum bir yo'nalishda ko'chadi. $p-n$ -o'tishda elektr maydoni faqat kambag'allashgan qatlamda bo'lganligi uchun tashuvchilarning fotogeneratsiyasi shu yerda bo'lgani maqsadga muvofiqdir.



91–rasm. Teskari siljigan $p-n$ -o'tishni nurlantiruvchi fotonlar. Dreyf va diffuziya sohalari mos ravishda 1 va 2 raqamlar bilan belgilangan.

Elektron-kovak juftliklarini hosil bo'lishi mumkin bo'lgan uchta soha mavjuddir:

1. Kambag'allashgan qatlamda (soha 1) hosil bo'lgan elektron va kovaklar kuchli elektr maydoni ta'sirida qarama qarshi yo'nalishlarda dreyflanadi. Elektr maydoni har doim $n \rightarrow p$ yo'nalishni ko'rsatgani uchun elektronlar n -soha tomon, kovaklar p -soha tomon haraktlanadi. Natijada tashqi zanjirda hosil bo'layotgan fototok har doim teskari yo'nalishga ega bo'ladi (n -sohadan dan p -sohaga). Har bir tashuvchilar juftligi tashqi zanjirda, qambag'allashgan qatlamda rekombinatsiya yuz bermaganligi uchun e ($G=1$) yuzali elektr toki impulsini hosil qiladi.

2. Kambag'allashgan qatlamlardan tashqarida (soha 3) hosil bo'lgan elektron va kovaklar elektr maydoni mavjud bo'lmaganligi uchun yo'naltirilgan holda ko'chmaydi. Ular rekombinatsiya natijasida annigilyatsiya qilmagunicha tasodifiy daydib yuradi. Ular tashqi elektr zanjirida signalni hosil qilmaydi.

3. Kambag'allashgan qatlamlardan tashqarida, biroq bevosita unga yaqin joyda (soha 2) hosil bo'lgan elektron va kovaklar diffuziya natijasida kambag'allashgan qatlamga tushush imkoniga ega bo'ladi. p -soha tomonidan kelayotgan elektronlar o'tish orqali tezda ko'chiriladi va tashqi zanjirda e zaryadni hosil qiladi. n -soha tomonidan kelayotgan kovaklar ham xuddi shunday effektni beradi.

Fotodiodlar ko'pgina yarimo'tkazgichli materiallardan, shuningdek ikki-, uch- va to'rt komponentali yarimo'tkazgichlardan tayyorlanadi. Asbobni, yorug'likni p - n o'tishga parallel emas, balki normal bo'yicha tushadigan qilib tayyorlashadi. Mazkur holatda tashuvchilarning diffuziyasi tufayli qo'shimcha tok η ga oshadi. Biroq mazkur effekt, η ni kamaytiruvchi material qalinligini kamaytirish bilan tenglashtiriladi.

Javob berish vaqti. Kambag'allashgan qatlam orqali dreyflayuvchi tashuvchilarning ko'chish vaqti (w_e/v_e elektronlar uchun va kovaklar uchun w_h/v_h) va RC -zanjirini javob berish vaqti fotodiodning javob berish vaqtining shakllanishida asosiy vazifani bajaradi.

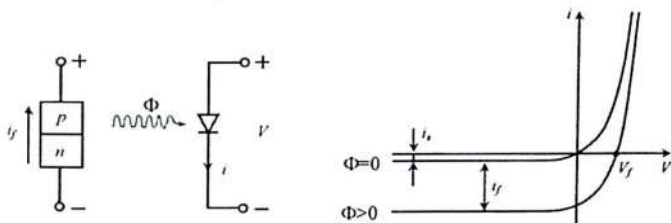
Fotodiodlarda javob berish vaqtida, diffuziya tufayli yuzaga keladigan ko'shimcha hissa mavjuddir. Kambag'allashgan qatlamlardan tashqarida, biroq unga yaqin joyda hosil bo'lgan tashuvchilar, ma'lum bir vaqtda kambag'allashgan qatlamga diffuziyalanadi. Bu dreyf bilan taqqoslaganda yetarlicha sekin jarayondir. Diffuziya davom etishi mumkin bo'lgan maksimal vaqt tashuvchilarning yashash vaqtiga tengdir (p -sohadagi elektronlar uchun τ_p va n -sohadagi kovaklar uchun

τ_n). Diffuziyani ta'sirini p - i - n -diodlardan foydalanish hisobiga kamaytirish mumkin.

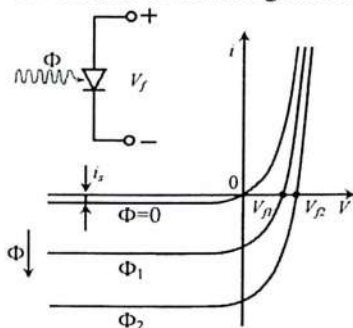
Siljish. Elektron asbob sifatida fotodiod quyidagi nisbat bilan aniqlanadigan volt-ampere tavsifga egadir:

$$i = i_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] - i_f. \quad (30.13)$$

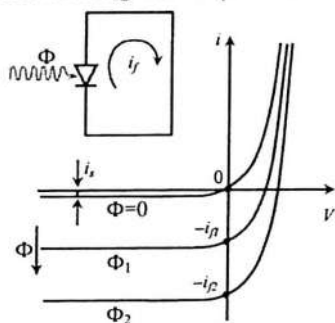
Uning grafik ko'rinishi 92-rasmda ko'rsatilgan. Yuqoridagi ifoda p - n -o'tishning oddiy volt-ampere tavsifidir, biroq unga fotonlar oqimiga proporsional bo'lgan $-i_f$ fototok kiritilgan.



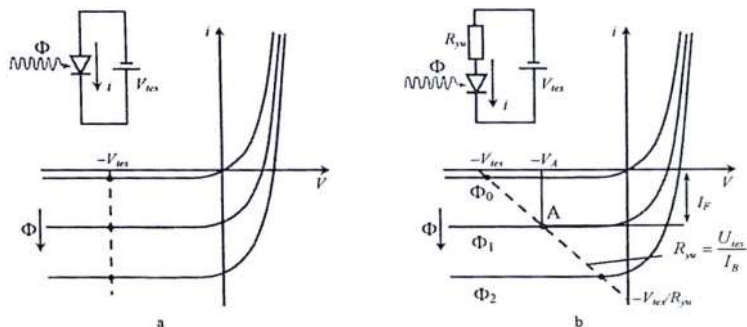
92-rasm. Fotodiodning umumiy sxemasi va uning volt-ampere tavsifi



93-rasm. Fotodiod ishlashining fotogalvanik rejimi



94-rasm. Fotodiod ishlashining qisqa tutashuv rejimi



95–rasm. Fotodiod ishlashining teskari siljigan rejimi: a) yuklama qarshiligsiz, b) yuklama qarshiligi bilan

Fotodiod ishlashining uchta rejimi mavjuddir: salt yurish rejimi (fotogalvanik), qisqa tutashuv va teskari siljigan (fotooʻtkazuvchi). Salt yurish rejimida (95–rasm) yorugʻlik kambagʻallashgan qatlamda elektron-kovak juftligini hosil qiladi. Qatlamning n -tomonidan ozod boʻlgan qoʻshimcha elektronlar, p -tomonidagi kovaklar bilan rekombinatsiyalanadi (va aksincha). Natijada elektr maydon oshadi. Bu esa asbonda foto-EYUKni hosil qiladi. uning kattaligi fotonlar oqimi oshishi bilan oshadi. Bu rejim quyosh bateriyalarida ishlatiladi.¹⁹ Fotogalvanik diodning sezgirligi volt/amper da oʻlchanadi. fotogalvanik rejim fotodiodning toki quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$I_H = \frac{U}{R_{yw}} = I_f - I_{p-n} = I_f(\Phi) - I_0 \exp\left(\frac{U}{\varphi_H} - 1\right), \quad (30.14)$$

bu yerda, φ_H – issiqlik potentsiali; U – dioddagi kuchlanish.

$R_{yw} \rightarrow \infty$ boʻlgan salt yurish rejimida (5.5) ifodadan maʼlum bir yorugʻlik oqimida foto-EYuK ning maksimal qiymatini topish mumkin:

$$U_{yw} = \varphi_H \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_0}\right). \quad (30.15)$$

¹⁹ Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of photonics. Second edition. A John Wiley&Sons, Inc., USA. p.764-765.

Qisqa tutashuv rejimi ($V=0$) 94-rasmda ko'rsatilgan. Qisqa tutashuvda fotodioddagi kuchlanish nolga ($U=0$) teng bo'lsa, fotodioddagi tok foto tutashuvchilar oqimi tomonidan hosil qilinadi. Kremniyli fotodiodda foto-EYuK 0,5...0,55 V tashkil qiladi.

Fotodiod 95, a – rasmda ko'rsatilganidek, teskari siljigan rejimda yoki «fotoo'tkazuvchi» rejimda ishlashi mumkin. Mazkur rejimda potensial to'siq hosil bo'ladi va o'tish orqali tok I_{p-n} , nurlanish mavjud bo'lmaganda oqib o'tadigan I_0 tok bilan aniqlanadi. Yorug'lik oqimini $p-n$ o'tishga ta'sir qilgandagi fotodiod toki quyidagicha bo'ladi:

$$I_{FD} = I_f + I_0 \approx I_f \quad (30.16)$$

Agarda zanjirga ketma ket tarzda yuklama qarshiligi ulansa, asbob 96, b – rasmda ko'rsatilganidek ishlaydi.

Yuklangan rezistorning volt-ampere tavsifi to'g'ri chiziq bo'lib, uning tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$U_{ms} - I_f R_{sw} = U_A, \quad (30.17)$$

bu yerda, U_A – 95, b – rasmda ko'rsatilganidek, Φ_1 yorug'lik oqimiga mos keluvchi A ishchi nuqtada fotodioddagi kuchlanish. Teskari kuchlanishning ishchi oraliqlarida fototok yuklama qarshiligiga bog'liq bo'lmaydi. O'zgarmas tokka diod qarshiligi yorug'lik oqimi o'zgarganda keng oraliqda o'zgaradi. Shuning uchun ba'zan fotodiod rejim iborasi o'rniga fotorezistorli rejim iborasi ishlatiladi. O'zgaruvchan tokdagi fotodiod qarshiligi ko'rilayotgan sohada katta va yorug'lik qiymatining katta qiymatlarida kamayishi mumkin.

Teskari kuchlanishning katta qiymatlarida $p-n$ o'tishning ko'chkili teshilishi kuzatiladi. Agarda yuklama qarshiligi yordamida $p-n$ o'tishning katta teskari tokini cheklasa, u holda fotodiod rejimidagi fototok bilan taqqoslanganda fototokni bir necha marotaba kuchaytirish xususiyatiga ega bo'lgan tiklanadigan elektr asbobni ishlatuvchi foto qabul qilgich amalga oshirish mumkin. Bu effekt ko'chkili fotodiodlarda ishlatiladi

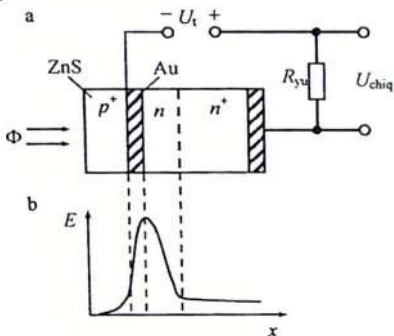
30.5. Shottki fotodiodi

Shottki to'siqli fotodiodning soddalashtirilgan strukturasi 96 – rasmda keltirilgan.

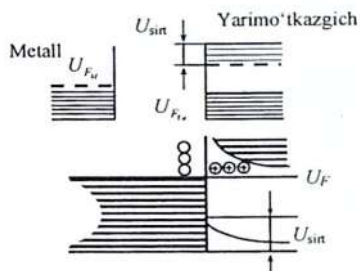
Kuchli legirlangan n^+ kremniy taglikka yuqori Omli n -turdagi yarimo'tkazgichning yupqa epitaksial qatlami o'stiriladi. So'ngra o'ta

tozalangan n -turdagi material sirtiga yupqa ($\approx 0,1$ mkm) yarim shaffof parda changlatiladi. Uning ustiga akslanishga qarshi qoplama olinadi.

«Metall–yarimo‘tkazgich» kontaktining strukturasi va xususiyati metaldagi (U_{FM}) va yarimo‘tkazgichdagi (U_{FYa}) Fermi sathining o‘zaro joylashuviga bog‘liq bo‘ladi. $U_{FM} < U_{FYa}$ holat uchun «metall–yarimo‘tkazgich» kontaktining zona diagrammasi 97– rasmda keltirilgan.



96– ras. Shottki to‘siqli fotodiod:
a – strukturasi; b – strukturada maydonning taqsimlanishi



97 – ras. «metall yarimo‘tkazgich» kontaktning zona diagrammasi

Kontakt hosil bo‘lganda elektronlar n -turdagi yarimo‘tkazgichdan metalga o‘tishadi. Bunda metall va yarimo‘tkazgich chegarasi yaqinida donor musbat ionlarining hajmiy zaryadi hosil bo‘ladi. Bunga bog‘liq holda elektron maydoni hosil bo‘ladi.

Yarimo‘tkazgichlar yaqinidagi energetik sathlar bukiladi. Sathlarining bukilish darajasi U_{sirt} sirt potentsiali bilan tavsiflanadi. Uni yarim-o‘tkazgich hajmi va sirt potentsiallari farqi sifatida topish mumkin. Tashqi kuchlanish va optik nurlanish mavjud bo‘lmaganda o‘tish muvozanat holatda bo‘ladi. Bu holat muvozanatli sirt potentsiali U_{sirt0} bilan tavsiflanadi. Kontakt oldi qatlamidagi potentsial to‘siqni Shottki to‘sig‘i deyiladi. Uning balandligi p - n o‘tishdagi ichki potentsial to‘siq kabi o‘xshash bo‘ladi. Qo‘yilgan tashqi kuchlanish qutbga bog‘liq ravishda Shottki to‘sig‘ining balandligi va kontakt oldi qatlamining qarshiligi o‘zgaradi.

To‘g‘ri kuchlanish $U_{to‘g‘}$ qo‘yilganda (musbat qutbini metalga, manfiy qutbni n turli yarimo‘tkazgichga) potentsial to‘siq pasayadi,

kontakt oldi qatlami asosiy zaryad tashuvchilar – elektronlar bilan boyidi va “metall – yarimo‘tkazgich” o‘tish qarshiligi muvozanatligidan kichik bo‘ladi. Tashqi kuchlanishning qutbi o‘zgartirilsa, ya’ni o‘tishga teskari kuchlanish U_{es} qo‘yilsa (96, a –rasmda ko‘rsatilagnidek), u holda kontaktdagi potensial to‘siq oshadi. Mazkur holatda kontakt oldi qatlami asosiy tashuvchilar – elektronlar bilan yanada kuchli kambag‘allashadi va uning qarshiligi muvozanatli holatlar bilan solishtirilganda oshadi. Shunday qilib “metall – yarimo‘tkazgich” kontakti to‘g‘irlash xususiyatiga egadir va Shottki diodlari deb ataluvchi asboblarning asosi bo‘lishi mumkin.

Shottki diodlarining $p-n$ o‘tishli diodlar bilan solishtirgandagi o‘ziga xos tomoni noasosiy tashuvchilarning yo‘qligidir. Shottki diodlarida asosiy tashuvchilarning harakati ishlatiladi. Ularda noasosiy tashuvchilarning diod bazasida jamlanishi va so‘rilishi bilan bog‘liq bo‘lgan sekin jarayonlar mavjud bo‘lmaydi.

Shottki to‘siqli fotodiodlarda nurlanish kvantini metall kontaktda yutilish ehtimolligi majuddir (nurlanish kvantlari energiyasi taqiqlangan soha kengligidan kichik bo‘lasa). Nurlanish kvantlarining energiyasi potensial to‘siq balandligidan katta bo‘lsa, g‘alayonlangan elektronlar potensial to‘siq orqali metaldan yario‘tkazgichga o‘tishi mumkin. Natijada fotodiodlar spektral tavsifining uzun to‘lqinli chegarasi kattaroq to‘lqin uzunliklari tomon siljiydi.

Shottki fotodiodlari kvantlar energiyasi oshishi bilan nurlanishini yutilish sohasi fototashuvchilarni ajratuvchi maydon mavjud bo‘lgan hajmiy zaryad qatlamiga siljiydi. $p-n$ o‘tishli fotodiodlar kichik chuqurlikdagi yutilishda fotodiod deyarli nolga teng. Demak, Shottki fotodiodi spektral tavsifining qisqa to‘lqinli chegarasi qisqaroq to‘lqinlarda joylashgandir.

Shottki fotodiodlarini optoelektronikada qo‘llashning istiqboli quyidagi afzalliklar bilan tushuntiriladi:

- fotodiod bazasi qarshiligining kichikligi. Shuning uchun Shottki fotodiodlarida to‘siq sig‘imining domiy vaqti C_{av}, r_s taxminan 10^{-12} ga tengdir. Inersionlik faqatgina fototashuvchilarning hajmiy zaryad sohasi orqali o‘tish vaqti bilan aniqlanadi – $10^{-10} \dots 10^{-11}$ s;

- yuqori tezkorlik va yuqori sezgirlikning ($S_f=0,5$ A/Vt) uyg‘unligi;

- turli metall va yarimo‘tkazgichlarda to‘g‘rilovchi fotosezgir strukturani yaratishning soddaligi. Bu esa Shottki potensial to‘siq balandligini boshqarish imkonini beradi. Xususan Shottki to‘siqli

kremniyli fotodiod $\lambda=0,63$ mikrometrdagi 10^{-10} s tezkorlik va $S_f=0,5$ A/Vt fotosezgirlik bilan ishlaydi;

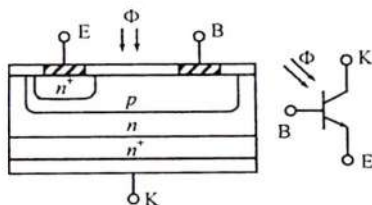
- Optik integral mikrosxemalar bilan yaxshi mos kelishlik.

Uzun to'liqinli sohaga siljish uchun baza sohasining solishtirma qarshiligini oshirishda va bir vaqtning o'zida uning qarshiligini ham oshirishadi, ya'ni $m-i-n^+$ strukturaga o'tilmoqda, bu yerda, m metalni anglatadi.

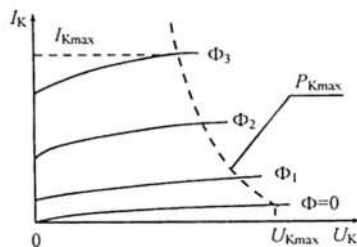
30.6. Fototranzistor

Fototokni kuchaytirish imkoni bilan tranzistor strukturasi ishlatiladigan fotoqabul qilgich asboblari fototranzistor deb ataladi. Bu asboblari odatda umumiy emitter sxemasi bo'yicha ulangan bitta (98 va 99-rasmlar) yoki bir nechta tranzistorlardan (100-rasm) iborat bo'ladi.

98-rasmda keltirilgan eng sodda fototranzistorda optik nurlanish strukturaning ishchi sohasi – bazaga tushadi. Bu yerda fototashuvchilarning hosil bo'lishi ta'minlanadi. Keyinchalik ular $p-n$ o'tish tomonidan ajratiladi. Fototashuvchilarning ajratilishi konsentratsiya-ni elektr kuchaytirish mexanizmi hisobiga qo'shimcha oshishi bilan birga yuz beradi.



98-rasm. Fototranzistor



99-rasm. Fototranzistor VAT oilasi

Kovaklar o'tishlar orqali p -sohaga o'tsa, elektronlar bazada qoladi. Elektronlarning hajmiy zaryadi tomonidan hosil qilinadigan maydon bazadagi zaryadni baza toki ($I_b=0$) hisobiga kamaytira olmaydi. Shuning uchun hajmiy zaryad maydoni kovaklarning bazaga qo'shimcha injeksiyasini keltirilgan holda, emitter o'tishning potensial to'sig'ini pasaytiradi. Mazkur holatda fototok baza tokining vazifasini bajaradi. Fototranzistorning kirish tavsiflari bipolyar tranzistorniki kabi, ya'ni

oddiy fotodiod bilan solishtirilganda fototranzistor tokning kuchayishini beradi.

Fototranzistorning integral sezgirliqi quyidagicha aniqlanadi:

$$S_f = S_{FD} \beta, \quad (30.18)$$

bu yerda S_{FD} – tranzistorning emitter o'tishi hosil qilinadigan fotodiodning tokli sezgirliqi; β – tranzistor tokining kuchaytirish ko'effitsiyenti (h parametrlar tizimida h_{21UE}).

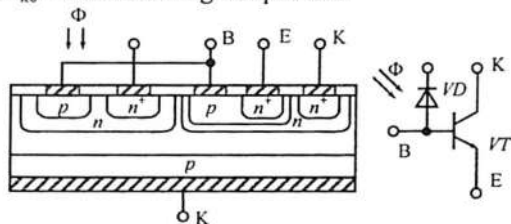
Fototranzistorning chiqish tavsifi 100–rasmda keltirilgan. O'ziga xos tomoni shundan iboratki, unda aniq ifodalangan kollektor tokining to'yinish sohasi yo'q va oilalar notekis taqsimlangan. Bu holat lyuks amper tavsifining nochiziqliligi bilan tushuntiriladi: yuqori yoritilganlikda fototok tez o'sadi.

Yuqori sezgirlik fototranzistorning fotodiod oldidagi asosiy afzalligidir. Biroq bu afzallikka asbobning harakat turg'unligini pasaytirish hisobiga erishiladi.

Fototranzistorlarda issiqlik toki sezilarli darajada oshganligi uchun ostonaviy sezgirlik ham pasayadi:

$$I_T = I_{K0}(1 + \beta), \quad (30.19)$$

bu yerda I_{K0} – tranzistorning issiqlik toki.

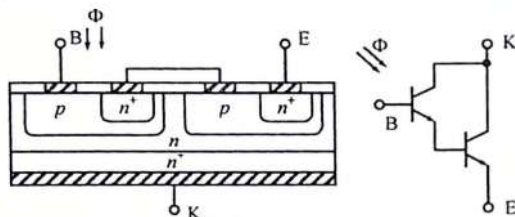


100-rasm. Diod-tranzistorli foto qabul qilgich

Fototranzistorning keng qo'llanilishini va mazkur asboblarning parametrlarini yaxshilashni quyidagi holatlar qiyinlashtiradi: yuqori uzatish ko'effitsiyenti va kichik uzib ulanish vaqti baza sohasining h_b qalinligini kamaytirishni talab qiladi. Bu esa fotosezgirlikning pasayishiga olib keladi. Ko'rsatilgan parametrlar orasida murosalar kerakligini fototranzistorning nisbatan kichik tezkorligi $10^{-6} \dots 10^{-5}$ s aniqlaydi.

Tezkorlikni oshirish fotodiod va tranzistor uyg'unligi bo'lgan ichki kuchaytirilishli integral foto qabul qilgichlarda amalga oshirilishi

mumkin. Strukturalarning eng maqbullarini alohida olish 101-rasmda ko'rsatilganidek, bitta strukturada sezgir, tez ishlovchi fotodiod va yuqori sifatli tranzistorni olishga imkon beradi. Bunday struktura tokning ichki katta kuchaytirishli tez ishlovchi fototranzistoriga ekvivalentdir.



101-rasm. Tarkibiy fototranzistor

Sezgirlikni sezilarli oshirishga 101-rasmda ko'rsatilgan fototranzistor imkon beradi. Tarkibiy tranzistordagi toklar orasidagi bog'lanish quyidagi ko'rinishga ega

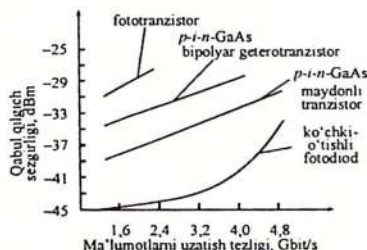
$$I_K = I_{K1} + I_{K2} = \beta_1 I_{E1} + \beta_2 I_{E2} = \beta_1 I_{E1} + \beta_2 (1 + \beta) I_{E1}. \quad (30.20)$$

Tarkibiy tranzistorning β kuchaytirish koeffitsiyenti quyidagicha aniqlanadi:

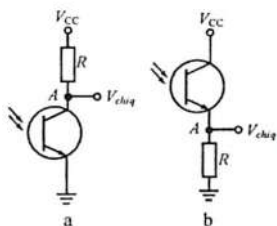
$$\beta \frac{I_{K1}}{I_{E1}} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2 \approx \beta_1 \beta_2. \quad (30.21)$$

Natijada tarkibiy fototranzistorlarning sezgirligi fotodiod sezgirligidan 10^3 marta yuqori bo'ladi.

Yuqorida ko'rib chiqilgan foto qabul qilgich asboblari optik tolali uzatish tizimlarini ishlab chiqishda keng qo'llaniladi. Optika qabul qilgichlar sezgirligining axborotni uzatish tezligiga bog'liqligi 102-rasmda keltirilgan.



102-rasm. Optik qabul qilgichlar sezgirligining axborotni uzatish tezligiga bog'liqligi



103– rasm. Fototranzistorning ulanish sxemasi

Fototranzistorlarning amaliy qo'llanilish sxemasi 103–rasmda ko'rsatilgan.²⁰ 103, a – rasmda fototranzistorning umumiy emitter ulanishi keltirilgan bo'lsa, 103, b–rasmda umumiy kollektor ulanishi keltirilgan. Umumiy emitter ulanish sxemasida yorug'lik tushmagan boshlang'ich holatda A nuqtadagi potensial yuqori bo'ladi. Fototranzistorga yorug'lik tushishi bilan A nuqtadagi potensial kamayadi. Umumiy kollektor ulanish sxemasida boshlang'ich holatda A nuqtadagi potensial kichik bo'ladi. Yorug'lik tushishi bilan A nuqtadagi potensial ortadi. Fototranzistor ikkita rejimda ishlashi mumkin: faol va kalit rejimida. Faol rejimda fototranzistor tavsifning faol sohasida ishlaydi va chiqish kuchlanishi tushayotgan yorug'lik jadalligiga proporsional bo'ladi. Kalit rejimida fototranzistor to'yinish va uzilish orasida o'tib yuradi. Chiqish kuchlanishi mos ravishda kichik va katta holatlarda bo'ladi. Rejimlar R rezistor qiymati bilan boshqariladi.

30.7. Fototiristor

Uchta va undan ortiq $p-n$ o'tishga ega bo'lgan, VATda manfiy differensial qarshilik sohasi mavjud bo'lgan foto qabul qilgich asbobga fototiristor deyiladi.

Uchta $p-n$ -o'tishli fototiristorning strukturasi 104–rasmda keltirilgan. Bunday strukturaning chetki p va n -sohalarini emitter, ularga tegib turuvchi o'tishlarni – emitter o'tishlari deb atalsa, markaziy o'tish kollektor o'tish nomini oladi. O'tishlar orasida baza sohalari (p va n) mavjuddir. n -emitter bilan kontakti ta'minlovchi elektrodni katod deb

²⁰ Anil K. Maini Lasers and optoelectronics: fundamentals, devices, and applications. 2013 John Wiley and Sons Ltd., UK. p.341.

atalsa, p -emitter bilan kontaktini ta'minlovchi elektrodni anod deb ataladi.

Strukturaga to'g'ri kuchlanish qo'yilgan (104-rasm) vaqtidagi fototiristorning ishlashini ko'rib chiqamiz. Tokning uzluksizlik qonuni bo'yicha statik rejimda kollektor o'tishi O_2 orqali o'tayotgan tokni quyidagicha yozishimiz mumkin:

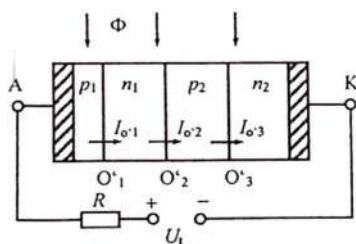
$$I_{o2} = (I_{k0} + I_n) + a_1(I + I_n) + a_2(I + I_n). \quad (30.22)$$

Bu yerdan quyidagini olamiz:

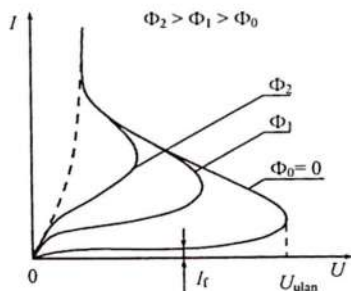
$$I(1 - a_1 - a_2) = I_{k0} + a_1 I_n + I_n + a_2 I_n, \quad (30.23)$$

bu yerda I_n , I_{n2} , I_{n3} nurlanish tomonidan hosil bo'lgan tok tashuvchilarning mos $p-n$ o'tishda ajratilishi tufayli hosil bo'lgan fototoklar.

Yorug'lik mavjud bo'lmaganda, ya'ni $I_{f1} = I_{f2} = I_{f3} = 0$ da tiristor VAT uchun fototiristorning qorong'ilik tavsifini aniqlovchi ikki elektrod (dinistorli) ulanish holatidagi ifodani olamiz. Yoritilganda struktura orqali oqib o'tayotgan tok I , o'tish orqali o'tayotgan I_f fototok hamda kollektor o'tishning I_{k0} xususiy toklarining o'zaro amal qilishi bilan aniqlanadi. Yoritilganlik darajasi o'zgarishi bilan o'zgaradigan $a_1 I_n + I_n + a_2 I_n$ kattalik oddiy tiristordagi boshqarish tokining vazifasini bajaradi deb ta'kidlash mumkin, ya'ni nurlanish oqimi ta'sirida fototiristorning ulanish kuchlanishi o'zgaradi. Turli nurlanish quvvatidagi monoxromatik nur bilan yoritilgan fototiristorning VAT oilasi 105-rasmda keltirilgan. Fototiristorlar katta quvvatlarni uzib ulash uchun istiqbolli asbob hisoblanadi.



104-rasm. Fototiristor strukturasi



105-rasm. Fototiristor VAT oilasi

30.8. Fotorezistor

Fotorezistorlarda infraqizil, ko'rish yoki ultra binafsha nurlanish ta'sirida modda qarshiligidining o'zgarish hodisasidan foydalaniladi. Fotorezistorning asosiy elementi yoritilganda qarshiligi o'zgaradigan yarimo'tkazgichli plastinadir. Foto o'tkazuvchanlik mexanizmining hosil bo'lishini quyidagicha tushuntirish mumkin. Issiqlik energiyasi ta'siri natijasida qorong'ilikdagi yarimo'tkazgichda katta bo'lmagan miqdorda harakatchan zaryad tashuvchilar (elektronlar va kovaklar) paydo bo'ladi. Mos holda yarimo'tkazgich boshlang'ich o'tkazuvchanlikka σ_0 ega bo'ladi hamda uni qorong'ilikdagi o'tkazuvchanlik deb ataladi:

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (30.24)$$

bu yerda e – elektrod zaryadi; μ_n – elektron harakatchanligi; μ_p – kovaklar harakatchanligi; n_0 va p_0 muvozanat holatida yarimo'tkazgichdagi harakatchan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi.

Yorug'lik ta'sirida harakatchan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi oshadi. Bunda ularni paydo bo'lishining turli mexanizmlari mavjuddir. Kovaklar va elektron konsentratsiyasining o'sishi elektromagnit nurlanishlar elektronlarni g'alayonlashtirishi va ularni valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tkazishi hisobiga yuz berishi mumkin. Elektronlar valent zonadan kirishma sathiga o'tganda faqatgina kovakli elektr o'tkazuvchanlik oshadi. Elektronlar kirishma sathidan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tganda ham elektr o'tkazuvchanlik kuzatiladi. Shunday qilib, yorug'lik bilan yoritilganda yarimo'tkazgichda harakatchan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi Δn va Δp kattalikka oshsa, uning o'tkazuvchanligi keskin o'sadi:

$$\sigma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p] \quad (30.25)$$

Yorug'lik ta'sirida yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligining o'zgarishi uning fotoo'tkazuvchanligidir:

$$\sigma_f = \sigma - \sigma_0 = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p). \quad (30.26)$$

Yorug'likning ravshanligi o'zgarganda yarimo'tkazgichning fotootkazuvchanligi o'zgaradi. Nurlantiruvchi yorug'lik oqimi ulanganda, zaryad tashuvchilar paydo bo'lish jarayonining jadalligi tushayotgan jadallikka mos statsionar qiymatga tez erishmasdan, vaqt o'tishi bilan eksponensial qonun bo'yicha o'sib boradi:

$$\Delta n(t) = a \eta \pi N(1 - e^{-t}), \quad (30.27)$$

bu yerda N – bir sekund davomida birlik yuzaga tushuvchi fotonlar soni. α – yarimo‘tkazgichga yutilgan energiyani tavsirlovchi yutilish koeffitsiyenti, η – bitta foton yutilganda hosil bo‘ladigan zaryad tashuvchilar miqdorini aniqlovchi kvant chiqishi, τ -nomuvozanatli zaryad tashuvchilarning yashash vaqti.

Nurlanish vaqti yetarli darajada $t \geq (3..5)\tau$ katta bo‘lsa, nomuvozanatli zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi statsionar qiymatga erishadi. Elektronlarning valent zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishida (yarimo‘tkazgich tomonidan energiyaning xususiy yutilishi) elektronlar va kovaklar juft bo‘lib paydo bo‘lganda, nomuvozanatli kovaklar soni nomuvozanatli elektronlar soniga teng bo‘ladi:

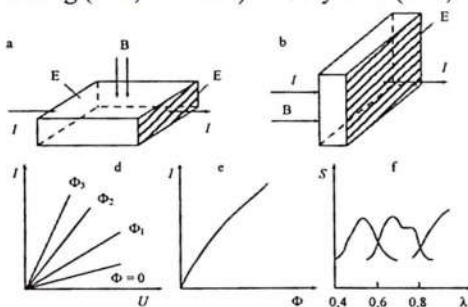
$$\Delta n = \Delta p = \alpha \eta N. \quad (30.28)$$

Asosan bitta ishoradagi zaryad tashuvchilar paydo bo‘ladigan kirishmali yutilishda yoki elektronli, yoki kovakli fotoo‘tkazuvchanlik o‘rinli bo‘lib, o‘tish rejimida eksponensial qonuniyat bo‘yiga o‘zgaradi:

$$\Delta n(t) = \Delta n e^{-t/\tau}. \quad (30.29)$$

Nurlantiruvchi oqimni ulaganda va uzganda σ_f ning sekin-astalik bilan o‘zgarish hodisasi fotoo‘tkazuvchanlikning relaksatsiyasi deyiladi.

Konstruktiv jihatdan fotorezistor yarimo‘tkazgich plastinasi bo‘lib, uning sirtiga elektr o‘tkazuvchi elektrod o‘tkaziladi. Fotorezistorlarning 106 – rasmda ko‘rsatilganidek ikkita konstruksiyasi bo‘lishi mumkin: ko‘ndalang (106, a – rasm) va bo‘ylama (106, b – rasm).



106–rasm. Fotorezistorlarning ko‘ndalang (a) va bo‘ylama (b) konstruksiyasi, fotorezistorning volt-amper (d), energetik (e), nisbiy spektral (f) tavsiflari

Birinchi holatda fotorezistorga qo'yilayotgan elektr maydon va g'alayonlantiruvchi yorug'lik o'zaro perpendikulyar tekisliklarda amal qilsa, ikkinchisida bitta tekislikda amal qiladi. Bo'ylama fotorezistorlarda g'alayonlantirish mazkur nurlanish uchun shaffof bo'lgan elektron orqali amalga oshiriladi. Ko'ndalang fotorezistor chastotasi bir necha o'n va yuzlab megagersni tashkil qiladigan deyarli ochiq qarshilikdir. Bo'ylama fotorezistor konstruktiv o'ziga xosligi tufayli sezilarli darajada geometrik sig'imga ega bo'lib, uni bir necha yuz ming gerslarda toza omik qarshilik deb hisoblashga imkon bermaydi.

Fotorezistorlar uchun boshlang'ich material sifatida ko'pincha talliy oltingugurti, tellur selenidi, vismut oltingugurti, qo'rg'oshin oltingugurti, qo'rg'oshin telluridi, kadmiy oltingugurti va boshqalar ishlatiladi.

30.9. Fotorezistorlarning asosiy tavsiflari va parametrlari.

Volt-ampere tavsifi yorug'lik oqimining Φ turli qiymatlarida fotorezistor orqali oqib o'tayotgan I tokni, uning chiqishlariga qo'yilgan kuchlanishga bog'liqligi (107, d – rasmga muvofiq). $\Phi=0$ dagi tokni qorong'ulik toki I_q ataladi, $\Phi>0$ dagi tokni I_{um} umumiy tok deb ataladi. Mazkur toklarning farqi fototokka teng bo'ladi.

$$I_f = I_{um} - I_q \quad (30.30)$$

Energetik tavsif – $U=\text{const}$ da fototokning yorug'lik oqimiga bog'liqligidir, u 5.30, e – rasmda keltirilgan. Kichik Φ sohasida bog'liqlik chiziqli bo'lsa, Φ oshishida fototokning o'sishi zaryad tashuvchilarning tutqichlar orqali rekombinatsiya ehtimolligining oshishi va ularning yashash vaqti kamayishi hisobiga sekinlashadi. Energetik tavsifni, ba'zida lyuks-ampere tavsifi deb ham atashadi. U holda abssissa o'qiga yorug'lik oqimi emas, balki lyukslarda ifodalangan E yoritilganlik qo'yiladi.

Sezgirlik. Fotorezistorlarda ko'pincha tokli sezgirlik S ishlatiladi. Uni fototokning (yoki uning orttirmasining) nurlanishini (yoki uning orttirmasini) tavsiflovchi kattalikka nisbati tushuniladi. Ortirmalarning nisbati bo'lganda, sezgirlik differensial sezgirlik deb ataladi.

Nurlanishni qaysi kattalik tavsiflashiga bog'liq ravishda yorug'lik oqimiga tokli sezgirlik

$$\Phi - S_\Phi = I_\Phi / \Phi \quad (30.31)$$

va E yoritilganlik tokli sezgirlik mavjuddir:

$$S_E = \frac{I_\Phi}{E}, \quad (30.32)$$

Nurlangan yorug'likning spektral tarkibiga bog'liq ravishda sezgirlik yoki integral S_{int} (nomonoxromatik nurlanishda) yoki monoxromatik S_λ (monoxromatik nurlanishda) bo'lishi mumkin.

Fotorezistorlarning asosiy parametrlaridan biri sifatida solishtirma integral sezgirlik ishlatilib, u fotorezistorga bir volt kuchlanish qo'yilgandagi integral sezgirlikni tavsiflaydi:

$$S_{\text{f sol. int}} = \frac{I_f}{\Phi U} \quad (30.33)$$

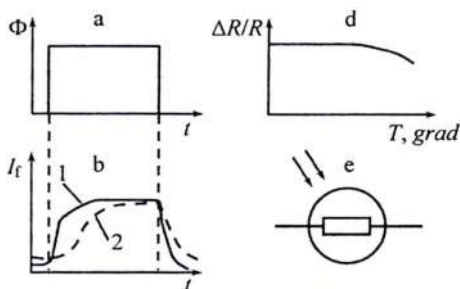
Sanoatda ishlab chiqariladigan fotorezistor solishtirma integral sezgirliги yoritilganlik $E=200$ lk bo'lganda o'nlar, yuzlar mA/(v·lk) oralig'ida yotadi.

Mutloq $S_{\text{mut.}}(\lambda)$ va nisbiy $S(\lambda)$ spektral tavsif. Mutloq spektral tavsif mutloq birlikda ifodalanuvchi monoxromatik sezgirlikning qayd qilinayotgan nurlanish oqimining to'liq uzunligiga bog'liqligini ifodalaydi:

$$S(\lambda) = S_{\text{mut}} \frac{\lambda}{S_{\lambda \text{max}}}. \quad (30.34)$$

Spektral tavsif fotorezistor materiali va unga kiritilgan kirishma bilan aniqlanadi. 107, d – rasmda CdS, CdSe, CdTe materiali asosida tayyorlangan fotorezistorning spektral tavsifi keltirilgan. Spektral tavsifi ko'rinishidan, ayrim turdagi fotorezistorlar uchun “nur tarqatgich –foto qabul qilgich” juftligini sinchkovlik bilan tanlash kerakligi kelib chiqadi.

Chegaraviy chastota – yorug'lik oqimini modellashtiruvchi sinusoidal signalning chastotasi fcheg bo'lib, unda fotorezistor sezgirliги modullashtirilmagan oqimdagi ($f_{\text{cheg}} \approx 10^3 \dots 10^5$ Gs) sezgirlik bilan taqqoslaganda $\sqrt{2}$ marta kamayadi.



107–rasm. Kirish signali (a), oʻtish (b) va harorat (d) tavsifi hamda uning shartli belgilanishi (d)

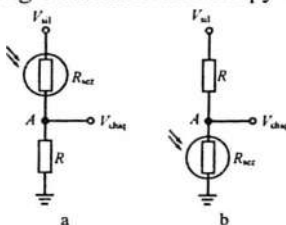
Ayrim hollarda fotorezistorlarning chastotaviy xossalari 107, a, b – rasmda, yuqori (egri chiziqlik 1) va past (egri chiziqlik 2) qorongʻulik oʻtkazuvchanligiga ega boʻlgan yarimoʻtkazgichlar uchun keltirilgan oʻtish tavsifi bilan tavsiflanadi.

Fototokning harorat koeffitsiyenti fotorezistor parametrining harorat oʻzgarishi bilan oʻzgarishini tavsiflaydi:

$$\alpha_T = \left. \frac{\partial I \Phi}{\partial T} \frac{1}{I_\Phi} \right|_{\Phi = \text{const}} \quad (30.35)$$

Sanoatda ishlab chiqarilgan fotorezistorlarda $\alpha_T \approx 10^3 \dots 10^4 \text{ grad}^{-1}$. Baʼzida atrof muhitning harorati oʻzgarganda qarshilikning nisbiy oʻzgarishini tasvirllovchi fotorezistorning harorat tavsifi ishlatiladi.

Ostonaviy oqim – fotorezistorni oʻzining xususiy shovqin fonida aniqlashi mumkin boʻlgan Φ_{oq} oqimning minimal qiymati. Φ_{oq} oʻrtacha kvadrat sinusoidal – modullashtirilgan yorugʻlik oqimi sifatida aniqlanib, uning taʼsirida oʻrtacha kvadratik chiqish elektr signali fotorezistor shovqinining oʻrtacha kvadratik qiymatiga teng boʻladi.



108– rasm. Fotorezistorning ulanish sxemasi

108–rasmda fotorezistorning amaliy qo'llanilishi keltirilgan. Mazkur sxemada A nuqtadagi potensial $U_{chiq} = U_{sil} \frac{R}{R_{sez} + R}$ (108, a – rasm

uchun) va $U_{chiq} = U_{sil} \frac{R_{sez}}{R + R_{sez}}$ (108, b – rasm uchun) ifodaga muvofiq

o'zgaradi. 108, a – rasmda fotorezistorga yorug'lik tushishi bilan A nuqtadagi potensial oshib boradi. 108, b – rasmda esa aksincha potensial kamayib boradi. Demak tanlanayotgan R va R_{sez} qiymatlari chiqish kuchlanishiga ta'sir qiladi. 108, a – rasmda R ning qiymati katta bo'lsa, chiqish kuchlanishi ham katta bo'ladi. Biroq nisbiy sezgirlik yaxshi bo'lmaydi. 108, b – rasmda R ning qiymati katta bo'lsa, chiqish kuchlanishi kichik bo'ladi. Biroq nisbiy sezgirlik yaxshi bo'ladi.²¹

Yaxshi sezgirlikni va katta chiqish kuchlanishini olish uchun fotorezistor operatsion kuchaytirgich bilan birgalikda ishlatiladi. Bu bilan yuqorida keltirilgan muammo bartaraf qilinadi.

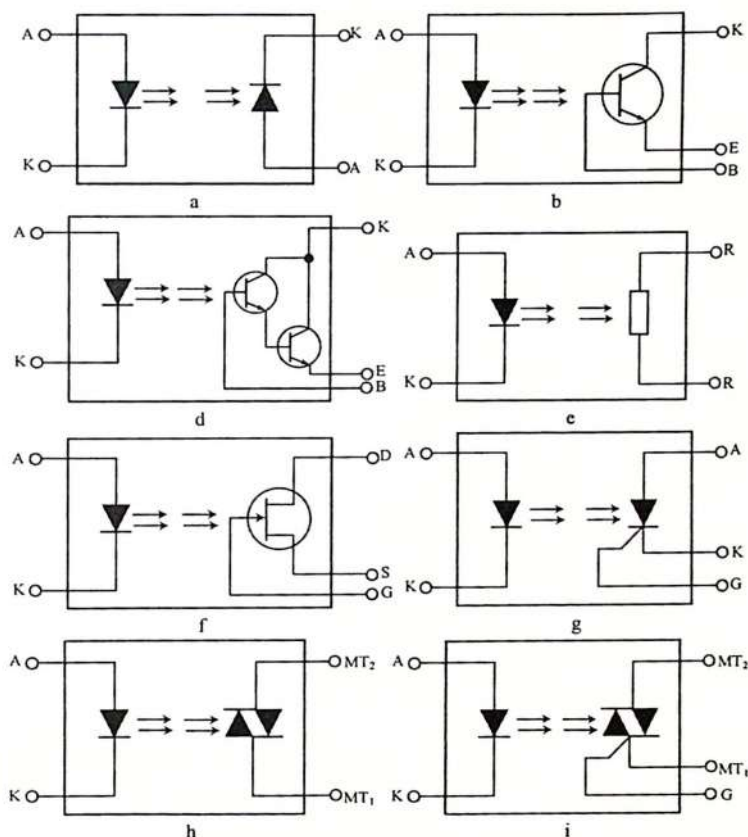
30.10. Optronlarning sinflanishi va asosiy vazifasi

Optoelektron zanjirining asosiy elementlaridan biri elektr yo'li bilan oshqariladigan optik nurlanish manbasi va fotoqabul qilgichning optik bog'langan juftligi bo'lgan optron bo'lib, uning elektr tavsiflari nurlanish jadalligiga bog'liq ravishda yetarlicha keng oraliqda o'zgaradi.

Optronlarning sinflanishi asosiga turli xil mezonlar qo'yilgan bo'lishi mumkin. Optronlar funksional mo'ljallanganligi bo'yicha sinflanishi mumkin. Bunda uchta turdagi optronlar mavjuddir:

- nurlanishni o'zgartirish va kuchaytirish uchun mo'ljallangan tashqi optik va ichki elektr bog'lanishli optronlar;
- o'zgaruvchan qarshilik sifatida ishlatiladigan ichki optik bog'lanishli optronlar;
- kalit sifatida ishlatiladigan elektr bog'lanishli optronlar.

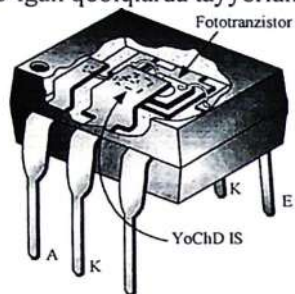
²¹ Anil K. Maini Lasers and optoelectronics: fundamentals, devices, and applications. 2013 John Wiley and Sons Ltd., UK. p.326.



109-rasm. Optronlarning shartli belgilanishi.

Optronlarning sinflanishi uchun boshqa mezon bo'lib, ishlatilayotgan foto qabul qilgichning turi xizmat qilishi mumkin. Uning tanlanishi asosan optron parametrlari bilan aniqlanadi. Bu mezon bo'yicha optronlar 109-rasmda tasvirlangandek, quyidagi ko'rinishga bo'linadi: fotodiodni ishlatuvchi (109, a – rasm); yakka fototranzistorni ishlatuvchi (109, b – rasm); tarkibiy fototranzistor ishlatiladigan (109, d – rasm); fotorezistor ishlatiladigan (109, e – rasm); maydonli fototranzistorni ishlatiladigan (109, f – rasm); fototiristor ishlatiladigan

(109, g – rasm); fotosimistor ishlatiladigan (109, h – rasm) va foto-TRIAC ishlatiladigan (109, i – rasm). Ko‘pincha optojuftliklar oltita chiqish simiga ega bo‘lgan qobiqlarda tayyorlanadi (110 – rasm).²²



110 – rasm. Optojuftliklarning tashqi ko‘rinishi

Optronlarning asosiy parametrlariga quyidagilar kiradi: tok uzatish koeffitsiyenti, ajratish qarshiligi va tezkorlik.

Tok uzatish koeffitsiyenti K_i optronning chiqishidagi tokni uning kirishidagi tokka nisbati sifatida aniqlanadi:

$$K_i = \eta_N K_U \eta_{FQQ} G, \quad (30.36)$$

bu yerda $\eta_N = \frac{N_N}{I_{kr}/e}$ – nur tarqatgichning kvant samaradorligi

bo‘lib, u nurlangan kvantlar sonini N_N nur tarqatgich $p-n$ o‘tishi orqali o‘tgan elektron soniga I_{kr}/e nisbati bilan aniqlanadi; K_U – yorug‘likni nur tarqatgichdan fotoqabul qilgichga uzatishini tavsiflovchi koeffitsiyent; K_{FQQ} – chiqish zanjiriga yetib kelgan zaryad tashuvchilar sonini yutilgan kvantlar soniga nisbati sifatida aniqlanadigan fotoqabul qilgich samaradorligi; G – kuchaytirish koeffitsiyentini; N – nurlangan kvantlar soni.

Uzatish koeffitsiyentini oshirish optronlarni konstruksiyarlashdagi asosiy vazifa hisoblanadi. Shuning bilan uning har bir tashkil qiluvchisini oshirish imkonini izlash maqsadga muvofiqdir. Nur tarqat-

²² Optoelectronics: infrared-visible-ultraviolet devices and applications. Second edition. Edited by D. Birtalan, W. Nunley. 2009 by Taylor & Francis Group, LLC, USA.

gichning kvant samaradorligini oshirishga rekombinatsiya jarayonida nurlanishli o'tish ulushini oshirish bilan erishish mumkin. Bu esa quyidagilar bilan bog'liqdir:

- strukturani takomillashtirish va yarimo'tkazgichli materialning tozaligini oshirish;

- nur tarqatgich uchun nurlanishli rekombinatsiya jarayoni sayoz rekombinatsiya markazlarinining mavjud bo'lishi bilan bog'langan noto'g'ri zonali yarimo'tkazgichni ishlatilish. Bunda energiyasi yarimo'tkazgichning taqiqlangan soha kengligiga mos keluvchi energiyadan kichik bo'lgan kvantlar nurlanadi. Natijada yarimo'tkazgichlarda ularning yutilish ehtimolligi sezilarli darajada pasayadi;

- "yarimo'tkazgich – atrof muhit" bo'linish chegarasida to'liq ichki akslanish bilan bog'liq bo'lgan yo'qotishlarni pasaytirish uchun yarimo'tkazgichning sindirish koeffitsiyentiga yaqin sindirish koeffitsiyentli qoplama va maxsus shakldagi (masalan, yarim sferali) kristallarni ishlatish.

Foto qabul qilgichning samaradorligi uning elektrofizik va struktura – texnologik parametrlari bilan aniqlanadi. Foto qabul qilgichlarni, ularning spektral tavsiflariga qo'yilgan talablarni hisobga olgan holda ularni konstruktorelash vaqtida yuqoridagi parametrlarning maqbul uyg'unligini tanlash η_{FQQ} samaradorlikni oshirishga imkon beradi. Fotoqabul qilgich va nur tarqatgichning yuqori spektral muvofiqligi η_{FQQ} oshirishning asosiy vositalaridan biridir.

K ni oshirish, nur tarqatgich va foto qabul qilgich orasidagi tirqishni kamaytirish va ular orasida maqbul muhitni maqbul tanlashdan iboratdir. Bundan tashqari K ni yorituvchi qatlamni o'tqazish hisobiga optik muhit va fotoqabul qilgich chegarasidagi akslanish koeffitsiyentini kamaytirish bilan erishish mumkin. Qatlamning n_q sindirish ko'rsatkichi $\sqrt{n_q}$ ga (n_M – qoplanadigan materialning sindirish ko'rsatkichi) teng bo'lishi, tushuvchi va akslanayotgan to'lqinlarning fazalari farqi $n_q d = \frac{\lambda}{4}(2m+1)$ (bu yerda λ – to'lqin uzunligi; d –

sindiruvchi qatlam qalinligi, $m=1,2,3, \dots$) π ga karrali bo'lishi kerak. Bu shartlar bajarilganda $\lambda = 4dn_q$ to'lqin uzunligidagi nurlanishning akslanishi nolga teng bo'ladi. Ichki kuchaytirish, fototranzistor, fototiristor kabi foto qabul qilgichlar uchun xosdir.

G oshirish bitta kristallda foto qabul qilgich bilan kuchaytirgich tayyorlanganda erishish mumkin. Oddiy holda bu fototranzistorga bitta qo'shimcha tranzistor (Darlington sxema) kiritishdir.

11-jadval

Optronlarning asosiy tasvirlari

Optron turi	Uzatish koeffitsiyenti, %	Bog'lanish qarshiligi, R_m	Tezkorlik, s	R_Q/R_{TB}
Diodli	0,5...1	$10^{11}...10^{13}$	10^{-8}	—
Tranzistorli	10...100; 1000...10000 (Darlington sxemasi)	$10^{11}...10^{13}$	$(2...5) \cdot 10^{-6}$	—
Tiristorli	100	$10^{11}...10^{13}$	$(20...100) \cdot 10^{-6}$	—
Rezistorli	—	—	$10^{-1}...10^{-2}$	$10^4...10^7$

Shuni hisobga olish kerakki, odatda G oshirishi tezkorlikning pasayishiga va harorat turg'unligining yomonlashuviga olib keladi. Tok uzatish koeffitsiyenti to'g'risidagi to'liqroq ma'lumotni optron turlaridan biri uchun uzatish tavsifi beradi.

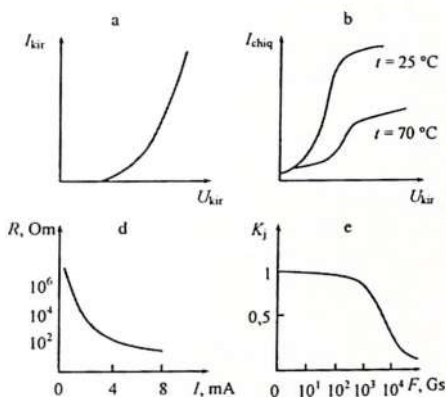
Optronlarning asosiy tavsiflari 6-jadvalda keltirilgan. Optronlarning tezkorligi ulanish va uzatish vaqtlarining yig'indisi bilan tasvirlanadi. Rezistorli optronlarni uzatish koeffitsiyenti bilan tavsiflanmasdan, qorong'ulikdagi rezistor qarshiligi R_Q va yoritilgandagi qarshilik R_{YO} nisbatlari bilan tasvirlanadi.

30.11. Rezistorli optojuftliklar

Rezistorli opto juftliklarda nur tarqatgich sifatida YoChD, IQ-nurlanishli diod yoki o'ta mitti chulg'amli lampa ishlatiladi. Foto qabul qilgich elementi sifatida fotorezistor, ya'ni ko'rinadigan yorug'lik nuri yoki ko'rinmaydigan infraqizil nur ta'sirida qarshiligi kamayadigan yarimo'tkazgichli rezistor ishlatiladi. Fotorezistor qarshiligining kamayishi yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligini oshiruvchi yorug'lik ta'sirida erkin zaryad tashuvchi juftligining (elektronlar va kovaklarni) hosil bo'lishi hisobiga yuz beradi.

Foto rezistorli optojuftlik odatda kadmiy selenidi ($CdSe$) yoki kadmiy oltingugurti (CdS) asosida tayyorlanadi. Asosiy talab nur tarqatgich va qabul qilgichning spektral tavsiflarning muvofiqligidir.

Nur tarqatgich yorug'lig'i bo'lmaganda fotorezistorning qorong'ulik toki odatda birlarcha mikroampelni tashkil qiladi. Nurlantirilganda fotorezistor o'tkazuvchanligi sezilarli darajada o'sadi (yuz, ming marta). O'tkazuvchanlik nur tarqatgichning yorug'lik kuchiga proporsional bo'ladi. Shuning uchun nur tarqatgich tokini o'zgartirish yo'li bilan fotorezistor o'tkazuvchanligini o'zgartirish mumkin. Fotorezistor xususiyati qo'yilgan kuchlanish qutbiga bog'liq bo'lmaydi. Shuning uchun fotorezistorni o'zgaruvchan tok zanjiriga ulashga imkon beradi.



111-rasm. Rezistorli optojuftlikning tavsifi

a – kirish; b – turli haroratlardagi uzatish tavsifi; d – chiqish tokining kirish tokiga bog'liqligi; e – chastota tavsifi

Fotorezistor va nur tarqatgich optojuftlik qobig'i ichida izolyatsiya qarshiligi yuqori bo'lgan optik shaffof muhit (kley) bilan bog'langan. Shuning uchun nur tarqatgich zanjiri "optojuftlik – fotoqabul qilgich" chiqish zanjiridan ishonchli izolyatsiya qilingan. Optojuftlik parametrlari haroratga bog'liq bo'ladi.

Fotorezistor haroratining oshishi uning yorug'lik qarshiligining oshishiga va fototokning kamayishiga olib keladi. Harorat oshganda qorong'ulik toki oshadi, qorong'ulik qarshiligi kamayadi. Rezistorli optojuftlikning kamchiligi tezkorlikning pastligidir.

Rezistorli optojuftlikning muhim tavsiflari: kirish VAT, chiqish haroratli uzatish – chiqish qarshiligining kirish tokiga bog'liqligi va chastotaviy tavsif. Ular 6.8-rasmda keltirilgan.

Rezistorli optojuftlikni o'zgarmas hamda o'zgaruvchan tok zanjirida kontaktisiz kommutatsiya qilish va boshqarish uchun ishlatiladi.

Rezistorli optojuftlikning keng qo'llanilishini aniqlovchi afzalligini chiqish tavsifining chiziqligi va simmetrikligi, fotoEYUK ning yo'nalishi, ixtiyoriy uzatuvchi chiqish zanjirida yuqori kuchlanishlarda (yuzlarcha volt) ishlash imkoni, yuqori qorong'ulik qarshiligi.

30.12. Diodli optojuftlik

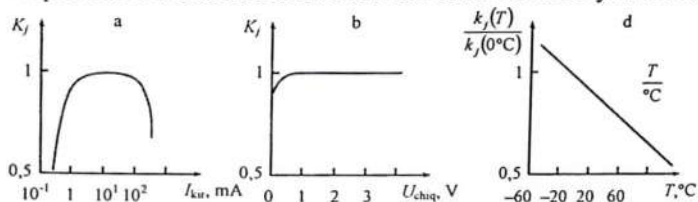
Diodli optojuftlikda foto qabul qilgich element sifatida kremniy asosidagi fotodiod ishlatilsa, nur tarqatgich sifatida infraqizil nurlanishli diod ishlatiladi. Nurlanuvchi diod spektral tavsifining maksimumi $\lambda=1\text{mkm}$ to'lqin uzunligiga mos keladi. Nurlantirilganda fotodiod-zda zaryad tashuvchilar juftligi – elektronlar va kovaklarning hosil bo'lishi yuz beradi. Generatsiya jadalligi yorug'lik kuchiga proporsionaldir. Mos ravishda kirish tokiga ham proporsionaldir. Erkin elektronlar va kovaklar fotodiod o'tishining maydoni tomonidan ajratiladi hamda p -sohani musbat, n -sohani manfiy zaryadlaydi. Shunday qilib, optojuftlik chiqish zanjirida foto-EYuK paydo bo'ladi. Real asboblarda ular 0.7.....0.8 V dan oshmaydi. FIK taxminan 1% tashkil qiladi.

Optojuftlik fotodiodiga 0,5 V dan ortiq teskari kuchlanish qo'yilgan bo'lsa, nurlanish tomonidan hosil qilingan elektronlar va kovaklar fotodiodning teskari tokini oshiradi. Teskari fototok nurlanuvchi diodning yorug'lik kuchi oshishi bilan deyarli chiziqli o'sib boradi.

Tezkorlikni oshirish uchun $p-i-n$ -strukturali fotodiod yaratiladi. p -va n -turda legirlangan sohalar orasida i xususiy o'tkazuvchanlikdagi yarim izolyatsiyalovchi kremniy qatlami ishlatiladi. i sohada yuzaga keluvchi kuchli elektr maydoni mazkur soha orqali zaryad tashuvchilar o'tish vaqtining qisqarishiga hamda fototokning tezda o'sishi va tushishiga olib keladi. Bunday fotodiodlarda fototokning o'sish va kamayish vaqti bir necha sekund, hattoki uning ulushini tashkil qiladi. Biroq optojuftlikning tezkorligi yana nur tarqatgich tezkorligi, shuningdek chiqish yuklamasining qarshiligiga bog'liq bo'ladi. Diodli optojuftlikda signal ushlanishining real vaqti 1mks tashkil qiladi.

Diodli optojuftliklarning xususiyatini tavsiflash uchun kirish va chiqish VATi, fotogenerator va fotodiod rejimlarda uzatish tavsiflari ishlatiladi.

Optojuftlikning chiqish tavsifi diod VATining teskari tarmog'iga o'xshashdir. Teskari tok deyarli kuchlanishga bog'liq bo'lmaydi. Yuqori kuchlanishlarda fotodiodlarda elektr teshilish yuz beradi.



112–

rasm. Diodli optojuftlikning uzatish koeffitsiyentini kirish tokiga (a), chiqish kuchlanishiga (b) va haroratga (d) bog'liqligi

Fotodiod rejimida uzatish tavsifi, chiqish tokining kirish tokiga bog'liqligi bo'lib, kirish tokining keng oralig'ida deyarli chiziqlidir. Tokni uzatish koeffitsiyenti bir foizni tashkil qiladi.

Fotogenerator rejimida uzatish tavsifi nochiziqlidir. Kirish toki oshganda foto-EYUK to'yinishga intiladi: u fotodiod o'tishidagi kontakt potensial farqidan oshmaydi va odatda 0,5 ... 0,8 Vni tashkil qiladi.

Diodli optojuftlik uzatish koeffitsiyentining kirish tokiga, chiqish kuchlanishiga va haroratga bog'liqligi 6.9 – rasmda keltirilgan.

Elektron qurilmalarda diodli optojuftliklar ishlatilganda mazkur optojuftlik sinfiga xos bo'lgan bir qator xususiyatlar amalga oshiriladi: yuqori tezkorlik, chiqish zanjirida kichik qorong'ulik toki, galvanik ajratishning yuqori qarshiligi.

Takrorlash uchun savollar

1. Yarim o'tkazgichli asboblarning sanoatda va ishlab chiqarishda ishlatilishi?
2. O'tilgan yarim yillik o'quv yiliga xulosalar qilish va yakuniy nazorat testini o'tkazish?
3. Diodli optojuftlik?
4. Rezistorli optojuftliklar?
5. Optonlarning sinflanishi va asosiy vazifasi
6. Fotorezistorlarning asosiy tavsiflari va parametrlari.
7. Fotorezistor?
8. Fotorezistorlarning asosiy tavsiflari va parametrlari?

XULOSA

Radiotexnikaning rivojlanishi bevosita uning asosi bo'lgan elektrotexnikaning rivojlanishiga bog'liq. Eng oddiy asboblardan biri - vakuumli diodni 1883 yilda amerikalik T.A. Edison ixtiro qilgan. U oddiy cho'g'lanma tolali elektr lampochkasi ichiga yana bitta elektrod joylashtirganda ular orasida hosil bo'lgan tok faqat bir tomonga yo'nalganligini kuzatgan. Dioddan o'tayotgan tokning elektronlar oqimidan iborat ekanligini esa ingliz olimi E. Tomson isbotlab bergan, undan detektor sifatida foydalanish mumkinligini 1904 yilda ingliz E. Fleming ko'rsatib o'tgan bo'lsa, birinchi vakuumli triodni 1906 yilda amerikalik Lui de Farast ixtiro qilgan.

Umuman, radioelektronikaning rivojlanishini shartli ravishda uch davrga bo'lish mumkin. Birinchi davrda (1896-1920) asosan uzun to'lqinlardan foydalangan holda telegraf aloqasi yo'lga qo'yildi. Radiouzatuvchi qurilmalarda uchqunli, elektromashinali va elektr yoyli generatorlar qo'llanilgan. Priyomnik sifatida sezgirliги kam bo'lgan detektorlar ishlatilgan.

Ikkinchi davrda (1920-1955) elektron lampalardan keng foydalanilgan. Radioqurilmalarda elektrovakuumli lampalar keng miqyosda ishlatilib, ular asosida quyi va yuqori chastotali kuchaytirgichlar, generatorlar manometrlar yasalgan, 1918 yilda super geterodinli priyomnik loyihasi ixtiro qilingandan so'ng, uni amalga oshirish natijasida qabul qiluvchi qurilmalarning sezgirliги keskin ortdi. Natijada qisqa va ultraqisqa to'lqinlar diapazoni o'zlashtirildi.

Uchinchi davrda (1955 yildan boshlab) yarim o'tkazgichli asboblardan keng ko'lamda qo'llanila boshladi.

Yarimo'tkazgichlarning o'zgaruvchan tokni to'g'rilash xususiyatini 1875 yilda nemis olimi K.F.Braun sezgan edi. 1922 yilda rus olimi O.V. Losev ayrim kristallarda tebranishlarni hosil qilish va kuchaytirishda foydalanish mumkinligini ko'rsatib berdi. Birinchi yarim o'tkazgichli triod, ya'ni, tranzistorni AQSh da D.Bardin va V.Bratten yaratdilar. Dastlabki integral mikroshemalar esa 60- yilning oxirida paydo bo'ldi.

Mikroshemalarning yaratilishi radiotexnika sohasida inqilobiy o'zgarishlarga olib keldi. Shundan so'ng elektronika aniq ikki qismga, ya'ni katta quvvatli radioelektronikaga va mikroelektronikaga ajraldi. Mikroelektronikaning vazifasi ko'pincha yarim o'tkazgichli asboblarni

hamda ma'lum darajada radiosxemalarni o'z ichiga olgan kam quvvatli qurilmalarni yaratishdan iborat.

Keyingi paytlarda radioelektronikaning rivojlanishi bilan yangi sohalar vujudga keldi, bularga misol qilib, optoelektronika, magnitoeyelektronika, bioelektronika, molekulyarelektronika va akus-to-elektronika sohalarni keltirish mumkin. Optoelektronika elektromagnit to'liqlar shkalasidan joy olgan optik diapazondan axborotni uzatish va qabul qilishda foydalanish imkoniyati borligi bilan bevosita bog'liqdir.

Akustoelektronika sohasida ishlaydigan qurilmalarda elektromagnit to'liqlar bilan birgalikda elastik, ya'ni tovush to'liqlaridan keng foydalanilmoqda.

Hozirgi zamon sanoati, halq xo'jaligi va maishiy xizmatini radioelektron asboblarsiz, hisoblash texnikasisiz tasavvur qilib bo'lmaydi. Bu borada radioelektronika sohasini o'rganish muhim ahamiyat kasb etadi. Shuningdek maktab ustaxonalarida elektr asboblarni ishlatishda va shunga o'xshash ko'pgina sohalarda mehnat qilishda radiotexnika hamda elektron texnika fanidan olingan bilimlarning ahamiyati katta.

ADABIYOTLAR.

1. Baxadixanov M.K., Iliev X.M., Tachilin S.A., Nasriddinov S.S., Abduraxmanov B.A. "Применение фотоэлектрического эффекта в кремнии с многозарядными кластерами марганца". *Geliotekhnika*, №2, 2008 g.
2. Nurullo Zikrillayev, Elyor Saitov. Silicon materials - the future of photovoltaics. Silicon-based nanocluster technology as a promising material for photovoltaics. Lambert Academic Publishing, 2020 y, 96 pp.
3. Muxamed Kabir Baxadixanov, Nurullo Zikrillayev, Sobirjon Isamov, Koveshnikov Sergey Vladimirovich. Fotoelektricheskiy yavleniya v kremniy s mnogo-zaryadnymi nanoklasternami. Lambert Academic Publishing, 2019 g, 277 s.
4. Ayupov Qutub Saitovich. Nerovnovesnie protsessy v silnokompensirovannom kremni. Monografiya. "Nurfayz nashriyoti, Toshkent-2020 g., 248 s.
5. I.A.Yuldoshev, M.N.Tursunov, S.Q.Shog'o'chqarov, T.R.Jamolov. Quyosh energetikasi. O'quv qo'llanma. "Sano standart" nashriyoti, Toshkent-2019 y., 168 b.
6. Baxadixanov M.K., Sattarov O.E., Mavlonov G'.H. Yarimo'tkazgichlar fizikasi fanidan masalalar to'plami. O'quv uslubiy qo'llanma, Toshkent 2020 y, 145 b.
7. Nurullo Zikrillayev, Elyor Saitov, Xayrulla Zikrillayev. Kirishma atomlari klasterlariga ega bo'lgan kremniy asosida samaradorligi yuqori fotoelementlar texnologiyasini yaratish. Monografiya, Tafakkur nashriyoti, Toshkent – 2020 y, 174 b.
8. Pchelyakov O.P., Nikiforov A.I., Paxanov N.A., CHikichev S.I., YAKimov A.I., Perspektivnye nanogeterostruktury na kremniy dlya fotovoltayki // Sbornik trudov VI mejdunarodnoy konferentsii «Kremniy – 2009» - 10 iyulya 2009, Rossiya, Novosibirsk.
9. Farenbrux A., Byub R., Solnechno'e elementy: teoriya i eksperiment, M., Energoatomizdat, 1987 god.
10. Koltun M.M., Selektivno'e opticheskie poverxnosti preobrazovateley solnechnoy energii, M., Nauka, 1979 god.
11. Koltun M.M., Optika i metrologiya solnechno'x elementov, M., Nauka, 1985 god.
12. Koltun M.M., Solnechno'e elementy, M., Nauka, 1987 god.
13. Raushenbax G., Spravochnik po proektirovaniyu solnechno'x batarey, M., Energoatomizdat, 1983 god.
14. V.M.Andreev, V.A.Grilixes, V.D.Rumyansev, Fotoelektricheskie preobrazovanie konsentrirovannogo solnechnogo izlucheniya, Nauka, Leningrad, 1989 god.
15. T.Moss, G.Barrel, B.Ellis, Poluprovodnikovaya optoelektronika, M., Mir, 1976 god.
16. S.Zi, Fizika poluprovodnikovo'x priborov. kniga 2, M., Mir, 1984 god.

17. A. Milns, D. Foyxt, Geteroperexodo⁺ i perexodo⁺ metall-poluprovodnik, M., Mir, 1975 god.

18. Sovremennoe⁺ problema⁺ poluprovodnikovoy fotoenergetiki, pod redaksiei T. Koutsa, Dj. Mikina, M., Mir, 1988 god.

19. Medvedev S.A., Vvedenie v tekhnologiyu poluprovodnikov⁺x materialov, M., Mir, 1970 god.

20. Kurnosov A.I., Yudin V.V., Tekhnologiya proizvodstva poluprovodnikov⁺x priborov, M., 1974 god.

21. Glazov V.M., Zemskov V.S., Fiziko-khimicheskie osnovy⁺ legirovaniya poluprovodnikov, M., Nauka, 1967 god.

22. M. K. Bahadurxonov, X. M. Iliev, K. S. Ayupov, B. A. Abduraxmonov, P. Yu. Krivenko, R. L. Xolmuxamedov Samoorganizatsiya primesnykh atomov nikelya v kremnii // Neorganicheskie materialy, 2011, tom 47, № 9, s. 1062–1064.

23. Abduraxmanov B.A., Bahadurxonov M.K., Iliev X.M., Nasriddinov S.S. O diffuzii atomov germaniya v kremnii // Doklady AN RUZ. – Tashkent, 2008. – № 1. – S. 18–20.

24. Радиоизлучение Солнца <https://www.theguardian.com/society/2015/oct/28/116-things-that-can-give-you-cancer-list> Guardian. The 116 things that can give you cancer — the full list

25. Расчёты теплоступлений в здание от проникающей солнечной радиации за отопительный период. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Методическое пособие. Москва. 2017 год.

26. Finlay Colville/ How Buried Contacts Brought Lasers to Life in Solar/ Production & inspection production technology USA/74-77 pgs 2009.

27. Chen Jiahe, Emanuele Cornagliotti, Eddy Simoen, Ellen Hieckmann, Joerg Weber and Jeff Poortmans, "A deep level transient spectroscopy study on the interface states across grain boundaries in multicrystalline silicon" physica status solidi (RRL)-Rapid Research Letters 5, no. 8 (2011): 277-279.

28. Slesarenka V.N. Water desalination. – M.: Energoatomizdat, 2011.

29. Radovan Kopecek and Joris Libal, "Switch from p to n", PV magazine, 06/2012, pp. 86-94

30. YU.M Kurbonov, E.B Saitov, and B M Botirov. Analysis of the influence of temperature on the operating mode of a photovoltaic solar station. ICECAE 2020, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 (2020) 012034. DOI: 10.1088/1755-1315/614/1/012034

31. Saitov E.B. Optimal model for additional operation of the storage system for photovoltaic wind power plants. E3S Web of Conferences, Volume 220, Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives, SES 2020; Saint-Petersburg; Russian Federation; 29 October 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001080

**SAITOV E.B., ZAXIDOV N.M. ZIKRILLAYEV X.F.,
YULDOSHEV I.A., ABDURAXMONOV B.A**

**YARIMO‘TKAZGICHLI
MATERIALLARNING OPTIK VA
FIZIK XOSSALARI**

Muharrir: X. Tahirov
Texnik muharrir: S. Meliquziyeva
Musahhih: M. Yunusova
Sahifalovchi: A. Muhammad

Nashr. lits № 1961. 07.04.2022.
Bosishga ruxsat etildi 29.08.2022.
Bichimi 60x84 1/16. Ofset qog‘ozi. “Times New Roman”
garniturası. Hisob-nashr tabog‘i. 17,5.
Adadi 200 dona. Buyurtma № 1.

«BOOK TRADE 2022» MCHJ bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: Toshkent vil., Chirchiq sh., Madaniyat MFY,
Saodat ko‘chasi, 17-1.