

**QARSHI DAVLAT UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 RAQMLI ILMY KENGASH**

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT
TEXNIKA UNIVERSITETI**

ABRAYEVA SEVARA TOSHEMIROVNA

**CHANGLATISH VA ION IMPLANTATSIYA USULLARI BILAN Ge
YUZASIDA HOSIL QILINGAN NANOSTRUKTURALARNING
ELEKTRON TUZILISHI VA OPTIK XOSSALARI**

01.04.04 – Fizik elektronika

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Qarshi – 2024

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferatining mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctoral philosophy
(PhD) on physical-mathematical sciences**

Abraeva Sevara Toshtemirovna

Changlatish va ion implatatsiya usullari bilan Ge yuzasida hosil qilingan nanostrukturalarning elektron tuzilishi va optik xossalari.....5

Абраева Севара Тоштемировна

Электронные и оптические свойства наноструктур, созданных на основе германия методами осаждения и ионной имплантации.....23

Abraeva Sevara Toshtemirovna

Presentation on the electronic and optical properties of nanostructures on the surface of Ge by pollination and ion implantation methods..... 43

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works47

QARSHI DAVLAT UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 RAQMLI ILMIY KENGASH

ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT
TEXNIKA UNIVERSITETI

ABRAYEVA SEVARA TOSHTEMIROVNA

CHANGLATISH VA ION IMPLANTATSIYA USULLARI BILAN Ge
YUZASIDA HOSIL QILINGAN NANOSTRUKTURALARNING
ELEKTRON TUZILISHI VA OPTIK XOSSALARI

01.04.04 – Fizik elektronika

FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PHD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Qarshi – 2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FM720 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (резюме)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.qarshidu.uz) hamda “ZiyoNet” Axborot-ta’lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Tashmuhamedova Dilnoza Artikbayevna
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Egamberdiyev Bahrom Egamberdiyevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Sa’dullayev Alovuddin Boboqulovich
fizika – matematika fanlari nomzodi, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Farg‘ona politexnika instituti

Dissertatsiya himoyasi Qarshi davlat universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 raqamli Ilmiy kengashning 2024 yil “_____” _____ soat _____ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi (Manzil: 180119, Qarshi shahri, Ko‘chabog‘ ko‘chasi, 17-uy. Tel./faks:(99875) 225-34-13, email: kardu@mail.ru. Qarshi davlat universiteti majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Qarshi davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____ raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 180119, Qarshi shahri, Ko‘chabog‘ ko‘chasi, 17-uy. Tel./faks: (99875) 225-34-13

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil “_____” _____ kuni tarqatildi
(2024 yil “_____” _____ dagi №____ raqamli reestr bayonnomasi).

Normuradov M.T.

Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Allayarova G.X.

Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash kotibi fizika-matematika fanlari
bo‘yicha falsafa doktori, dotsent.

Tashatov A.K.

Ilmiy kengash xuzuridagi ilmiy
darajalar beruvchi ilmiy seminar raisi,
fizika-matematika fanlari doktori, professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda bugungi kunda nanoo'lchamli plyonkalarni olish va ularni turli sohalarda, jumladan, nano- va mikroelektronika sohasida, quyosh batareyalari, optik-elektron qurilmalarning aktiv elementlari va boshqalarda qo'llanilishiga alohida e'tibor qaratilmoqda, ayniqsa yarimo'tkazgichlar, xususan kremniy va germaniy ushbu sohalarni rivojlanishida asosiy xom – ashyo hisoblanadi. Jahonda so'nggi yillarda sof yarimo'tkazgichli, hamda turli tarkibli yarimo'tkazgichli strukturalariga bo'lgan qiziqish ortib bormoqda. Yuqori tozalik darajasi har bir material uchun o'ziga xosdir, biroq materialning zaryad tashuvchilarining konsentratsiyasidan yarimo'tkazgichdagi qoldiq aralashmalarning umumiy konsentratsiyasi yuqori bo'lmasligi kerak. Misol uchun, germaniy uchun $u \leq 2 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ ga teng. Si, Ge va boshqa yarimo'tkazgichlarning yuza xususiyatlarini to'laligicha nazorat qilish, ion implantatsiya qilinmagan qattiq jismda sodir bo'ladigan bir-biriga taaluqli bo'lmagan turli jarayonlarga bog'liqdir. Shuning uchun ion implantatsiya qilingan materiallarning yuza holatini elektron spektroskopiya va mikroskopiya usullaridan foydalangan holda har tomonlama ochib berish muhim ahamiyat kasb etadi.

Jahonda hozirgi vaqtda molekulyar nurli epitaksiyasi, termik o'tqazish va ion implantatsiyasi usullari bilan olingan Ge nanoplyonkalari va kvant nuqtalari asosidagi nano o'lchamli tizimlarning tarkibi, tuzilishi, fotoelektrik va optik xususiyatlari yaxshi o'rganilmoqda. Xususan, dunyoda birinchi marta c-Si sirtiga Ge^+ va Ag^+ ionlari bilan ketma-ket yuqori dozali implantatsiya qilish orqali Ag:GeSi plazmon kompozit materialini yaratish imkoniyati o'rganilgan. Ge^+ ionlari bilan implantatsiya Si qatlami sirtining amorfizatsiyasi bilan birga mayda donachali GeSi kompozit qatlamini hosil qiladi. Dunyodagi ayrim olimlarning ishlarida plyonkalardagi amorf va kristall fazalarning foiz nisbatini o'zgartirish orqali (bu plyonka olish rejimlari bilan belgilanadi), qo'shimcha ta'sirlarsiz (legirlash, nurlanish va boshqalar) hosil bo'lgan Ge nanokompozit plyonkalarining taqiqlangan zona kengligini boshqariladigan tarzda o'zgartirish mumkinligiga katta e'tibor qaratilmoqda.

Respublikamizda elektronika sohasini rivojlantirish uchun ko'plab yangi texnologiyalar yaratish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazish va ularni ishlab chiqarishga tadbir qilish bo'yicha, boshqa sohalar bilan bir qatorda, ko'plab ilmiy - amaliy ishlar olib borilmoqda. Shu bilan birga, ko'plab dolzarb fizik va amaliy muammolar ushbu masalalarni hal qilishga bog'liq. O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasining "Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti" da elementar va binar yarimo'tkazgichlar asosidagi nanoo'lchamdagi plyonkalarni sintez qilish, ularning kimyoviy tarkibi, elektron tuzilishi, fizik xususiyatlarini aniqlash hamda p-tipli CrSi_2 yupqa plyonkalari asosida termobatareyalar va fotoelementlar tayyorlash bo'yicha ilmiy ishlanmalar va innovatsion loyihalar yuzasidan vazifalar belgilangan¹. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, mikro va optoelektron

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021 yildagi PQ-5032-sonli "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida" qarori.

qurilmalar ishlab chiqarishda kichik energiyali ion implantatsiyasini qo'llash ko'lamini kengaytirishga yordam beradi, ikkinchi tomondan esa, kichik energiyali ion implantatsiyalangan qattiq jismlarning yuza va yuza osti sohalarida yuzaga keladigan fizik va kimyoviy jarayonlarning mexanizmlarini chuqurroq tushunish muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarda yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida", 2020-yil 29-oktyabrdagi PF-6097-son "2030 yilgacha fanni rivojlantirish konsepsiyasi"², 2019-yil 22-avgustdagi PQ-4422-son "Iqtisodiyot va ijtimoiy tarmoqlarning energiya samaradorligini oshirish, energiyani tejaydigan texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanadigan energiya manbalarini rivojlantirish to'g'risida", 2017-yil 7-fevraldagi PF-4947-son "O'zbekiston Respublikasini keyingi rivojlantirish bo'yicha harakatlar strategiyasi to'g'risida"³gi qarorlari, shuningdek, so'nggi yillarda respublikada bu sohada qabul qilingan boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlar belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublikada fan va texnologiyalar rivojlanishi ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi II. "Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik" va III. "Zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlik sohalarini rivojlantirish" fan va texnologiyalarini rivojlantirish ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. So'nggi yillarda dunyoning bir qator ilmiy markazlari Ge va Si oksidlarining yer yuzasida va yer yuzasiga yaqin sohasida yaratilgan nano o'lchamlardagi tuzilishlarning fizik-kimyoviy xossalari olish va tadqiq qilish bilan shug'ullanmoqda. Bu borada so'nggi vaqtda hind olimlari Ray S.K., Singha R.K. va boshqalar tomonidan molekulyar-nurli epitaksiya usuli yordamida Si(001) va SiO₂ sirtida Ge kvant nuqtalari olingan va ularning tuzilishi va optik xossalari o'rganilgan. Ular Ge nuqtalaridan infraqizil fotolyumenestsentsiya signali orolchalarining o'lchamlariga va Si/Ge aralashmasiga bog'liqligini o'rganishgan. Walters R.J. va Arwater H.A. (Kaliforniya Texnologiya Instituti) o'stirishning birinchi bosqichida Ge negiz sathlari piramidal shaklga ega bo'lishini aniqlashgan. Stavarache I., Valentin A.M. (Materiallar fizikasi milliy instituti, Ruminiya) 300, 400 va 500 °C bo'lganda Ge nanozarrachalari SiO₂ va Ge moddalarini tagliklarga bevosita birgalikda o'tqazishda shakllanishini ko'rsatishgan. Strasburg universiteti olimlari Fourches N., Postnikov A. va boshqalar Ge⁺ moddasining kremniyga yuqori energetik implantatsiyalashning nuqsonlar tufayli mexanik xususiyatlarning o'zgarishlariga ta'sirini o'rganish bo'yicha samarali izlanishlar olib borilgan. Stepanov A.L., Valliev V.F. va boshqalar Ag⁺ Nikolichev D.E. skanerlaydigan oje-mikroskopiya usulida o'z-o'zidan tashkil etilgan Ge_xSi_{x-1}/Si nanoklasterlarining tarkibini tadqiq qilishgan. Qalinligi bir necha nanometrlar bo'lgan kremniyning qoplama qatlamini qoplanishi profilning sezilarli

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020 yil 29 oktyabrdagi PF-6097-son "2030 yilgacha fanni rivojlantirish konsepsiyasi

³ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevraldagi PF-4947-son "O'zbekiston Respublikasini keyingi rivojlantirish bo'yicha harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi farmoni

o'zgarishlariga olib kelmasligi ko'rsatilgan, bu kremniy qatlamini o'stirishning past harorati (45 °C) bilan bog'liqligi aniqlangan. Patrone L., Sentis M., Ledoux va G. va boshqalar fotolyuminesentsiya polosalar maksimumlarining holatlarini kremniy nanokristallari o'lchamlariga bog'liqligini tavsiflaydigan kvant-o'lchamli modelni ishlab chiqishgan.

Normurodov M.T., Umirzoqov B.E., Risbayev A.S., Tashmuxamedova D.A. va ularning shogirdlari birinchi bo'lib Si, Ge, SiO₂ yuza sohasida nano o'lchamlardagi tuzilishlarni olishgan va ularning elektron va kristall strukturasi o'rganishgan.

Shu bilan birga changlatish va ion implantatsiya usuli bilan Ge yuzasida nanoo'lchamli yupqa plyonkalar hosil qilish, hamda ularning elektron tuzilishi, yuza sirtining morfologiyasi, elektrofizik va optik xususiyatlari deyarli darajada o'rganilmagan.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejaları bilan bog'liqligi. "Turli tabiatdagi (metall, yarimo'tkazgich, dielektrik) materiallarning elektron, kristall tuzilishi va xossalari past energiyali, yuqori dozali ionlarni implantatsiyalash va keyingi termik, IQ va lazerli qizdirish (yumshatish) bilan modifikatsiyalash" ilmiy rejasi va "BaSi₂ Ba Mn₄Si₇ nano o'lchamlardagi termoelektr yupqa qatlamlarning shakllantirish va ularning xususiyatlari" №Ф-ОТ-2021-422 loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi Ge yuzasida atomlarni changlatish va ion implantatsiya usuli yordamida germanidlarning shakllanishi qonuniyatlarini aniqlash hamda bu ta'sirlar natijasida ularning elektron va optik xususiyatlarining o'zgarish mexanizmlarini yoritishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

Ba atomlarini o'tqazish va keyingi qizdirishlarda Ge(111) ning tarkibi, elektron tuzilishi, emission va optik xossalari o'zgarish dinamikasiga ta'sirini, hamda yupqa nanoo'lchamli germanid plyonkalarini olishda ion implantatsiya va keyingi qizdirishning optimal texnologik rejimlarini aniqlash;

SrF₂ (111) yuzasida ideal kristalli tuziliashga ega va silliq ultra yupqa Ge plyonkasini olish metodikasini ishlab chiqish;

Ar⁺ ionlari bilan bombardimon qilishning Ge(111) elektron strukturasi ta'sirini o'rganish. Ion bombardimon qilingan vaqtda valent elektronlari zichligining o'zgarish mexanizmini nazariy tushuntirish;

Na⁺ ionlari bilan implantatsiya qilinganda Ge ning fotoelektron spektrlaridagi o'ziga xosliklarni, hamda Na⁺ va Ba⁺ ionlarining implantatsiyasi, keyingi qizdirish va lazerli ishlov berishning Ge(111) yuzasining tarkibi, kristall va elektron strukturasi ta'sirini o'rganish.

Tadqiqotning obyekti sifatida Ge monokristall namunalari va yupqa qatlamlari olingan.

Tadqiqotning predmeti Ion implantatsiya jarayonida germaniy yuzasida nanokristallar va nanoqatlamlarning shakllanishi qonuniyatlari va fizik mexanizmlari hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Oje – elektron spektroskopiyasi (OES), ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi (UBFS), elastik qaytgan elektronlar spektroskopiyasi

(EQES), xarakterli energiyasini yo'qotgan elektronlar spektroskopiyasi (XEYES), katta energiyali elektronlar difraksiyasi (KEED), rastri elektron mikroskopiya (REM), UV-1280 tipidagi spektrofotometr, to'rt zondli o'tkazuvchanlikni o'lchash usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

bariyini changlatish va keyingi qizdirish jarayonida Ge(111) yuzasi tarkibi, elektron va kristall tuzilishi o'zgarishlarining asosiy qonuniyatlari (chiqish ishining kamayishi, σ_m va Y oshishi), hamda yupqa nano'lchamli germanid plyonkalarini olishda ion implantasiya energiyasi $E_0 = 0,5 \text{ keV}$, $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ dozada va keyingi qizdirish ($T = 850 \text{ K}$) ning optimal texnologik rejimlari aniqlangan;

oldindan Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilish usulidan foydalanib SrF_2 (111) yuzasida $T=750 \text{ K}$ da changlatish usuli bilan olingan Ge plyonkasining adgeziyasi ortadi va Ge/ SrF_2 sistemasida qalinligi 25 – 30 Å bo'lgan bir jinsli, o'ta yupqa monokristall Ge(111) plyonkasi (o'tish qatlami) hosil bo'lishi aniqlangan;

Ge(111) yuzasini Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilishning kristall va elektron tuzilishiga ta'siri, ya'ni holat zichligi sezilarli darajada o'zgarishi kuzatilishi, bu esa o'z navbatida asosan yuzaga yaqin qatlamlarning buzilishi bilan tushuntirilishi aniqlangan;

Na^+ ionlari bilan implantasiya qilingan Ge ning valent elektronlar zichlik holatining o'zgarish dinamikasi, hamda Ge(111) ni Na ionlari implantasiyasi va keyingi qizdirish natijasida NaGe va NaGe_2 germanidlarining hosil bo'lish mexanizmlari va $T=850 \text{ K}$ haroratda Ge(111) yuza osti qatlamining to'liq kristallanishi va NaGe_2 tipidagi birikma hosil bo'lishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati quyidagilardan iborat:

$T=750 \text{ K}$ bo'lganda SrF_2 yuzasini dastlabki bombardimon qilish usulida changlanadigan Ge yupqa qatlamlarining yopishqoqligi oshgan, bu yuqori mukammal silliqlikka ega epitaksial Ge yupqa qatlamlarini olish imkonini bergan;

termik qizdirish yordamida aktiv elementning konsentratsiyasi chuqurligi bo'yicha monoton kamayadigan qatlamlarni olish mumkinligi o'rganilgan. Lazerli qizdirish natijasida ionli-legirlangan qatlam va matritsa o'rtasida keskin chegara vujudga kelgan;

EQE spektrida M_{45} Ge(111) negiz sathi eng yuqori qiymatining holati argon ionlari bilan bombardimon qilinishida deyarli o'zgarmagan, natriy ionlari bilan bombardimon qilinishida u kichik energiyalar tomon siljigan, kislorod ionlari bilan bombardimon qilinishida esa katta energiyalar tomonga siljigan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Elektron spektroskopiya va yuqori aniqlikdagi yuza diagnostikasining zamonaviy usullaridan foydalanish, ultra yuqori vakuum sharoitlarida tajribalar o'tkazish va toza namunalar uchun natijalarning boshqa mualliflarning ma'lumotlari bilan yaxshi muvofiqligi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati berilgan xususiyatlarga ega yangi materiallarni shakllantirish bo'yicha nazariyasini rivojlantirish uchun muhim ahamiyatga ega bo'lgan yupqa qatlamlarni adsorbsiyalash va ionlarni implantatsiyalashda Ge(111) tarkibi, elektron tuzilishi, emission va optik xossalarning o'zgarishlariga olib keladigan qonuniyatlar aniqlanganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati funksional elektronika asboblarini ishlab chiqishda ishlatilishi mumkin bo'lgan geterotuzilmali Ge/SrF₂ nano yupqa qatlamli tuzilish, hamda ko'rinadigan va IQ diapazonlarda ishlaydigan nanoelektron qurilmalarda ishlatilishi mumkin bo'lgan yuqori sezgirlikka ega bo'lgan NaGe₂ germanidlar olinish mumkinligi aniqlandi.

Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy qilinishi. Changlatish va ion implantatsiya usullari bilan Ge yuzasida hosil qilingan nanostrukturalarning elektron tuzilishi va optik xossalarini o'rganishda olingan ilmiy natijalar asosida:

Yarimo'tkazgichlarning yuza va yuza osti sohalarida nano o'lchamlardagi metall silitsidlarini shakllantirish bo'yicha tadqiqot natijalari, shuningdek, silitsidlar va germanid-germaniy-metall geterotizimlarini hosil bo'lishi algoritmi Uzb-Ind-2021-78 "Metal oksidi bilan legirlangan silikatlarda termo-elekr xossalari va o'z-o'zini tashkil qilish jarayonlari" loyahasini bajarishda foydalanilgan (Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitetining 2024-yilning 17-yanvardagi 01/11-590-sonli ma'lumotnomasi). Natijada kremniy dioksididan samarali va arzon termoelektrmateriallarni olish va uning asosida yuqori quvvatli energetikada, yupqa qatlamli silitsid va silikat shishalarida keng foydalanish uchun mo'ljallangan nanotizimlarni yaratish yo'llarini aniqlash imkonini bergan. Termoelekr hodisalarga asoslangan zamonaviy tenzometrik datchiklarni yaratish bo'yicha ilmiy tavsiyalar berilgan;

olingan natijalar asosida panjara parametrlari, kristall tuzilishining mukammallik darajasi aniqlangan, shuningdek energiyaga, nurlanish dozasi va implantatsiyadan keyingi qizdirishga bog'liq ravishda Ge va Si yuzasining kichik energiyali ion implantatsiya qilib olingan turli yupqa nano qatlamli tizimlarning atom strukturasi modellari ishlatilgan. Aktiv metall ionlarini kremniy namunalari ga implantatsiyalashda aralashma atomlarining chuqurlik bo'yicha taqsimlanishi ularning turiga bog'liq ravishda ionli qatlamda yoki legirlanmagan Si sohasida ortishi aniqlangan. Quyosh elementlarida ishlatiladigan germaniy va kremniy namunalari ni ionlar bilan implantatsiyalashda yuza qatlamlarining solishtirma qarshiligi, ikkilamchi elektron emissiya (IEE) koeffitsiyenti va yorug'likni qaytarish koeffitsiyentlarining o'zgarishi aniqlandi va "FOTON" AJda aralashma atomlari bilan legirlangan Si va Ge asosida yaratilgan yuqori yorug'lik sezgirlikka ega material olishda qo'llanilgan ("O'zeltexsanoat" AJ dan 2024 yil 30 yanvardagi 04-3/142-sonli ma'lumotnoma). Ilmiy natijalarni amaliyotda qo'llash yuqori sezgirlikka ega yorug'lik datchiklarini ishlab chiqarish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 8 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilindi.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 16 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 5 ta maqola (Respublika miqyosidagi, xorijiy jurnalda va Scopus ma'lumotlar bazasidagi jurnallarda) chop etilgan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish, to'rt bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya matni 114 bet matndan, shu jumladan 42 ta rasm va 7 ta jadvaldan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida dissertatsiya ishning dolzarbligi va zarurati, dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari, muammoning o'rganilganlik darajasi, tadqiqotni Respublika fan va texnologiyalar rivojlanish ustuvor yo'nalishiga mosligi, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati, tadqiqot natijalarini amaliyotga tadbiiq etilishi va aprobatsiya natijalari hamda dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi to'g'risida ma'lumotlar berilgan.

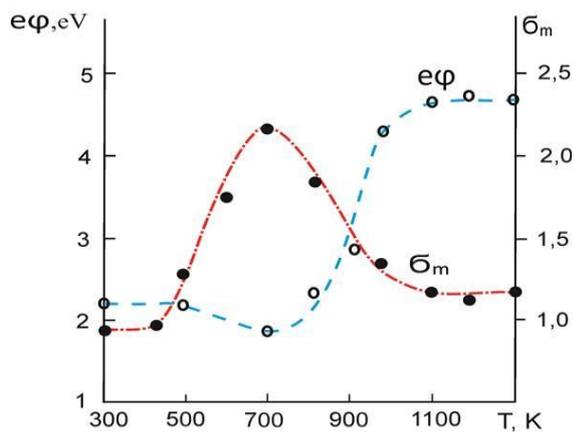
Dissertatsiyaning "Ge va Si plyonkalarining strukturasi va fizik xossalarini o'rganish bo'yicha adabiyotlar tahlili" deb nomlangan I-bobida, epitaksiya, termik diffuziya va ion implantatsiyasi jarayonlarida kremniy va germaniy yuzasida bariy va natriy yupqa silitsid va germanid qatlamlarining shakllanishi qonuniyatlarini tadqiq qilishga va ularning elektron tuzilishi, emission, optik va elektrofizik xususiyatlarini o'rganish bo'yicha ishlarning qisqacha adabiyotlar sharhiga bag'ishlangan. Bob oxirida dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalaridan kelib chiqib adabiyotlar sharhiga xulosa berilgan.

Dissertatsiyaning "Eksperimental tadqiqotlar usullari" deb nomlangan II-bobida yuzani tozalash usullari, Ge monokristalining yuzasini tozalash, ion implantatsiyasi va keyingi termik qizdirish, shuningdek, ularni ishlash jarayonlarini qisqacha tavsifi, Ge monokristallarining yuza va yuza osti qatlamlarini o'rganish uchun qo'llaniladigan zamonaviy usullar: Oje – elektron spektroskopiyasi, ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi, elastik qaytgan elektronlarning spektroskopiyasi, xarakterli energiya yo'qotgan elektronlar spektroskopiyasi, katta energiyali elektronlar diffraksiyasi, rentgen fazali tahlil va skanerlovchi elektron mikroskopiya haqida qisqacha ma'lumotlar berilgan.

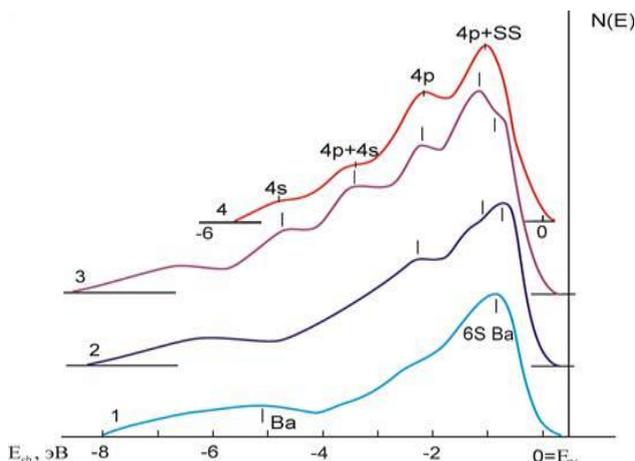
Dissertatsiyaning "Atomlarni o'tqazish va ion implantatsiyasining monokristall Ge tarkibi va tuzilishiga ta'siri" deb nomlanga III-bobida Ge yuzasiga Na^+ ionlarini implantatsiya qilish va keyingi qizdirishning monokristall Ge ning elektron va kristall tuzilishiga ta'sirini, flyuoritlar yuzasida Ge nanoplyonkalarini va nanoo'lchamli NaGe_2 obyektlarini olishga, hamda hosil bo'lgan plyonkalarining tarkibi, tuzilishi, emission va optik xususiyatlarini tadqiq qilishga bag'ishlangan.

Tadqiqotlardan oldin Ge namunalari $T = 1000 \text{ K}$ haroratda uzoq vaqt (5 soatgacha) va qisqa muddatli $T = 1200 \text{ K}$ haroratgacha o'ta yuqori vakuum 10^{-7} Pa sharoitida gabsizlantirildi. Gabsizlantirishdan keyin O va C yuza konsentratsiyalari 1 at.% gacha kamaydi.

1-rasmda qalinligi 5 monoqatlam bo'lgan Ba atomlari bilan qoplangan Ge (111) uchun $e\phi$ va σ_m qiymatlarning qizdirish haroratiga bog'liqliklari keltirilgan. Ba yupqa qatlam qalinligi ~ 5 monoqatlamni tashkil etdi. Qizdirish vaqti ~ 30 minutga teng bo'ldi. Qizdirish vaqti 40-50 minutgacha oshirilganda $T = \text{const}$ bo'lganda $e\phi$ va σ_m qiymatlari deyarli o'zgarmadi.



1-rasm. Qalinligi $\theta = 5$ monoqatlam bo'lgan Ba plyonkasi bilan qoplangan n-tipdagi Ge (111) uchun $e\phi$ va σ_m ning haroratga bog'liqligi

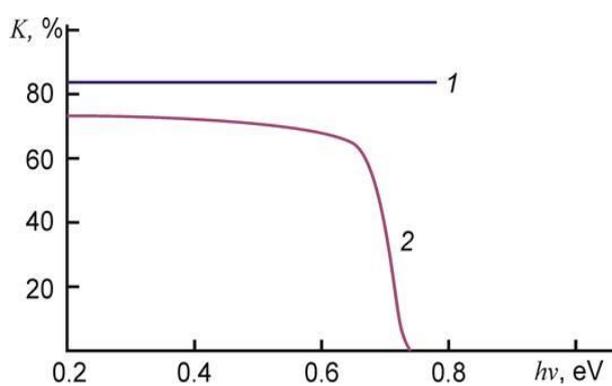


2-rasm. Qalinligi 5 monoqatlam Ba plyonkasi bilan qoplangan Ge ning fotoelektron spektrlariga qizdirishning ta'siri T: 1 – 293 K, 2 – 500 K, 3–750 K, 4–1000 K

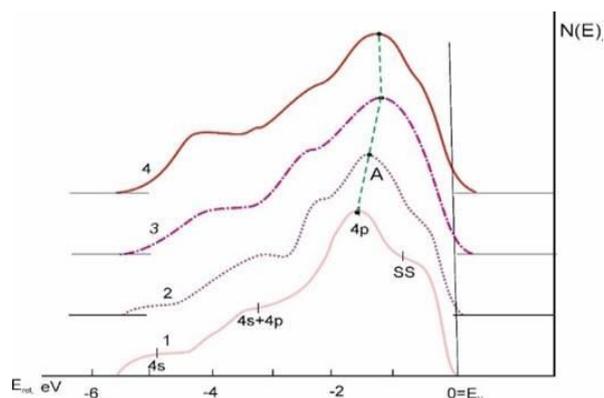
Bu yerda qulaylik uchun 1 ta monoqatlam sifatida $e\phi = e\phi_{\min}$ bo'ladigan $e\phi$ qiymati olindi. Hisoblashlar shuni ko'rsatdiki, $e\phi_{\min}$ bo'lganda Ba yupqa qatlamining haqiqiy qalinligi $\sim 0,7$ monoqatlamni tashkil etadi. Haroratning keyingi oshirilishi $e\phi$ qiymatning keskin oshishiga va σ_m qiymatning kamayishiga olib keldi. $T = 1000$ K bo'lganda endi σ_m va $e\phi$ qiymatlari sof Ge uchun bunday qiymatlardan unchalik farq qilmadi. Ta'kidlaymizki, Ba + Ge tizimi qizdirilganda, sirdan Ba atomlarining qatlam-qatlam bug'lanishi kuzatildi va $T = 950 - 1000$ K gacha oshirilganda Ge moddagi Ba moddaning sezilarli diffuziyalanishi kuzatilmadi. Birinchi Ba qatlami xemosorbsion holatda bo'ldi, shuning uchun nisbatan yuqori haroratlarda bir qatlamli qoplamaning bug'lanishi kuzatildi.

2-rasmida turli haroratlarda qizdirilgandan so'ng o'lchangan [Ba + Ge] birikmasi uchun fotoelektronlar spektrlari keltirilgan. Fotonlar energiyasi $h\nu = 10,8$ eV ni tashkil etadi.

Ko'rinib turibdiki, 5 monoqatlam Ba bilan qoplangan turli temperaturalarda qizdirilgan (n-tip) Ge ning UBFS spektrlari keltirilgan. Bunda 1- spektr xona haroratidagi namunaning UBFS spektrlari keltirilgan. Bu spektrdan faqat Ba ni xarakterlovchi piklarni ko'rishimiz mumkin. 2-spektrimizda 500 K gacha qizdirilgan namunaning spektrlari keltirilgan. Bunda spektrdan asosiy o'zgarishlar kuzatilgan va Ba intensivligining pasayishi va Ge piklarining intensivliklari hosil bo'lishini ko'rishimiz mumkin 3-spektrimizda 750 K gacha qizdirilgan namunaning UBFS spektrlari keltirilgan. Bunda spektr kengligi va yuzasi ortishini va spektrdagi Ge asosiy piklarining to'liq namoyon bo'lishini kuzatishimiz mumkin. Bu 750 K gacha qizdirganimizdan keyin termoelektron chiqish ishining pasayishi bilan izohlanadi, sababi spektr yuzasi ortishi chiqish ishiga teskari proporsional bo'ladi. 4-egri chiziqda namunani 1000 K gacha qizdirilgandan keyingi UBFS spektri keltirilgan. Bunda faqat barcha Ge ga xos bo'lgan piklarni kuzatishimiz mumkin va spektr kengligining 6 eV gacha kamayganini ko'rishimiz mumkin.



3-rasm. Yorug'lik o'tkazish koeffitsiyenti K ning foton energiyasiga bog'liqligi hv:
 1 – SrF₂(111); 2 – qalinligi 30 Å bo'lgan Ge plyonkasi bilan qoplangan SrF₂.



4-rasm. Energiyasi E₀=1 keV bo'lgan turli dozalardagi Ar⁺ ionlari bilan bombardimon qilingan Ge (111) ning fotoelektron spektrlari. D, sm⁻²: 1 – 0, 2 – 2·10¹⁴, 3 – 8·10¹⁵, 4 – 6·10¹⁶

3-rasmda monokritral SrF₂(111) ning va 30 Å qalinlikda Ge bilan qoplangan SrF₂ ning o'tkazuvchanlik koeffitsiyentining fotonlar energiyasiga bog'liqlik grafigi keltirilgan. Bunda monokristall Ge bilan qoplangan SrF₂ yuzasini Ar⁺ ionlari bilan bombardimon qilib, T = 750 K gacha qizdirish natijasida yuzada ideal kristall silliq tuzilishga ega yupqa monokristall Ge plyonkasi olindi. Olingan plyonkaning yorug'lik qaytishi R, yorug'lik o'tkazuvchanlik K va yorug'lik yutilishi T koeffitsiyentlari aniqlandi. Rasmdan ko'rinib turibdiki, 1-grafikda energiyaning biz o'rganayotgan diapozondagi K deyarli o'zgarmaydi, 2-grafikda esa hv=0,4–0,6 eV da pog'onali xarakterga ega bo'ladi va unda ham deyarli o'zgarmaydi. hv=0,65–0,75 eV intervalda keskin nolgacha kamayadi, ekstrapolyatsiya o'tkazish orqali Ge plyonkasining taqiqlangan soha kengligi ~0,72 eV ekanligi aniqlandi.

Egri chiziqning bu qismini hv o'qiga ekstrapolyatsiyalash E_g taqribiy qiymatni beradi. 1-jadvalda SrF₂ va Ge yupqa qatlamlari uchun hv = 0,4 va 0,65 eV bo'lganda olingan E_g va K, P, T koeffitsiyentlarining qiymatlari keltirilgan.

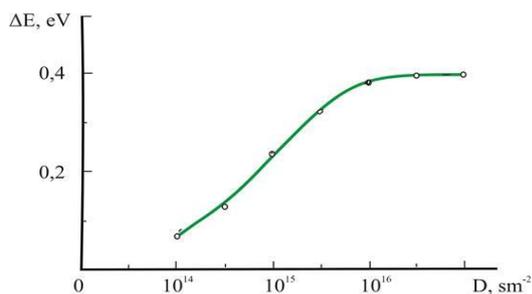
1-jadvalda SrF₂ va Ge bilan qoplangan SrF₂ ning taqiqlangan soha kengligi va optik parametrlari qiymatlari keltirilgan, jadvaldan ko'rinib turibdiki, yupqa Ge plyonkasining optik parametrlari SrF₂ ning optik parametrlaridan keskin farq qiladi. Bundan yuzada yarimo'tkazgich-dielektrik geterostrukturasi shakllandi degan xulosa qilish mumkin.

1-jadval

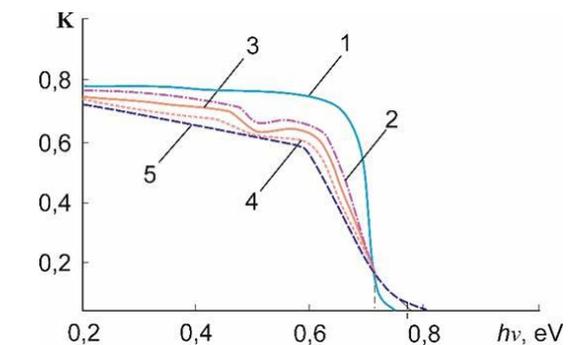
SrF₂ va Ge/SrF₂ uchun E_g va K, R, T ning qiymatlari

Parametrlar Namuna	E _g , eV	K, % hv da:		R, % hv da:		T, % hv da:	
		0,4 eV	0,65 eV	0,4 eV	0,65 eV	0,4 eV	0,65 eV
SrF ₂	11,2	82	80	18	20	0	0
Ge/SrF ₂	0,72	74	50	26	26	0	24

4-rasmda turli dozalardagi $E_0=1$ keV energiyali Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingan p-tip Ge(111) ning fotoelektronlari spektrlarining o'zgarish dinamikasi keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, 1-spektrda bog'lanish energiyasi $E_b = -0,8$ eV ni tashkil qiladi (ss valent elektronlarni qo'zg'alishi bilan izohlanadi) va $-1,9; -3,4; -4,9$ eV larda Ge ning piklari hosil bo'ladi. Spektrda sezilarli o'zgarishlar $2 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} da kuzatiladi. Bunda Ge ning asosiy A pikining amplitudasi kamayadi, spektrning kengligi ortadi va holati katta energiyalar tomon (E_v valentlik zonasining yuqori chetiga) siljiydi. Bunday A pikning yonida kichik intensivlikka eng yangi pik hosil bo'ladi. D ortishi bilan bu pik yo'qolib boradi. Bu kichik dozalarda Ge atomlari tugunlarni tashlab chiqib, tugunlar oralariga joylashib oladi degan xulosani beradi.



5-rasm. Germaniy asosiy cho'qqisi energiya siljishining dozaga bog'liqligi.



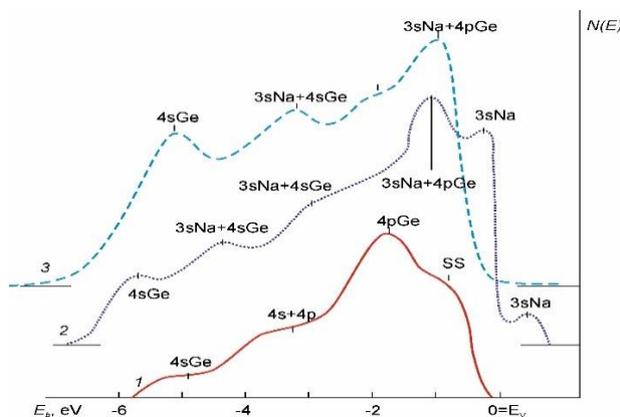
6-rasm. Energiyasi $E_0=1$ keV bo'lgan turli dozalardagi Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingan Ge(111) uchun yorug'lik o'tkazuvchanlik spektrlari.
 D, sm^{-2} : 1 – 0, 2 – $5 \cdot 10^{14}$, 3 – 10^{15} ,
 4 – $5 \cdot 10^{15}$, 5 – $6 \cdot 10^{16}$

4-rasm asosida energetik siljishning Ar^+ ionlari dozasi bog'liqlik grafigi 5-rasmda keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, A pikining eng katta siljishi 0,35-0,4 eV larda yuza qatlamlarining tartibsizlanishi hisobiga yuzaga keladi.

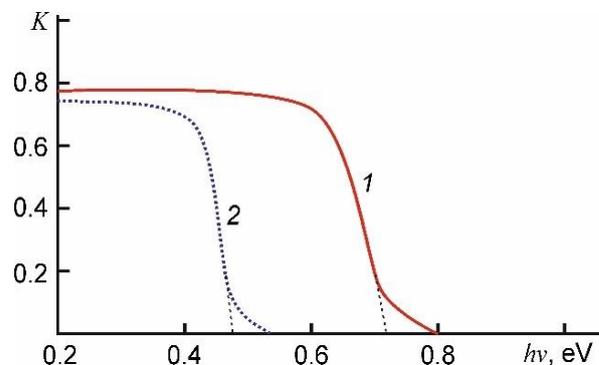
6-rasmda turli $E_0=1$ keV dozalardagi Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingan Ge(111) uchun yorug'lik o'tkazuvchanlik spektrlari tasvirlangan. Ko'rinib turibdiki, Ge(111) uchun $E_g = 0,73$ eV bo'ladi. Kichik dozalarda ($D \leq 10^{15}$ sm^{-2}) energiya $h\nu$ ning barcha sohalarida o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti K kamayishi, spektr tikligining kamayishi kuzatiladi va $h\nu = 0,5$ eV sohada yorug'likni qo'shimcha yutilishidan piklar paydo bo'ladi. Dozaning oshishi bilan yangi pikning intensivligi sezilarllari o'zgarmaydi, lekin uning yarim kengligi ortadi va $D \geq 8 \cdot 10^{15}$ sm^{-2} dan ortganda bu piklar yo'qoladi. $D = 6 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} bo'lganda E_g qiymat $\sim 0,8$ eV gacha ortadi.

D qiymatning keyingi ortishida K ning qiymat biroz pasayadi va $D = D_{to'y}$ da esa $\sim 70\%$ ni tashkil qiladi. Olingan natijalarni quyidagicha tushuntirish mumkin. Kichik dozalar bilan bombardimon qilish yuza osti qatlamlarining tartibsizlanishiga olib keladi, ya'ni kristall panjara tugunlarida joylashgan Ge ning atomlari orasiga joylashib oladi. Bu esa $h\nu = 0,5$ eV qiymatida yorug'likning qo'shimcha yutilishiga olib keladi. Dozaning ortib borishi ionlanish darajasining va yuzaning tartibsizlanishini ortishiga olib keladi. $D = 6 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} da esa yuzada to'liq tartibsizlanish kuzatiladi.

7-rasmda $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ bo'lganda qizdirishdan oldin va keyin $E_0 = 0,5 \text{ keV}$ energiyaga ega bo'lgan Na ionlari bilan implantatsiya qilingan p-tipdagi Ge (111) piki uchun fotoelektronlarning energiya bo'yicha taqsimoti tasvirlangan.



7-rasm. Ge(111) uchun fotoelektron spektrlar: 1–toza Ge(111), 2– $E_0=0,5 \text{ keV}$, $D=D_{to'y}$ bo'lgan Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Ge(111), 3– $T=850 \text{ K}$ da qizdirilganda fotoelektron spektrlar



8-rasm. Namunadan o'tgan yorug'lik o'tkazuvchanligining K fotonlar energiyasiga $h\nu$ bog'liqligi: 1–Ge (111); 2 – NaGe_2/Ge plyonkalari

Ko'rinib turibdiki, ionli implantatsiya qilish spektrning tuzilishi va shaklining sezilarli o'zgarishiga olib keladi. Bu o'zgarishlar asosan yuzadagi tartibsizliklar nostexiometrik Na_xGe_y germanidlarning hosil bo'lishi va kimyoviy bog' hosil qilmagan Na ba Ge atomlari hisobiga sodir bo'ladi.

8-rasmdan ko'rinib turibdiki, Ge (111) uchun $E_g=0,71 \text{ eV}$, NaGe_2 uchun $E_g=0,45 \text{ eV}$ bo'ladi. $K(h\nu)$ spektri bo'yicha $R=1-K$ formulaga muvofiq yorug'lik nurini qaytarish koeffitsiyentini baholash mumkin. K qiymati $K(h\nu)$ to'g'ri chiziqli sohasidan olinadi. $R_{\text{Ge}}=0,22$, $R_{\text{NaGe}_2}=0,26$ ekanligini ko'rish mumkin. Bu spektrlarni tahlil qilish asosida toza va ionli implantatsiya qilingan Ge moddasining asosiy makroskopik parametrlari aniqlandi (2-jadval).

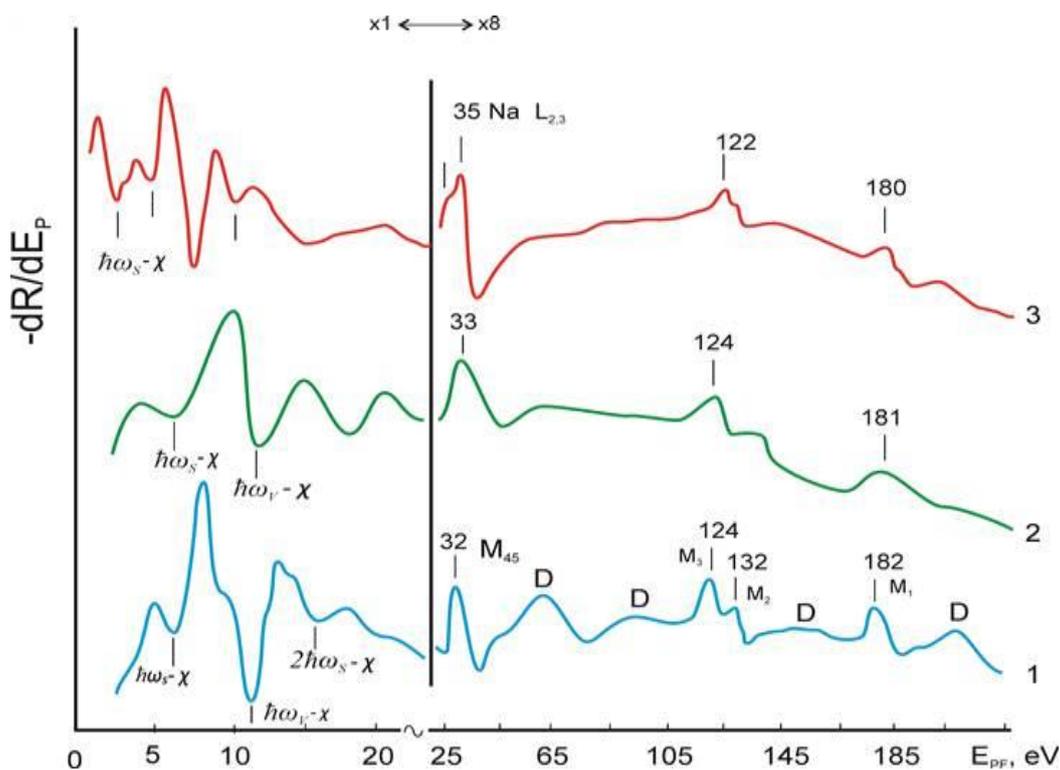
2-jadvaldan ko'rinib turibdiki, ionli implantatsiya qilingan Ge moddasida E_c yaqinida tor n-tipdagi zonaning hosil bo'lishi o'rtacha E_g qiymatini $\sim 0,2 \text{ eV}$ gacha kamayishiga olib keladi. Yuzaga yaqin qatlamlarning xususiyatlari metallarga xos bo'lgan xususiyatlarga yaqinlashadi. qizdirishdan keyin $E_g = 0,45 \text{ eV}$ ga ega bo'lgan tor zonali p-tipdagi NaGe_2 yarim o'tkazgich shakllanadi.

2-jadval

$E_0 = 0,5 \text{ keV}$ va $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ bo'lgan Na^+ ionlari bilan legirlangan Ge(111) ning qizdirishdan oldin va keyingi zona tuzilishining asosiy parametrlari

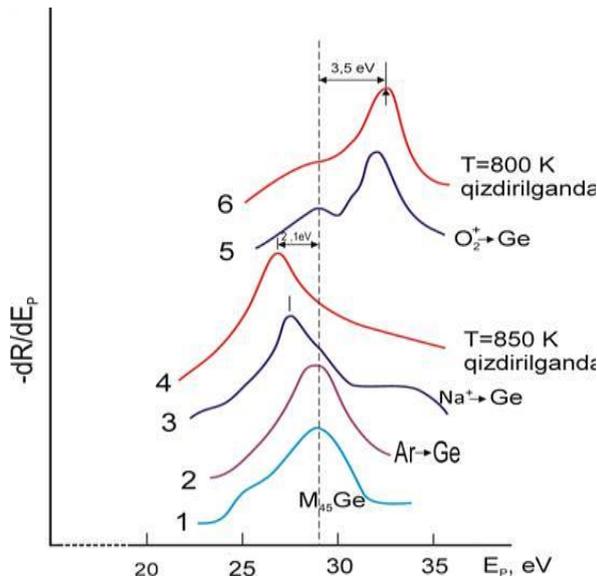
Parametrlar	Ge	$\text{Na}^+ \rightarrow \text{Ge}$	
		$T = 300 \text{ K}$	$T = 850 \text{ K}$
Φ	5.3	2.4	3.85
φ	5.0	2.4	3.8
χ	4.6	2.4	3.4
E_g	0.7	0	0.45

9-rasmda $E_p = 1 - 250$ eV sohada $D_{to'y}$ to'yinish dozasida $E_0=1$ keV ga ega bo'lgan Ar^+ va Na^+ ionlari bilan bombardimon qilingan va "toza" Ge uchun $-dR/dE_p$ nisbatning E_p qiymatga bog'liqligi keltirilgan. Ar^+ uchun $D_{to'y} \sim 4 \cdot 10^{16}$ sm⁻² ni, Na^+ uchun $6 \cdot 10^{16}$ sm⁻² ni tashkil etdi. Toza Ge spektri butun E_p soha bo'ylab qator maksimumlar va minimumlar aniqlanadi. Ar^+ va Na^+ ionlari bilan bombardimon qilingandan so'ng, barcha difraksion maksimumlar silliqanadi, bu sirtga yaqin qatlamlarning to'liq amorflashishiga bog'liq.

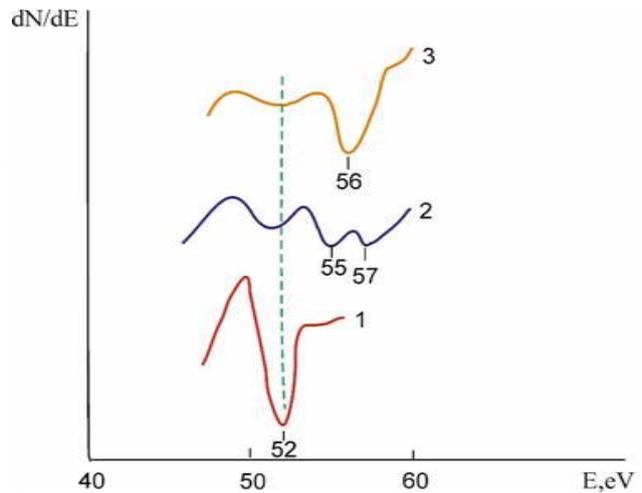


9-rasm. $E_p = 1 - 250$ eV sohada $D_{to'y}$ to'yinish dozasida $E_0=1$ keV ga ega bo'lgan Ar^+ (2) va Na^+ (3) ionlari bilan bombardimon qilingan va "toza" Ge (1) uchun dR/dE_p nisbatning E_p qiymatga bog'liqligi

10-rasmda qizdirilgandan oldin va keyin $D=8 \cdot 10^{16}$ sm⁻² bo'lganda $E_0=1$ keV ga ega Ar^+ , Na^+ va O^+_2 ionlari bilan bombardimon qilingan Ge ning M_{45} EQE spektrlari keltirilgan, ko'rinib turibdiki, Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingandan keyin Ge eng yuqori qiymatining M_{45} holati sezilarli o'zgarmaydi; Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilishda esa eng yuqori qiymatning M_{45} holati kichik energiyalar tomoniga, O^+_2 ionlari bilan implantatsiya qilishda esa katta energiyalar tomoniga siljiydi. Bu Ge+Na turdagi bog'lanishlarning hosil bo'lishi elektronlarning Na atomidan Ge atomiga o'tishi bilan birga bo'lishiga bog'liq, bu esa matritsa elektronlarining bog'lanish energiyasini kamayishiga olib keladi. Germaniy oksidi bo'lganda, aksincha, germaniy o'z elektronlarini kislorodga beradi va natijada germaniy elektronlarining bog'lanish energiyasi ortadi.



10-rasm. $E_0 = 1 \text{ keV}$ va $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ da Ar^+ , Na^+ va O_2^+ ionlari bilan bombardimon qilingan Ge uchun M_{45} EQE spektrlari, qizdirishdan oldingi va keyingi holatlar



11-rasm. $E_0 = 1 \text{ keV}$ energiyali $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozadagi Na^+ ionlarini implantatsiyasi germaniy M_1M_3V sathi uchun OJE-pikining shakli va holatiga ta'siri: toza Ge(111)-(1); Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilingandan keyin-(2); $T=850 \text{ K}$ gacha qizdirib ishlov berilgandan keyingi-(3)

Kimyoviy siljish qiymatiga asoslanib, quyida kation tomonidan anionga o'tkazilgan Δq zaryad miqdorini hisoblash uchun asosiy formulalar va ularning izohlari keltirilgan

$$\Delta q = \frac{\Delta E}{e^2} (A(r)/r - \alpha/R)$$

bu yerda ΔE – asosiy sathning kimyoviy siljish qiymati, r - kationning ion radiusiga yaqin qiymati, R - kation va anion orasidagi masofa, $A(r)$ – elektronning zaryad zichligini taqsimlanishini hisobga oluvchi geometrik omil; α - Madelung doimiysi. $A(r)$ qiymati odatda quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$A(r) = (1 - \Gamma^2) / (1 - \Gamma^3)$$

Elektron zaryadning atomlarda taqsimlanish shakli asosida amalga oshirilgan $\Gamma=0,5$. I bog'lanishning ionlik darajasi Poling formulasi yordamida baholandi:

$$I = \frac{\chi_{Ge} - \chi_{\text{ЛЭ}}}{|\chi_{Ge} - \chi_{\text{ЛЭ}}|} \left[1 - e^{-\frac{1}{4}(\chi_{Ge} - \chi_{\text{ЛЭ}})^2} \right]$$

Bu yerda χ_{Ge} – Ge ning elektronga moyilligi, $\chi_{\text{ЛЭ}}$ – NaGe_2 yoki GeO_2 ning elektronga moyilligi. Hisoblash natijalari 3-jadvalda keltirilgan.

M₄₅ darajasining kimyoviy siljishi, matritsa va bog‘lanishning ionlik darajasi I hamda germaniy birikmalarida uzatilgan zaryadning Δq kattaligi

Birikma	Kimyoviy siljish, eV	$\chi_{\text{Ge}} - \chi_{\text{Ge}}$, eV	I, %	Δq^*
NaGe ₂	- 2,1	1,2	25	0,9
GeO ₂	+ 3,5	3,6	58	1,5

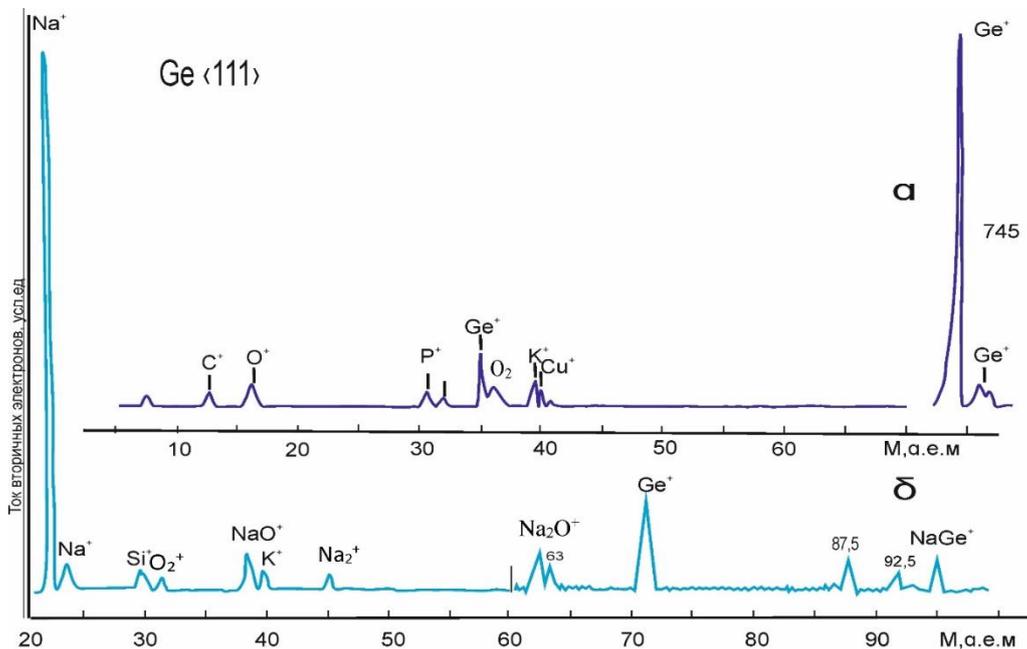
11- rasmda toza hamda $E_0 = 1$ keV energiyali $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozali Ba⁺ ionlarini implantatsiya qilingandan keyin va $T = 850$ K da 40 daqiqa davomida ketma-ket qizdirishdan keyingi germaniyning M₁M₃V OJE spektri keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki, ion implantatsiyadan keyin Ge ning OJE piklari intensivligi keskin kamayadi hamda 55 va 57 eV energiyalarda Na + Ge tipidagi bog‘lanishni xarakterlaydigan piklar hosil bo‘ladi, qizdirishdan keyin germaniyning M₁M₃V OJE pikining intensivligi ~ 10 - 12 martagacha kamayib ketadi va $E = 56$ eV da NaGe₂ tipidagi germanidni xarakterlaydigan intensiv pik hosil bo‘ladi. OJE elektron spektrini EQE va fotoelektronlar spektrlari (UBFS) bilan birga to‘liq tahlil qilish $d = 30 - 35 \text{ \AA}$ qalinlikda NaGe₂ plyonkasi hosil bo‘lganini ko‘rsatadi.

Dissertatsiyaning **“Termik va lazerli termoshlov berilgan ionlar bilan ligirlangan yarimo‘tkazgichlarni yuza osti sohalarini tarkibi va strukturasi o‘rganish”** deb nomlangan IV-bobida aktiv elementlarning kichik energiyali ($E_0 \leq 5$ keV) ionlari bilan legirlangan Ge yuza qatlamlarining tarkibi, elektron va kristall tuzilishiga elektron bombardimon qilish, qizdirish va lazer nurlanishi, atmosfera havosining ta‘sirini tadqiq qilish bo‘yicha eksperimental natijalar keltirilgan. Barcha tadqiqotlar $P = 10^{-7}$ Pa vakuumda, ionli implantatsiyalash amalga oshirilgan asbobda o‘tkazildi.

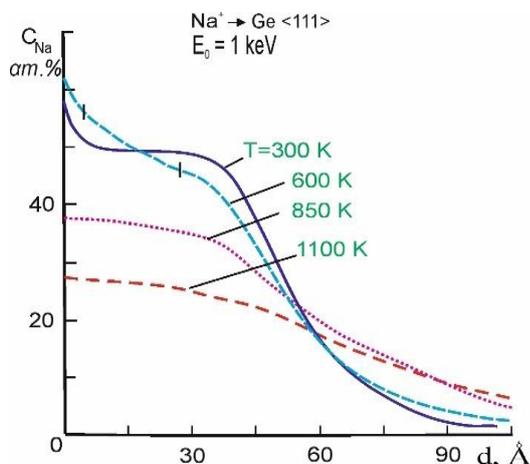
$D=8 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozada $E_0 = 1$ keV ga ega bo‘lgan Na⁺ ionlari bilan implantatsiya qilingan Ge va toza Ge yuzasidagi ikkilamchi ionlarning massa spektrlari 12-rasmda keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki, nurlantirilmagan Ge spektrida matritsaning eng yuqori qiymatlaridan tashqari O, C, Na, Ca, Si moddalarning past intensivlikdagi eng yuqori qiymatlari aniqlanadi. Demak, ularning umumiy konsentratsiyasi 1 at.% dan oshmaydi. Ion implantatsiya qilingan Ge spektrida Na (23 eV), Ge (36, 73), NaO (39), Na₂O (62) eng yuqori qiymatlari aniqlandi. Qolgan massalarni aniq identifikatsiyalash hali ham qiyin hisoblanadi. NaO va Na₂O kabi birikmalarning paydo bo‘lishi ionlarni purkalishi jarayonida yuzaga yaqin qatlamiga kislorodning kiritilishiga bog‘liq.

13-rasmda, $E_0=1$ keV ga ega bo‘lgan va $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozali Na⁺ ionlari bilan ion implantatsiya qilingan Ge namunasi bo‘yicha konsentratsiyasining haroratga bog‘liqlik grafigi keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki, Haroratning $T=850$ K gacha ko‘tarilishida yuza yaqinidagi Na konsentratsiyasi sezilarli kamayadi, bu asosan Na ning namuna chuqurligiga Na diffuziyalanishining kuchayishiga bog‘liq. Bunda qalinligi ~30 – 35 Å bo‘lgan NaGe₂ turidagi birikma hosil bo‘ladi.

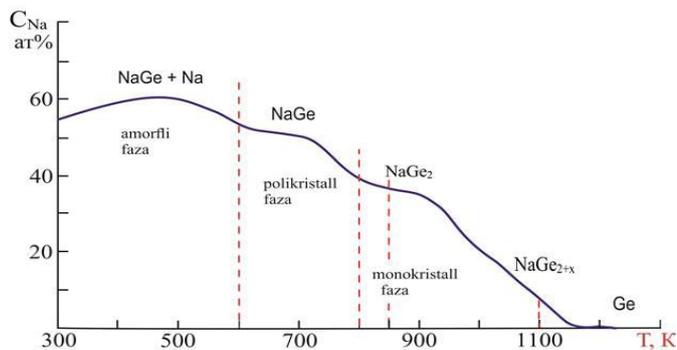
Haroratning keyingi oshishida diffuziya bilan birga kiritish sohasidan natriyning intensiv desorbsiyalanishi boshlanadi.



12-rasm. Toza germaniy (a) va $E_0 = 1$ keV energiya, $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozali Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan germaniy (b) ikkilamchi ion mass-spektrlari



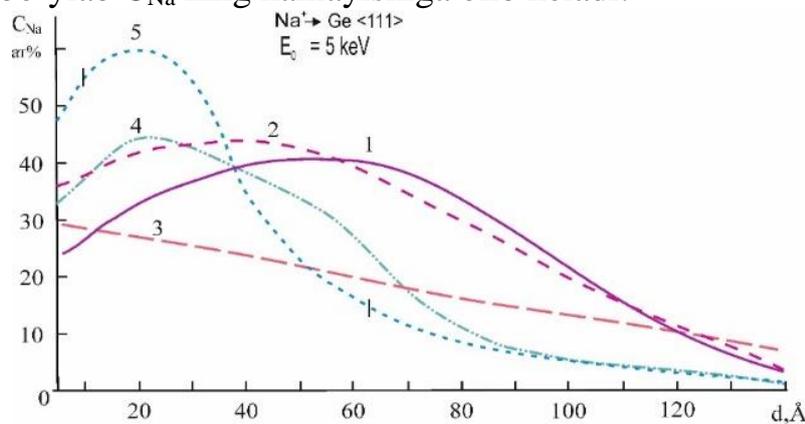
13-rasm. $E_0 = 1$ keV energiya, $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozali Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Ge chuqurligi bo'yicha konsentratsiyasining haroratga bog'liqlik grafigi



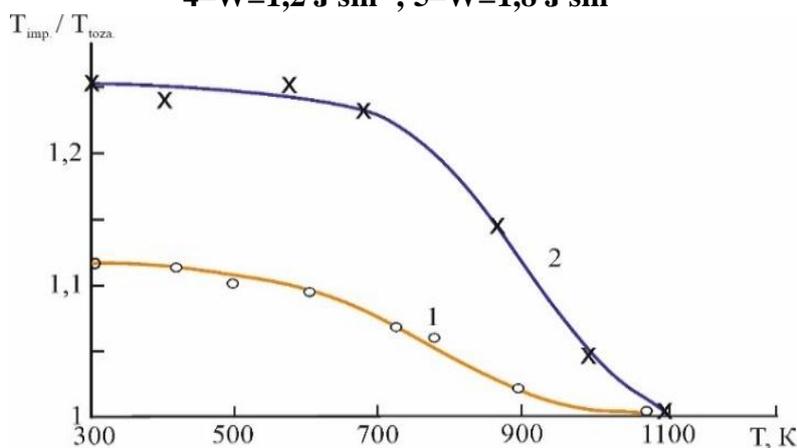
14-rasm. $E_0 = 1$ keV energiyada Na^+ ionlaribilan implantatsiya qilingan germaniy yuzasining qizdirish jarayonidagi holat diagrammasi.

14-rasmda qizdirishda bo'lib o'tadigan fazaviy o'zgarishlarini ko'rsatish uchun 15-rasmda $E_0=1$ keVga ega bo'lgan Na^+ ionlari bilan legirlangan germaniy yuzasining holatlar diagrammasi ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, T qiymatning ortishi bilan bu namunalarning ionli-legirlangan qatlamlari asta-sekin amorflangan fazadan monokristalli fazaga o'tadi. Bunda $\text{NaGe}+\text{Na}$ (amorf) - NaGe (polikristal) - NaGe_2 (monokristall) - Ge (monokristall) o'tishlar o'ziga xos hisoblanadi.

$E_0 \geq 3$ keV energiyali Na^+ ionlari bilan ion implantatsiya qilingan Ge namunalarini $T \leq 800$ K haroratda qizdirib, $W \leq 2 \text{ J}\cdot\text{sm}^{-2}$ da lazerli ishlov berish, yuza osti qatlamlaridagi natriy kontsentratsiyasining oshishiga va $C_{\text{Na}}(d)$ egri chizig'ining maksimal holatining kichik chuqurliklar tomon siljishiga olib keladi. $E_0 \geq 3$ keV bilan implantatsiya qilingan namunalarni lazerli qizdirishda, energiya zichligi unchalik yuqori bo'lmagan taqdirda, namunaning yuza osti qatlamlarida natriy kontsentratsiyasi oshadi. Natriy kontsentratsiyasining maksimal oshishi (40 – 45 at.% gacha) energiya zichligi $W=1,5 \text{ J}\cdot\text{sm}^{-2}$ bo'lganda kuzatiladi. Kiritilgan aralashmalarning yuqori miqdori 25-30 Å chuqurlikkacha saqlanib qoladi va keyingi chuqurlikning $\text{J}\cdot\text{sm}^{-2}$ ortishi bilan u keskin kamayadi (15-rasm, 5-egri chiziq). $W=2 \text{ J}\cdot\text{sm}^{-2}$ dan boshlab diffuziyaning kuchayishi bilan birga natriyning intensiv desorbsiyasi sodir bo'ladi, bu esa ionlar bilan legirlangan sohaning butun chuqurligi bo'ylab C_{Na} ning kamayishiga olib keladi.



15 - rasm. $E_0 = 5$ keV energiya va $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozali Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan germaniyda natriy atomlarining taqsimlanishiga turli haroratlarda qizdirishning T (1, 2, 3) va turli energiya zichligidagi W (4, 5) lazerli nurlanishining ta'siri: 1 – 300 K; 2 – 800 K; 3 – 1100 K; 4– $W=1,2 \text{ J}\cdot\text{sm}^{-2}$; 5– $W=1,8 \text{ J}\cdot\text{sm}^{-2}$



16-rasm. $E_0 = 1$ keV, turli dozali Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si (111) uchun $T_{\text{imp}}/T_{\text{toza}}$ ni qizdirish haroratiga bog'liqligi. $D \text{ sm}^{-2}$: 1 – $2 \cdot 10^{15}$; 2 – $6 \cdot 10^{16}$.

16-rasmda $E_0 = 1$ keV ga ega bo'lgan Na^+ ionlari bilan turli dozalarda implantatsiya qilingan Si (111) uchun $\lambda = 1250$ nm da $T_{\text{imp}}/T_{\text{toza}}$ nisbiy yorug'likni yutilishi ko'effitsiyentining qizdirish haroratiga bog'liqligi tasvirlangan, bu yerda T_{toza} – toza Si (111) uchun yutilish ko'effitsiyenti, T_{imp} – ionli implantatsiya qilishdan keyin Si(111) uchun yutilish ko'effitsiyenti. Ko'rinib turibdiki, ionli implantatsiya qilingan Si uchun yutilish ko'effitsiyenti toza Si uchun yutilish ko'effitsiyentiga qaraganda sezilarli katta bo'ladi.

Rastrli elektron mikroskopiya va katta energiyali elektronlar difraksiyasi ma'lumotlari bilan birgalikda 3 va 4-bo'limlarda keltirilgan

natijalar asosida yupqa nano o'lchamlardagi germanidlar yupqa qatlamlari va

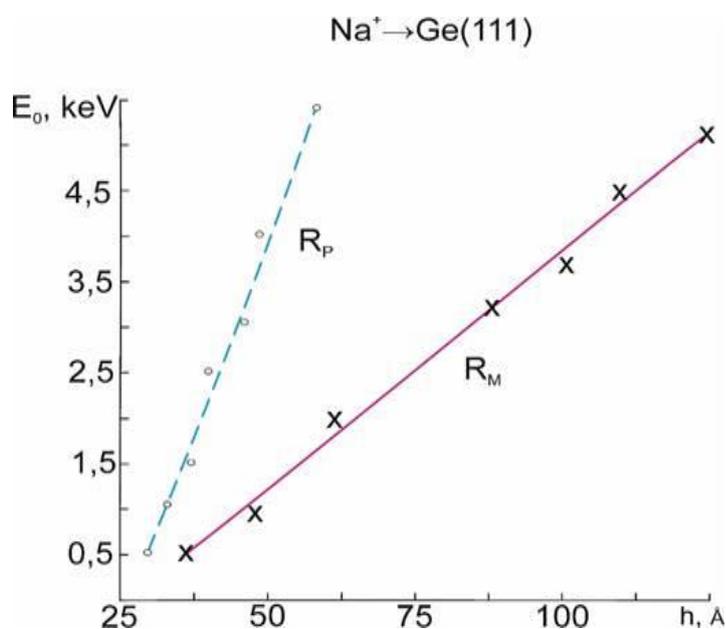
metallarning silitsidlarini shakllantirish uchun ionli implantatsiyalashning optimal rejimlari (turi, energiyasi, dozasi) va keyingi termik qizdirish (harorat, vaqt) aniqlandi. Misol sifatida 4-jadvalda bu tadqiqotlarning ayrim natijalari keltirilgan.

4-jadval

$E_0 = 1$ keV energiya, $D = D_{to'y}$ dozali Na^+ va Ba^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Si(111) va Ge(111) yuzasida MeSi, MeSi₂ va MeGe yupqa plyonkalarini olish uchun optimal harorat rejimlari

Parametrlar	MeSi		MeSi ₂		MeGe		Si	Ge
	NaSi	NaSi ₂	BaSi	BaSi ₂	NaGe ₂	BaGe ₂		
Hosil bo'lish harorati T, K	800	900	1000	1200	850	1000	–	–
Plyonka qalinligi	30-35	35-40	25-30	30-35	30-35	35-40	Monokristall	
Panjara turi	kub.	kub.	kub.	kub.	kub.	kub.	kub.	kub.
Panjara doimiysi, Å	6,15	6,545	–	6,54	–	6,45	5,41	5,65

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, NaSi₂, BaSi₂, NaGe₂ va BaGe₂ nanoyupqa qatlamlari kubik panjaralarga ega. 0,5 dan 5 keV gacha intervalda ionlar energiyasining ortishi bilan germanid va silitsid yupqa qatlamlarining qalinligi deyarli chiziqli oshadi, bu maksimal (R_m) va proeksiyalangan (R_p) ionlar yo'lining chiziqli ortishiga bog'liq. (17-rasm). Rasmdan ko'rinib turibdiki, Ge yuzasiga implantatsiya qilinayotgan Na^+ ionlari energiyasi $E_0 = 0,5$ keV bo'lganda $R_m = 37$ Å va $R_p = 27$ Å, $E_0 = 5$ keV bo'lganda esa $R_m = 125$ Å va $R_p = 54$ Å ni tashkil qiladi.



17-rasm. Ge ga implantatsiya qilinayotgan natriy ionlari energiyasining qalinlikka bog'liqlik grafidagi maksimal va proyeksiyalangan yugurish yo'llarining bog'liqlik grafigi keltirilgan

XULOSA

“Changlatish va ion implantatsiya usullari bilan Ge yuzasida hosil qilingan nanostrukturalarning elektron tuzilishi va optik xossalari” nomli falsafa doktorlik (PhD) dissertatsiyasi bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar natijasida quyidagi natijalar olindi va xulosalar qilindi:

1. Ba yupqa qatlamlarini adsorbsiyalanishi va keyingi qizdirishda Ge(111) ning tarkibi, elektron tuzilishi, emission va optik xossalarining o‘zgarishi qonuniyatlari o‘rganildi. Xususan, $T=700$ K bo‘lganda Ba+Ge birikmasi qizdirilgandan keyin fotoelektronlar spektrida ham Ge, ham Ba uchun o‘ziga xos xususiyatlar mavjudligi o‘rganildi. Bunda $e\phi$ qiymati minimumgacha kamayadi, σ_m va Y qiymatlari esa maksimal darajaga ortadi.

2. $T=750$ K bo‘lganda SrF_2 yuzasini oldindan bombardimon qilish changlanadigan Ge yupqa plyonkalarining adgeziyasini oshirishi va yuqori mukammal silliqlikka ega ultra yupqa monokritalli epitaksial Ge yupqa plyonkalarini olish imkonini berishi o‘rganildi. SrF_2 va Ge yupqa plyonkalarining taqiqlangan zonasining kengligi va optik parametrlari aniqlandi;

3. Yuzaga yaqin qatlamlarning amorflanishi jarayonida Ge(111) valent elektronlari holati zichligining asosiy maksimumi $0,35 \div 0,4$ eV ga siljiydi va bu qiymat Grin funksiyasidan foydalanish bilan bajarilgan nazariy hisoblash bilan to‘la mos kelishi o‘rganildi;

4. Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilinishida Ge(111) valent elektronlarining holat zichligi sezilarli darajada o‘zgarishi kuzatildi, bu asosan yuzaga yaqin qatlamlarning buzilishi bilan tushuntiriladi. Ar^+ , Na^+ va O^+ ionlari bilan implantatsiya qilingandan so‘ng $-dR/dE_p$ (E_p) spektrida barcha difraksion maksimumlari silliqlanishi kuzatildi, bu yuzaga yaqin qatlamlarining amorflanishi bilan tushuntiriladi.

5. Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilinganda Ge(111) ning M_{45} negiz sathi uchun EQE spektridagi piklarning holati o‘zgarmaydi, Na^+ ionlari bilan bombardimon qilinganda kichik energiyalar tomon, O^+ ionlar bilan implantatsiya qilganda esa katta energiyalar tomon siljishi kuzatildi. Bu shuni ko‘rsatadiki, Ar^+ ionlari bilan bombardirovka qilganda zaryadlanish holati o‘zgarmaydi, Na^+ ionlari bilan bombardimon qilinishida Ge elektron oladi, O^+ ga esa elektronni beradi;

6. Ge(111) M_{45} pikning kimyoviy siljish qiymati ko‘chirilgan zaryad miqdori Δq va ionlanish darajasi I ga bog‘liq. $NaGe_2$ uchun $\Delta q=0,9e$ va $I=25\%$, GeO_2 da, $\Delta q=1,5e$ va $I=58\%$ ni tashkil qildi.

7. Termik va lazerli qizdirish ta’sirida Na^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan Ge(111) yuza osti qatlamining elementlar va kimyoviy tarkibini o‘zgarishlar dinamikasi o‘rganildi.

8. Termik qizdirish yordamida aktiv element konsentratsiyasi chuqurligi bo‘yicha monoton kamayadigan qatlamlarni olish mumkinligi o‘rganildi. Lazerli qizdirish holida ionli-ligerlangan qatlam va matritsa o‘rtasida keskin chegara vujudga keladi. $T=850$ K haroratda Ge(111) yuza osti qatlamining to‘liq kristallanishi va $NaGe_2$ tipidagi birikma hosil bo‘lishi aniqlandi;

9. Termik va lazerli qizdirish energiya zichligi o'zgarishida ionli-ligerlangan namunalar yuzastining elektron tuzilishini o'zgartirishiga olib keladigan asosiy sabablarning tahlili o'rganildi. Xususan, ionli yarimo'tkazgichlar yuzasining tarkibi, kristall tuzilishi va makroskopik elektron xarakteristikasidagi o'zgarishlar o'rtasida ma'lum bog'liqlik aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ПРИ КАРШИНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

АБРАЕВА СЕВАРА ТОШТЕМИРОВА

**ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР,
СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ МЕТОДАМИ ОСАЖДЕНИЯ
И ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

01.04.04 – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Карши – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрировано в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2024.2.PhD/FM720

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.qarshidu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель: **Ташмухамедова Дилноза Артикбаевна**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Саъдуллаев Аловуддин Бобокулович
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: **Ферганский политехнический институт**

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2024 г. в _____ часов на заседании Научного совета PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 по присуждению ученых степеней при Каршинском государственном университете (Адрес: 180119, г. Карши, улица Кучабог, 17. Тел./факс (99875) 225-34-13; e-mail: kardu@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Каршинском государственном университете (зарегистрирована за № ____). (Адрес: 180119, г. Карши, ул. Кучабог, 17. Тел./ факс: (99875) 225-34-13; e-mail: kardu@mail.ru).

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2024 года
(реестр протокола рассылки № _____ от «_____» _____ 2024 года.)

Нормурадов М.Т.
председатель научного совета по
присуждению ученых степеней,
доктор физика-математический наук, профессор

Аллаярова Г.Х.
Научный секретарь научного совета
присуждающего научные степени
доктор философии по физике и математике, доцент

Ташатов А.К.
председатель научного семинара, при научном совете
присуждающего научные степени
доктор физика-математический наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в мире особое внимание уделяется получению наноразмерных пленок и их использованию в различных областях, в том числе в нано- и микроэлектронике, солнечных элементах, активных элементах оптоэлектронных устройств и т. д., особенно в полупроводниках, так как кремний и германий являются основным сырьем для развития этих отраслей. Интерес к чистым полупроводникам и различным полупроводниковым структурам быстро развивается, понятие высокой чистоты для каждого материала свое, однако суммарное содержание остаточных примесей в полупроводнике должно быть не выше концентрации собственных носителей. Например, для германия она $\leq 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В мире почти во всех научных центрах развитых стран, университетах и научных лабораториях институтов проводятся научные исследования по полному контролю свойств поверхности Ge, Si и других полупроводников, а также по различным неинвазивным процессам, происходящим в твердом теле без ионной имплантации. Поэтому важно комплексно выявлять состояние поверхности ионно-имплантированных материалов методами электронной спектроскопии и микроскопии.

В настоящее время в мире хорошо изучены состав, структура, фотоэлектрические и оптические свойства наноразмерных систем на основе нанопленок и квантовых точек Ge, полученных методами молекулярно-лучевой эпитаксии, термического осаждения и ионной имплантации. В частности, впервые изучена возможность создания плазмонного композиционного материала Ag:GeSi на подложке c-Si при его последовательной высокодозовой имплантации ионами Ge^+ и Ag^+ . Имплантация ионами Ge^+ сопровождается аморфизацией поверхности слоя Si с образованием мелкозернистого композиционного слоя GeSi. Показано, что, меняя процентное соотношение аморфной и кристаллической фазы в пленках (что задается режимами получения пленок), можно контролируемо изменять ширину запрещенной зоны получаемых нанокomпозитных пленок Ge без дополнительного воздействия (легирование, облучение и т.д.).

Наряду с другими направлениями в Узбекистане ведется большая научно-практическая работа по проведению исследований по созданию многих новых технологий и внедрению их в производство для развития электронной промышленности. В то же время от решения этих вопросов зависят многие актуальные физические и практические проблемы. Синтез наноразмерных пленок на основе элементарных и бинарных полупроводников, определение их химического состава, электронной структуры, физических свойств и термобатарей на основе тонких пленок CrSi_2 р-типа в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН Республики Узбекистан, определены задачи по научным разработкам и инновационным

проектам по подготовке фотоэлементов¹. Результаты таких исследований, с одной стороны, способствуют расширению области применения имплантации ионов малой энергии в производстве микро-и оптико-электронных устройств, а с другой стороны, позволяют глубже понять механизмы физико-химических процессов, протекающих в околоземной области твердых тел в результате имплантации ионов низкой энергии. Решение вышеперечисленного комплекса проблем было определено в качестве основного содержания данной диссертационной работы.

Постановлениях Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы», № УП-6097 от 29 октября 2020 года «Концепция развития науки до 2030 года»² и № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» от 22 августа 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в Республике за последние годы в данной сфере, №УП-4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года³ и другие нормативно-правовые акты, связанные с этой деятельностью, в определенной степени служат для реализации поставленных задач настоящего диссертационного исследования.

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и III. «Развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. В последние годы получением и изучением физико-химических свойств наноразмерных структур, созданных на поверхности и в приповерхностной области оксидов Ge и Si в настоящее время занимается ряд научных центров мира. Индийскими учёными Ray S.K., Singha R.K. и др. методом МЛЭ, получены квантовые точки Ge на поверхности Si(001) и SiO₂ и изучены их структурные и оптические свойства. Ими установлено, что инфракрасный сигнал фотолюменесценции от точек Ge, зависит от размеров островков и смешивания Si/Ge. Walters R.J. и Arwater H.A. (Калифорнийский технологический институт) обнаружили, что на первом этапе роста островки Ge имеют формы пирамиды. Stavarache I., Valentin A.M. (Национальный институт физики материалов, Румыния) показали что наночастицы Ge формируются непосредственно при совместном осаждении SiO₂ и Ge на подложки при 300, 400 и 500 °С. Учёные Страсбургского

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан № PQ-5032 от 2021 года «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики».

² Концепция развития науки Президента Республики Узбекистан № ПФ-6097 от 29 октября 2020 года до 2030 года

³ Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «[О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан](#)».

университета Fourches N., Postnikov A. и др. исследовали влияния высокоэнергетической имплантации Ge^+ в кремний на изменения механических свойств вызванных дефектами. Степановым А.Л., Валлиевым В.Ф. и др. показано, что имплантация ионов Ag^+ приводит к распылению поверхности c-Si , на которой образуется губчатая аморфная пористая структура (a-Si) с наночастицами металла (Ag). Николичевым Д.Е. исследован состав самоорганизованных нанокластеров $\text{Ge}_x\text{Si}_{x-1}/\text{Si}$ методом сканирующей оже-микроскопии. Показано, что нанесение покровного слоя кремния толщиной в единицы нанометров не приводит к существенному изменению профиля, что связано с низкой температурой выращивания слоя кремния (45°C). Patrone L., Sentis M., Ledoux G. и др. была разработана квантово-размерная модель, описывающая зависимость положения максимумов полос фотолюминесценции от размеров нанокристаллов кремния.

Нормурадовым М.Т., Умирзаковым Б.Е., Рысбаевым А.С., Ташмухамедовой Д.А. и их учениками впервые получены наноразмерные структуры на поверхностной области Si , Ge , SiO_2 и изучены их электронные и кристаллические структуры.

В то же время формирование наноразмерных тонких пленок на поверхности Ge напылением и ионной имплантацией, а также их электронная структура, морфология поверхности, электрофизические и оптические свойства практически не исследованы.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Ташкентском государственном техническом университете им. Ислама Каримова в рамках научного плана кафедры «Общая физика» на 2020-2023 гг. «Модификация электронной, кристаллической структуры и свойств материалов различной природы (металл, полупроводник, диэлектрик) имплантацией ионов с низкой энергией, большой дозой и последующим термическим, ИК и лазерным отжигом» и проекта № Ф-ОТ-2021-422 "Формирование наноразмерных термоэлектрических пленок BaSi_2 и Mn_4Si_7 и их свойства".

Целью диссертационной работы является изучение закономерностей формирования германидов на поверхности Ge при напылении атомов и ионной имплантации, а также выяснены механизмы изменения их электронных и оптических свойств.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

изучить динамику изменения состава, электронной структуры, эмиссионных и оптических свойств монокристаллического $\text{Ge}(111)$ при напылении атомов Ba и последующего отжига. Определение оптимальных технологических режимов ионной имплантации и последующего отжига для формирования тонких наноразмерных пленок германидов.

разработать методику получения ультратонких монокристаллических пленок Ge на поверхности SrF₂(111) с высоким кристаллическим совершенством и хорошей гладкостью;

изучить влияние бомбардировки ионами Ar⁺ на электронную структуру Ge(111). Теоретическое объяснение механизмов изменения плотности состояния валентных электронов при ионной бомбардировке;

изучить особенности фотоэлектронных спектров Ge, имплантированного ионами Na⁺. Изучить влияние температурного и лазерного отжига на состав, кристаллическую и электронную структуру поверхности Ge(111), имплантированных ионами Na⁺ и Ba⁺;

Объектами исследования являлись монокристаллические образцы и пленки Ge.

Предметом исследования являлись закономерности и физические механизмы формирования нанокристаллов и нанопленок на поверхности германия при ионной имплантации

Методы исследований. Электронная оже-спектроскопия (ЭОС), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), спектроскопия упруго-рассеянных электронов (СУРЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), дифракция быстрых электронов (ДБЭ), растровая электронная микроскопия (РЭМ), спектрофотометр типа UV-1280, четырехзондовый метод измерения электропроводности.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлены основные закономерности изменения состава, электронной и кристаллической структуры поверхности Ge(111) при напылении бария и последующего отжига. Определены оптимальные технологические режимы ($E_0 = 0,5$ кэВ, $D = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻²) ионной имплантации (уменьшение работы выхода, увеличение σ_m и Y) и последующего отжига ($T = 850$ К) для формирования тонких наноразмерных пленок германидов.

с использованием метода бомбардировки ионами Ar⁺ на поверхности SrF₂(111) при $T=750$ К обнаружено увеличение адгезии напыляемых пленок Ge и получена однородная, ультратонкая монокристаллическая пленка Ge (111) толщиной 25 -30 Å в переходном слое системы Ge / SrF₂;

установлено влияние бомбардировки поверхности Ge (111) ионами Ar⁺ на кристаллическую и электронную структуру, т.е. существенное изменение плотности состояний, что в свою очередь объясняется главным образом разрушением приповерхностных слоев;

изучена динамика изменения состояния плотности валентных электронов Ge при имплантации ионов Na⁺. Определены основные закономерности динамики изменения основных механизмов формирования германидов NaGe и NaGe₂, при имплантации ионов Na⁺ в Ge (111) и последующего отжига.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: методом предварительной бомбардировки поверхности SrF_2 при $T=750$ К увеличивается адгезия напыляемых пленок Ge, что позволяет получить эпитаксиальные пленки Ge с высоким совершенством и хорошей гладкостью; установлено, что с помощью термического прогрева можно получить слои с монотонно спадающей по глубине концентрацией активного элемента. В случае лазерного отжига между ионно-легированным слоем и матрицей возникает резкая граница;

установлено, что на спектре УОЭ положение пика основного уровня M_{45} Ge(111) при бомбардировке ионами аргона, практически, не меняется, при бомбардировке ионами натрия – смещается в сторону меньших энергий, а при бомбардировке ионами кислорода – в сторону больших энергий.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных методов электронной спектроскопии и диагностики поверхности высокого разрешения, проведением экспериментов в условиях сверхвысокого вакуума, хорошим соответствием результатов для чистых образцов с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость: выявлены закономерности, приводящие к изменению состава, электронной структуры, эмиссионных и оптических свойств Ge(111) при адсорбции тонких слоев и имплантации ионов, которые имеют важное значение для развития теории по формированию новых материалов с заданными свойствами.

Практическая значимость: получена гетероструктурная нанопленочная система Ge/ SrF_2 которая может быть использована при разработке приборов функциональной электроники и германиды NaGe_2 , которые обладает высокой чувствительностью в видимой и ИК-областях, что может использоваться в нанoeлектронных устройствах, работающих в этих диапазонах.

Внедрение результатов исследования в практику. На основании научных результатов, полученных при изучении электронной структуры и оптических свойств наноструктур, образованных на поверхности Ge методами осаждения и ионной имплантации:

Результаты исследования по формированию наноразмерных силицидов металлов в поверхностных и приповерхностных областях кремния, а также алгоритм процессов образования силицидов и гетеросистем германид-германий-металл эффективно использовались при реализации научно-технических задач проекта Uzb-Ind-2021-78 «Термоэлектрические свойства и процессы самоорганизации в силикатах, легированных оксидами металлов» в частности для выяснения путей создания эффективных и дешевых термоэлектрических материалов из диоксида кремния и наносистем на его основе, которые предназначены для широкого применения в мощной энергетике, в пленочных силицидных и силикатных стеклах (Справка Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека от 17 января 2024 года № 01/11-590). Даны рекомендации по созданию современных тензометрических датчиков, основанных на термоэлектрических явлениях.

На основе полученных результатов изучены параметры решетки, уровень совершенства структуры, а также построены модели атомного строения различных нанопленочных систем, созданных в процессе низкоэнергетической ионной имплантации поверхности Ge и Si, в зависимости от энергии, дозы облучения и постимплантационного отжига. Впервые при имплантации ионов активных металлов в образцы кремния было обнаружено, что перераспределение примесных атомов по глубине в зависимости от их типа увеличивается либо в ионно-легированном слое, либо в нелегированной области Si. Изучено изменение удельного сопротивления, коэффициента ВЭЭ и коэффициента светоотражения поверхностных слоев при имплантации ионами образцов германия и кремния, используемых в солнечных элементах, а также в АО «ФОТОН» использован материал с высокой светочувствительностью созданный на основе Si и Ge, легированных примесными атомами (Справка АК «Узэлтехсаноат» №04-3/142 от 30.01.2024). На основе применения научных результатов на практике были даны научно-обоснованные рекомендации по разработке датчиков света с высокой чувствительностью.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были обсуждены на 8 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации Опубликовано 16 научных работ, из них 5 статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации научных исследований диссертаций доктора философских наук (PhD) ВАК Республики Узбекистан (в республиканском масштабе, в научных журналах и Scopus по журналам в базе данных)

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 114 страницах текста, включая 42 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описана степень изученности проблемы, приводится связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, приводится научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Обзор литературы по исследованию структуры и физических свойств пленок Ge и Si»** посвящена краткому литературному обзору работ, посвященных исследованию закономерностей формирования тонких силицидных и германидных пленок бария и натрия на поверхности кремния и германия в процессах напыления, термодиффузии и ионной имплантации и изучению их электронной структуры, эмиссионных, оптических и электрофизических свойств.

В конце главы приводятся выводы из обзора, цель и задачи диссертационной работы.

В второй главе диссертации **«Методика экспериментальных исследований»** посвящена описанию методов обработки поверхности: очистки поверхности монокристалла Ge, ионной имплантации и последующего отжига, а также краткому описанию принципов работы, использованных современных методов диагностики поверхности и приповерхностной области монокристаллов Ge: Электронная оже-спектроскопия, спектроскопия упруго-рассеянных электронов, спектроскопия характеристических потерь энергии электронов, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия, дифракция быстрых электронов, рентгенофазный анализ, растровая электронная микроскопия и спектроскопия отраженных электронов.

В третьей главе диссертации **«Влияние напыления атомов и ионной имплантации на состав, структуру монокристаллического Ge»** посвящена изучению влияния на электронную и кристаллическую структуру монокристаллического Ge и получению нанопленок Ge на поверхности флюоритов и получению наноразмерных объектов NaGe_2 , на поверхности Ge методом имплантации ионов Na^+ с последующим прогревом и изучению их состава, структуры, эмиссионных и оптических свойств.

Перед исследованиями образцы Ge обезгаживались при $T = 1000 \text{ K}$ в длительно (до 5 часов) и кратковременном до $T=1200 \text{ K}$ в условиях СВВ = 10^{-7} Па. После обезгаживания поверхностная концентрация O и C уменьшалась и на 1 ат. %.

На рис.1 приведены зависимости $e\varphi$ и σ_m от температуры прогрева для Ge (111) покрытого атомами Ва с толщиной 5 монослоев. Толщина пленки Ва составляла ~ 5 монослоев. Время прогрева ~ 30 мин. При увеличении времени прогрева до 40 – 50 мин значения $e\varphi$ и σ_m при $T = \text{const}$, практически, не изменялись.

Здесь для удобства за 1 монослой принято значение $e\varphi$ при которой $e\varphi=e\varphi_{\text{min}}$. Расчеты показали, что истинная толщина пленки Ва при $e\varphi_{\text{min}}$ составляет $\sim 0,7$ монослоя. Дальнейшее увеличение T приводило к резкому росту $e\varphi$ и уменьшению σ_m . Уже при $T = 1000 \text{ K}$ значения σ_m и $e\varphi$ существенно не отличались от таковых для чистого Ge. Отметим, что при прогреве системы Ва + Ge наблюдалось послойное испарение атомов Ва с поверхности и до $T=950 - 1000 \text{ K}$ не наблюдалось заметной диффузии Ва в Ge. Первый слой Ва находился в хемосорбционном состоянии, поэтому испарения монослойного покрытия наблюдались при сравнительно высоких температурах.

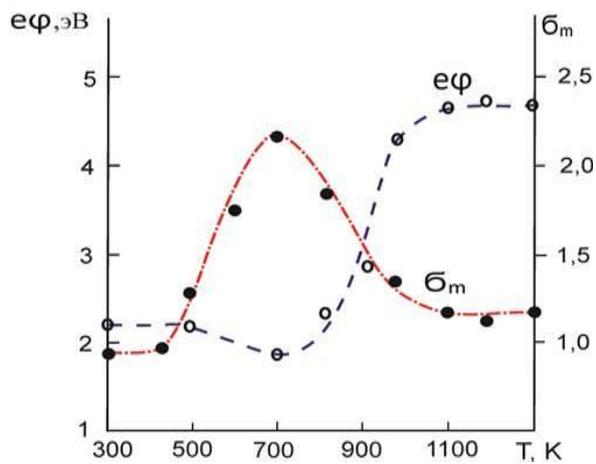


Рис.1. Зависимости $e\phi$ и σ_m от температуры для Ge (111) n-типа с пленкой Ba толщиной $\theta = 5$ моно-слоев.

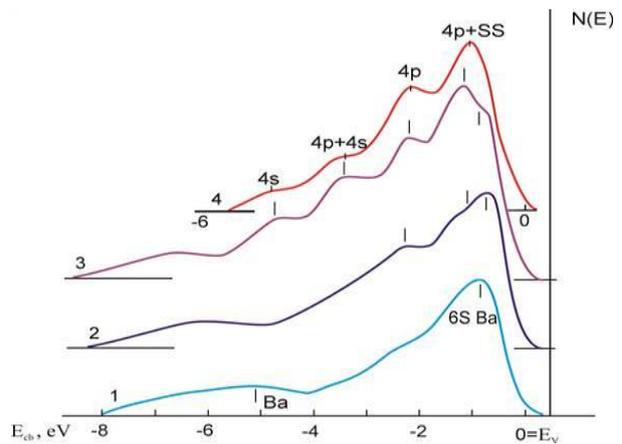


Рис.2. Влияние прогр-ева на спектр фото-электронов Ge с по-верхностной пленкой Ba с толщиной 5 мо-нослоев при T, K: 1–293 K, 2–500 K, 3–750 K, 4–1000 K

На рис.2 приведены спектры фотоэлектронов для системы [Ba + Ge], измеренных после прогр-ева при различных температурах. Энергия фотонов составляла $h\nu = 10,8$ эВ. Видно, что до прогр-ева на КЭР фотоэлектронов наблюдаются пики (особенности) характерные для Ba. Пик при $E_{cb} = -0,8$ эВ объясняется возбуждением электронов из 6s состояний бария. Заметное изменение спектра начинается после прогр-ева при $T = 500$ K.

При этом особенности при $E_{cb} = -5$ эВ бария исчезают, а интенсивность пика с $E_{cb} = -0,8$ эВ резко уменьшается и появляются новые интенсивные пики, характерные для Ge. После прогр-ева при $T = 750$ K ширина спектра ΔE увеличивается, интенсивности всех пиков Ge существенно увеличивается, увеличивается также площадь под кривой энергетического распределения (квантовый выход фотоэлектронов). Все эти изменения объясняется максимальным уменьшением $e\phi$. После прогр-ева при $T = 1000$ K полностью восстанавливается спектр характерный для чистого Ge (111).

На рис.3 приведены зависимости коэффициента прохождения света K от энергии фотонов для SrF_2 без и с пленкой Ge. Видно, что в случае SrF_2 зависимость $K(h\nu)$ в области $h\nu = 0,4 - 1$ эВ практически не меняется. В случае Ge/ SrF_2 зависимость $K(h\nu)$ имеет ступенчатый характер: сначала до $h\nu = 0,6$ эВ.

K практически не меняется, а затем в интервале $h\nu = 0,65 - 0,75$ эВ резко уменьшается до нуля. Экстраполяция этой части кривой к оси $h\nu$ дает приближенное значение E_g . В таблице 1 приведены значения E_g и коэффициентов K, R, T полученные при $h\nu = 0,4$ и $0,65$ эВ для SrF_2 и пленки Ge.

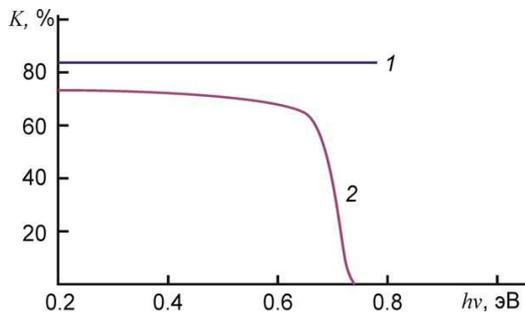


Рис.3. Зависимости $K(h\nu)$ для:
1 – SrF_2 (111); 2 – SrF_2 с пленкой Ge
толщиной 30 Å

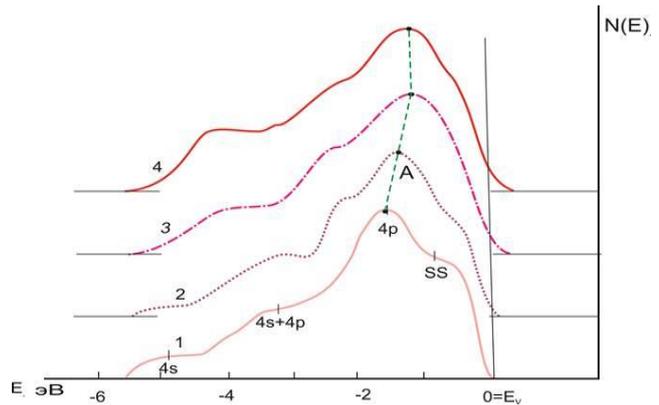


Рис.4. Спектры фото-электронов Ge(111),
бомбардированного ионами Ar^+ с $E_0=1$ кэВ
при $D, \text{см}^{-2}$: 1 – 0, 2 – $2 \cdot 10^{14}$, 3 – $8 \cdot 10^{15}$,
4 – $6 \cdot 10^{16}$.

Таблица 1

Значения E_g, K, R, T для SrF_2 и Ge/SrF₂

Образец \ Параметр	$E_g, \text{эВ}$	K, % при $h\nu$:		R, % при $h\nu$:		T, % при $h\nu$:	
		0,4 эВ	0,65 эВ	0,4 эВ	0,65 эВ	0,4 эВ	0,65 эВ
SrF_2	11,2	82	80	18	20	0	0
Ge/SrF ₂	0,72	74	50	26	26	0	24

Из таблицы видно, что наличие тонкой пленки Ge резко уменьшает E_g и изменение всех оптических параметров SrF_2 . Можно полагать, что формируется гетероструктурная нанопленочная система полупроводник – диэлектрик.

На рис.4 приведена динамика изменения спектра фотоэлектронов Ge при бомбардировке ионами Ar^+ с $E_0=1$ keV разными дозами. Видно, что с ростом дозы облучения амплитуда пика А, уменьшается, его полуширина немного увеличивается и положение смещается в сторону больших энергий (верхнему краю валентной зоны E_v).

Заметное разупорядочение поверхности Ge начинается с $D=2 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$. При этом вблизи пика А появляется новая неинтенсивная особенность пика. С ростом D эта особенность пика сглаживается. По-видимому, при низких дозах некоторые атомы Ge переходят из узлов решетки к расположению между узлами решетки.

На основе рис.4 построена зависимость энергетического сдвига ΔE от дозы ионов Ar^+ (рис.5). Видно, что наибольший сдвиг пика А, обусловленный разупорядочением приповерхностного слоя, составляет 0,35 – 0,4 eV.

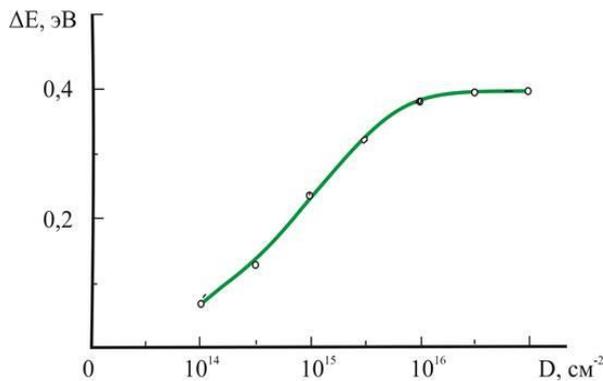


Рис.5. Дозная зави-симость энергетического сдвига основного пика германия.

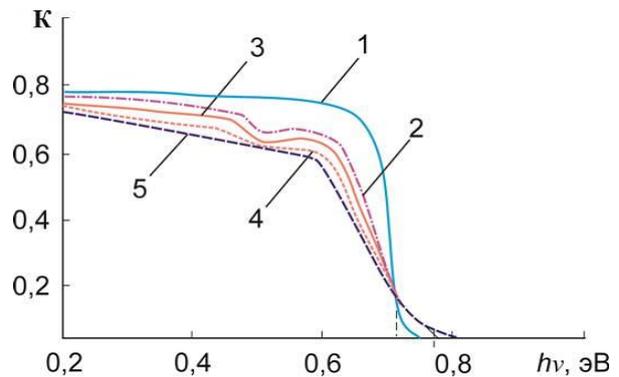


Рис.6. Спектры пропускания света К для Ge(111), бомбардированного ионами Ar⁺ с E₀=1 keV при дозах D, см⁻²: 1 – 0, 2 – 5·10¹⁴, 3 – 10¹⁵, 4 – 5·10¹⁵, 5 – 6·10¹⁶.

На рис.6. приведены спектры пропускания света для Ge(111) бомбардированного ионами Ar⁺ с E₀=1 keV разными дозами. Видно, что для Ge(111) значение E_g = 0,73 эВ. При низких дозах (D ≤ 10¹⁵ см⁻²) на спектрах пропускания наблюдается уменьшение T во всей области hν, уменьшение крутизны кривой и появляется пик дополнительного поглощения света в области hν = 0,5 эВ. С ростом дозы интенсивность нового пика заметно не меняется, а его полуширина увеличивается и при D ≥ 8·10¹⁵ см⁻² полностью сглаживается. При D = 6·10¹⁶ см⁻² значение E_g увеличивается до ~ 0,8 эВ.

При дальнейшем росте D значение T немного уменьшается и при D = D_{нас.} устанавливается на уровне ~ 70 %. Полученные результаты можно объяснить следующим образом. При низких дозах происходит частичное разупорядочение приповерхностных слоев, т.е. часть атомов Ge из узлов решетки переходит в междоузлия. По-видимому, это приводит к дополнительному поглощению света в области hν = 0,5 эВ. При D=6·10¹⁶ см⁻² происходит полное разупорядочение поверхностных слоев.

На рис.7 приведены КЭР фотоэлектронов для грани (111) Ge p - типа, легированных ионами Na с энергией E₀ = 0.5 кэВ при D = 6·10¹⁶ см⁻² до и после прогрева.

Видно, что ионная имплантация приводит к существенному изменению структуры и формы спектра. Эти изменения в основном связаны с разупорядочением поверхностных слоев, образованием нестехиометрических германидов Na_xGe_y и наличием несвязанных атомов Na и Ge.

Из рис.8 видно, что для Ge (111) E_g = 0.71 эВ, для NaGe₂ – 0.45 eV. По спектру K (hν) можно оценить коэффициент пропускания света согласно формуле R = 1 – K. Значение K берется в прямолинейной области K(hν). Видно, что R_{Ge} = 0.22, R_{NaGe₂}=0,26.

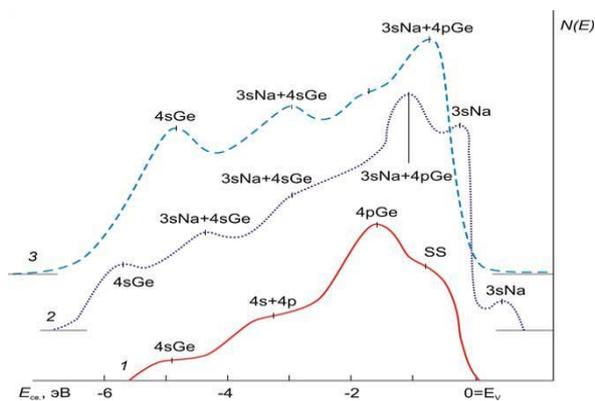


Рис.7. УФЭС для Ge(111):
1 – чистый Ge, 2 – Ge, импланти-
рованного ионами Na⁺ с энергией 0,5
кэВ при $D = D_n$, 3 – после отжига при
 $T=850 \text{ К}$.

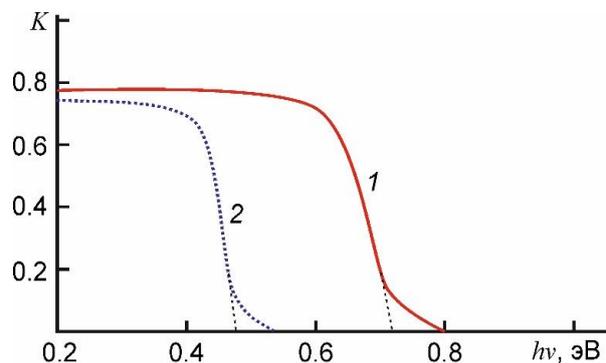


Рис.8. Зависимости $K(h\nu)$ для: 1 – Ge;
2 – пленки NaGe₂/Ge.

Таблица 2

Параметры зон Ge(111), легированного ионами Na⁺ с $E_0 = 0.5 \text{ кэВ}$ при $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до и после температурного отжига

Параметры, эВ	Ge	Na ⁺ → Ge	
		T = 300 К	T = 850 К
Φ	5.3	2.4	3.85
φ	5.0	2.4	3.8
χ	4.6	2.4	3.4
E_g	0.7	0	0.45

На основе анализа этих спектров определены основные макроскопические параметры чистого и ионно-имплантированного Ge (таблица 2). Из таблицы 2 видно, что в случае ионно-имплантированного Ge образование вблизи E_c узкой зоны n-типа приводит к уменьшению усредненного значения E_g до $\sim 0.2 \text{ эВ}$. Свойства приповерхностных слоев приближаются к свойствам присущим металлам. После прогрева формируются узкозонный полупроводник NaGe₂ p - типа с $E_g = 0.45 \text{ эВ}$.

На рис.9 приведены зависимости $-dR/dE_p$ от E_p для “чистого” и бомбардированного ионами Ar⁺ и Na⁺ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ при дозе насыщения D_n в области $E_p = 1 - 250 \text{ эВ}$. D_n для Ar⁺ составляла $\sim 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, а для Na⁺ – $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. На спектре чистого Ge во всей области E_p обнаруживаются ряд максимумов и минимумов.

После бомбардировки ионами Ar⁺ и Na⁺ сглаживаются все дифракционные максимумы, что связано с полной аморфизацией приповерхностных слоев.

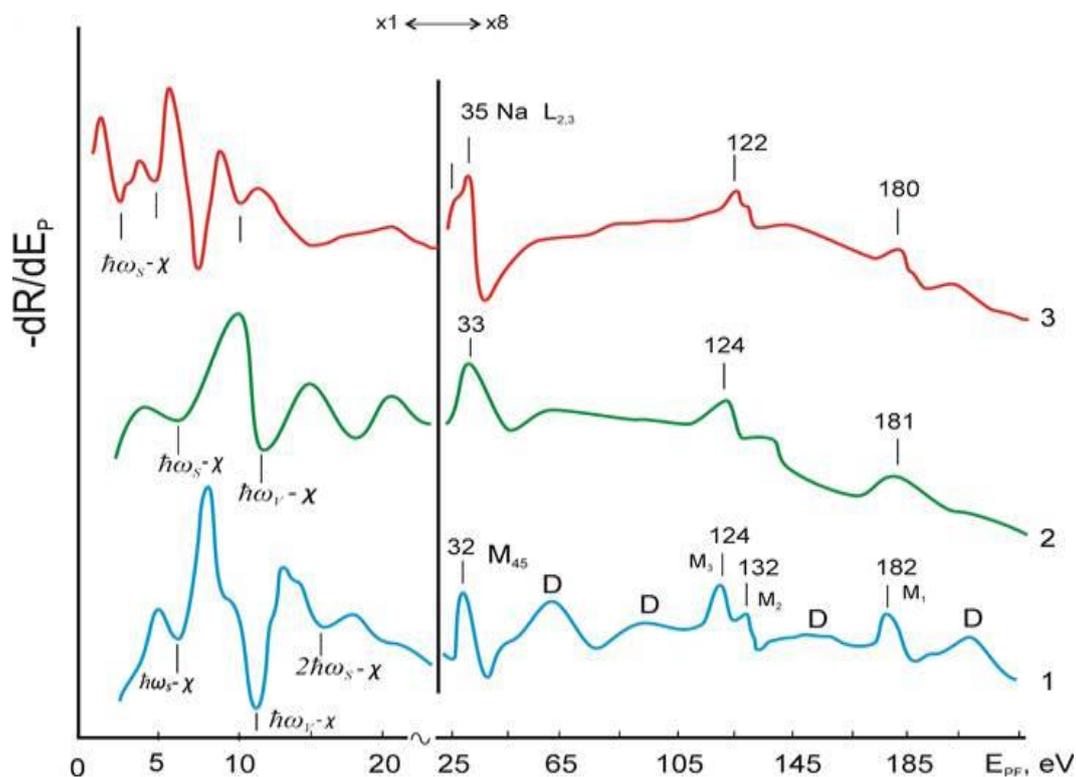


Рис.9. Зависимости $-dR/dE_p(E_p)$ для Ge бомбардированного Ar^+ (2) и Na^+ (3) с $E_0=1кэВ$ при дозе насыщения D_n в области $E_p = 1 - 250$ эВ. 1 – чистый Ge(111).

На рис.10 приведены спектры УОЭ M_{45} Ge бомбардированного ионами Ar^+ , Na^+ и O_2^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до и после прогрева, видно, что после бомбардировки ионами Ar^+ положение M_{45} пика Ge заметно не меняется, а при имплантации ионов Na^+ - положение пика M_{45} смещается в сторону меньших энергий, а при имплантации ионов O_2^+ - в сторону больших энергий.

Это связано с тем, что образование соединений типа Ge + Na сопровождается переходом электронов от атома Na к атому Ge, что и приводит к уменьшению энергии связи электронов матрицы. В случае же окиси германия, наоборот, последний отдает свои электроны кислороду и, следовательно, энергия связи электронов германия увеличивается.

По величине химического сдвига можно оценить также и количество заряда Δq , передаваемого катионом аниону:

$$\Delta q = \Delta E / e^2 (A(r)/r - \alpha/r)$$

где ΔE – величина химического сдвига основного уровня, r – величина, близкая к ионному радиусу катиона, R -расстояние между катионом и анионом, $A(r)$ – геометрический фактор, учитывающий особенности распределения зарядовой электронной плотности, α – постоянная Маделунга. Величина $A(r)$ обычно определяется по формуле

$$A(r) = (1 - \Gamma^2) / (1 - \Gamma^3)$$

Оценка величины Γ , проведенная на основании формы распределения электронного заряда в атомах, приводит к значению $\Gamma=0,5$.

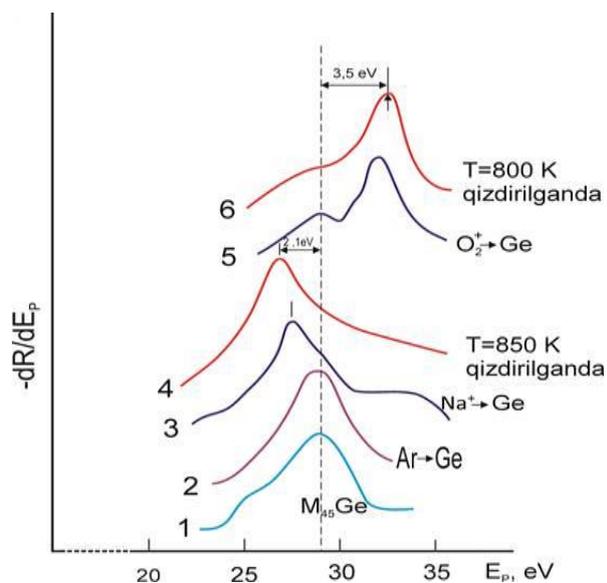


Рис.10. Спектры УОЭ M_{45} Ge бомбардированного ионами Ar^+ , Na^+ и O_2^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 8 \cdot 10^{16}$ см⁻² до и после прогрева.

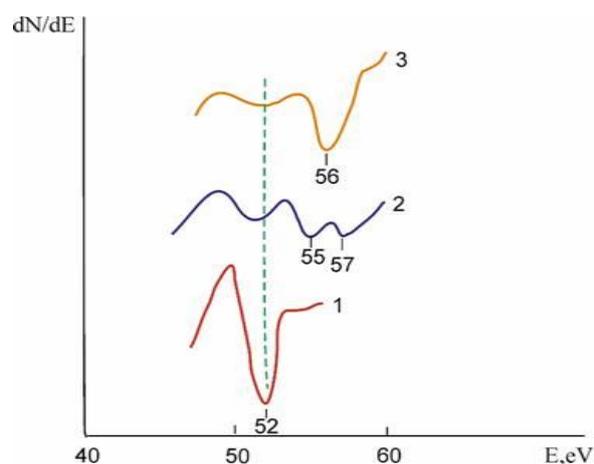


Рис.11. Влияние имплантации ионов Na^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻² на форму и положение оже-пика M_1M_3V германия: 1 – Ge(111), 2 – после ионной имплантации, 3 – после прогрева при $T = 850$ К

Степень ионности связи I оценивалась по формуле Полинга:

$$I = \frac{\chi_{Ge} - \chi_{L\bar{A}}}{|\chi_{Ge} - \chi_{L\bar{A}}|} \left[1 - e^{-\frac{1}{4}(\chi_{Ge} - \chi_{L\bar{A}})^2} \right]$$

где χ_{Ge} – сродство к электрону Ge, $\chi_{L\bar{A}}$ – сродство к электрону $NaGe_2$ или GeO_2 . Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таким образом, при имплантации ионов Na^+ в германий в сочетании с прогревом между атомами примести и матрицы образуется ионно-ковалентная связь. Доля ионных связей при образовании $NaGe_2$ составляет ~ 25 – 30 %, а при образовании GeO_2 - 58 – 60 %.

Таблица 3

Химический сдвиг уровня M_{45} , степень ионности связи I и величина переносимого заряда Δq в соединениях германия.

Соединение	Химический сдвиг, эВ	$\chi_{Ge} - \chi_{L\bar{A}}$, эВ	I , %	Δq^*
$NaGe_2$	- 2,1	1,2	25	0,9
GeO_2	+ 3,5	3,6	58	1,5

На рис.11. приведена оже-линия M_1M_3V германия и ее изменение после имплантации ионов Na с $E_0 = 1$ кэВ при $D = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻² и последующего отжига при $T = 850$ К в течении 40 мин. Видно, что после ионной имплантации интенсивность оже-пика Ge резко уменьшается и появляются пики при энергиях 55 и 57 эВ характерных для соединений типа $Na + Ge$. После прогрева

интенсивность оже-пика M_1M_3V Ge уменьшается $\sim 10 - 12$ раз. Появляется интенсивный пик при $E = 56$ эВ характерный для германида типа $NaGe_2$. Анализ полного спектра ОЭС совместно со спектрами УОЭ и УФЭС показали, что при этом формируется пленка $NaGe_2$ с $\theta = 30 - 35 \text{ \AA}$.

В четвертой главе диссертации «Изменение состава и структуры приповерхностной области ионно легированных полупроводников в процессе термического и лазерного отжига» представлены экспериментальные результаты по исследованию влияния электронной бомбардировки, прогрева и лазерного облучения, атмосферного воздуха на состав, электронную и кристаллическую структуру приповерхностных слоев Ge, легированных низкоэнергетичными ($E_0 \leq 5$ кэВ) ионами активных элементов. Все исследования проводились при вакууме $P = 10^{-7}$ Па, в том же приборе, где проводилась ионная имплантация.

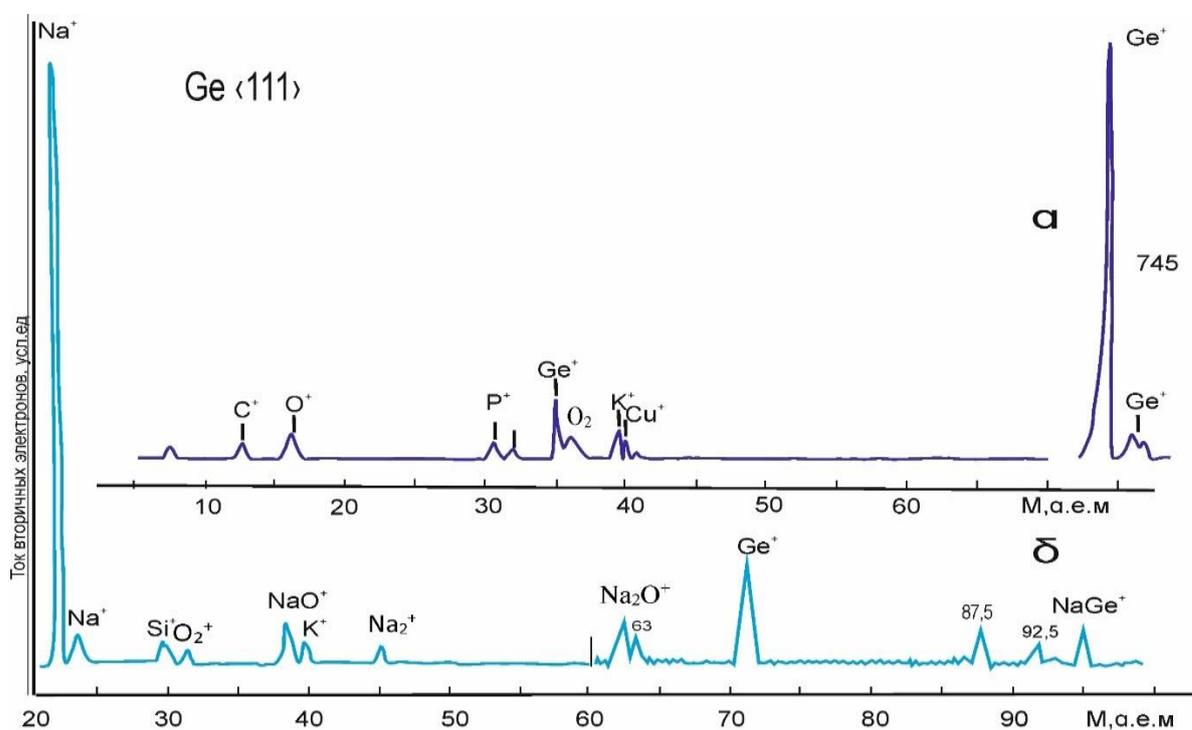


Рис.12. Масс-спектры вторичных ионов чистого (а) и легированного ионами Na^+ с $E_0=1$ кэВ при $D=8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (б) германия

Масс-спектры вторичных ионов поверхности чистого Ge и Ge, легированного ионами Na^+ с $E_0 = 1$ кэВ, при дозе $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ представлены на рис.12. Видно, что в спектре необлученного Ge кроме пиков матрицы, обнаруживаются малоинтенсивные пики O, C, Na, Ca, Si. Отметим, что их общая концентрация не превышает 1 ат.%. В спектре ионно-легированного Ge обнаруживаются пики Na (23 эВ), Ge (36, 73), NaO (39), Na_2O (62). Однозначная идентификация остальных масс пока является затруднительной. Появление соединений типа NaO и Na_2O обусловлено внедрением кислорода в приповерхностный слой в процессе ионного распыления.

Влияние температурного и лазерного отжига на концентрационные профили распределения атомов легирующей примеси для Ge, легированного

ионами Na^+ с $E_0=1\text{кэВ}$ и дозой $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ представлены на рис.13. Видно, что при увеличении температуры до $T=850 \text{ К}$ концентрация Na вблизи поверхности заметно уменьшается, что в основном обусловлено усилением диффузии Na вглубь мишени. При этом образуется соединение типа NaGe_2 с толщиной $\sim 30 - 35 \text{ \AA}$. При дальнейшем увеличении температуры наряду с диффузией начинается интенсивная десорбция натрия из области внедрения.

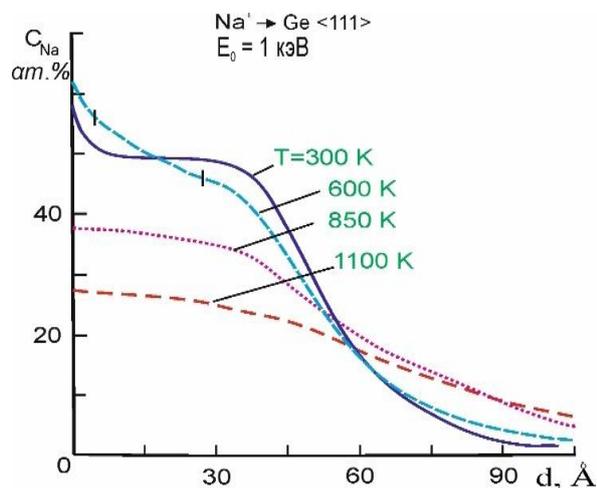


Рис. 13. Влияние отжига при различной температуре на распределение концентрации атомов натрия в германии, легированного ионами Na^+ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ и $D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

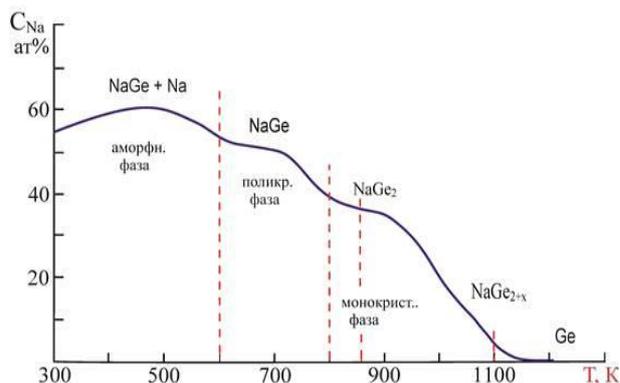


Рис. 14 Диаграмма состояний поверхности германия, легированного ионами Na^+ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ в процессе отжига.

Для иллюстрации фазовых изменений, происходящих при прогреве, на рис.14 приведена диаграмма состояний поверхности германия, легированного ионами Na^+ с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$. Видно, что с ростом T ионно-легированные слои этих образцов постепенно переходят от аморфизированной фазы к монокристаллической фазе. При этом характерны следующие переходы: $\text{NaGe}+\text{Na}$ (аморфн.) – NaGe (полукр.) - NaGe_2 (монокрис.) - Ge (монокр.)

Прогрев при $T \leq 800 \text{ К}$ и лазерный отжиг при $W \leq 2 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ образцов Ge , легированных ионами Na^+ с $E_0 \geq 3 \text{ кэВ}$ приводит к возрастанию концентрации натрия в приповерхностном слое и смещению положений максимума кривой $C_{\text{Na}}(d)$ в сторону меньших глубин (рис. 15).

В случае лазерного отжига образцов легированных с $E_0 \geq 3 \text{ кэВ}$ при не очень высоких плотностях энергии фотонов концентрация натрия в приповерхностной области образца возрастает. Наибольшее увеличение (до 40 – 45 ат%) последнего достигается при $W = 1,5 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$. Высокое содержание внедренной примеси сохраняется до глубины 25 – 30 \AA , а с ростом глубины оно резко уменьшается (рис. 15, кривая 5). Начиная с $W = 2 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ наряду с усилением диффузии происходит интенсивная десорбция натрия, что приводит к уменьшению C_{Na} по всей глубине ионно-легированной области.

На рис. 16 приведены зависимости относительного коэффициента поглощения света $T_{\text{имп.}}/T_{\text{чис}}$ при $\lambda = 1250 \text{ нм}$ от температуры отжига для Si

(111), имплантированного ионами Na^+ с $E_0 = 1$ кэВ разными дозами. Где $T_{\text{чис.}}$ – коэффициент поглощения для чистого Si (111), $T_{\text{имп.}}$ – коэффициент поглощения Si(111), после ионной имплантации. Видно, что коэффициент поглощения в случаях ионно-имплантированного Si, значительно больше, чем для чистого.

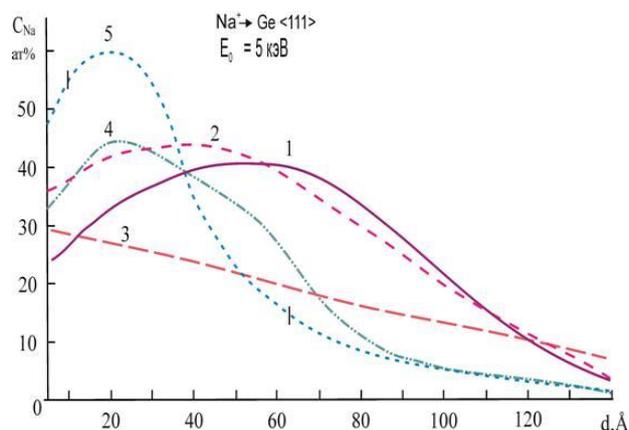


Рис. 15. Влияние отжига при различной температуре T (1, 2, 3) и лазерного облучения с разной плотностью энергии W (4, 5) на распределение атомов натрия в германии, легированном ионами Na^+ с $E_0 = 5$ кэВ и $D = 6 \cdot 10^{16}$ см^{-2} ; 1 – 300 К; 2 – 800 К; 3 – 1100 К; 4 – $W = 1,2$ Дж \times см $^{-2}$; 5 – $W = 1,8$ Дж \times см $^{-2}$.

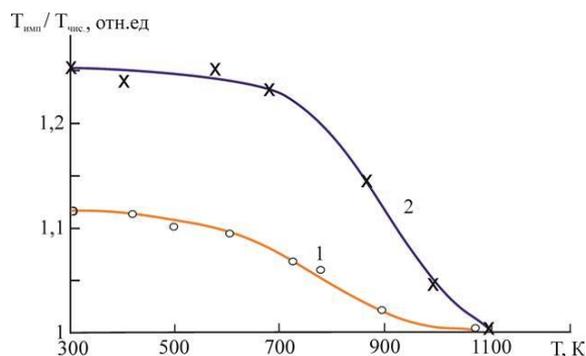


Рис. 16. Зависимость $T_{\text{имп.}}/T_{\text{чис.}}$ от температуры отжига для Si (111), имплантированного ионами Na^+ с $E_0 = 1$ кэВ с дозами D , см^{-2} : 1 – $2 \cdot 10^{15}$; 2 – $6 \cdot 10^{16}$.

Таблица 4.

Оптимальные температурные режимы получения тонких пленок MeSi , MeSi_2 и MeGe на поверхности Si(111) и Ge(111), имплантированных ионами Na^+ и Ba^+ с $E_0 = 1$ кэВ при $D = D_{\text{н.}}$

Тип силицида и германида	MeSi		MeSi ₂		MeGe		Si	Ge
	NaSi	NaSi ₂	BaSi	BaSi ₂	NaGe ₂	BaGe ₂		
Параметры решетки								
Температура образования, T, К	800	900	1000	1200	850	1000	–	–
Толщина пленок	30-35	35-40	25-30	30-35	30-35	35-40	Монокристалл	
Тип решетки	куб.	куб.	куб.	куб.	куб.	куб.	куб.	куб.
Постоянная решетки, Å	6,15	6,545	–	6,54	–	6,45	5,41	5,65

На основе результатов, приведенных разделах 3 и 4 в сочетании с данными растровой электронной микроскопии и дифракции быстрых электронов нами были определены оптимальные режимы ионной имплантации (тип, энергия, доза) и последующего термического отжига

(температура, время) для формирования тонких наноразмерных пленок германидов и силицидов металлов. В качестве примера в таблице 4 приведены некоторые результаты этих исследований.

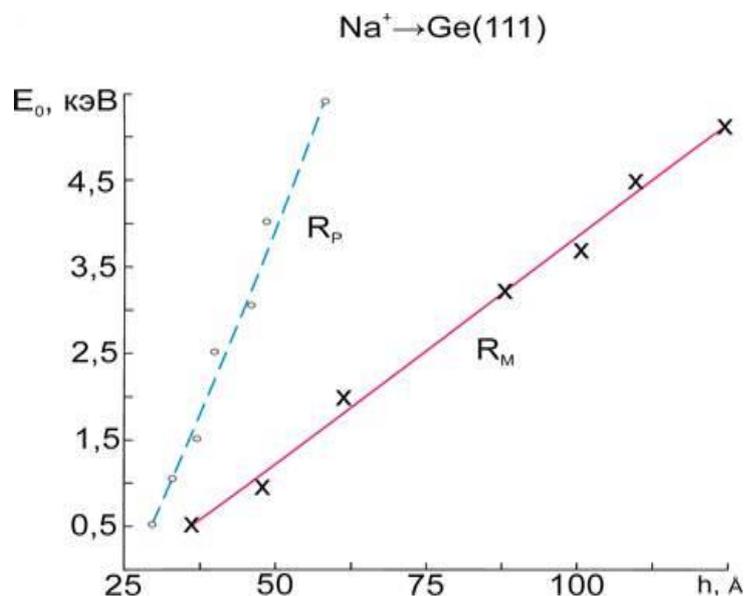


Рис. 17. Зависимости максимального и проецированного пробега от энергии имплантируемых ионов натрия в Ge.

Из таблицы видно, что нанопленки NaSi_2 , BaSi_2 , NaGe_2 и BaGe_2 имеют кубические решетки. С ростом энергии ионов в интервале от 0,5 до 5 кэВ толщина пленки германидов и силицидов увеличивается практически линейно, что обусловлено линейным ростом максимального (R_m) и проецированного (R_p) пробега ионов (рис. 17). Из рисунка видно, что в случае имплантации ионов Na^+ в Ge при $E_0 = 0,5$ кэВ значения $R_m = 37 \text{ \AA}$ и $R_p = 27 \text{ \AA}$, а при $E_0 = 5$ кэВ – $R_m = 125 \text{ \AA}$ и $R_p = 54 \text{ \AA}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов диссертационной работы доктор философии (PhD) физико-математические наук на тему «Электронные и оптические свойства наноструктур, созданных на основе германия методами осаждения и ионной имплантации» представлено следующее заключение:

1. Изучены закономерности изменения состава, электронной структуры, эмиссионных и оптических свойств Ge(111) при адсорбции тонких слоев Ba и последующего отжига. В частности установлено, что после прогреве системы Ba - Ge(111) при $T = 700 \text{ K}$ на спектре фотоэлектронов имеются особенности характерные как для Ge, так и для Ba. При этом значение ϕ уменьшается до минимума, а значения σ_m и Y увеличиваются до максимума.

2. Показано, что предварительная бомбардировка поверхности SrF_2 при $T = 750 \text{ K}$ увеличивает адгезию напыляемых пленок Ge и позволяет получить эпитаксиальные пленки Ge с высоким совершенством и хорошей гладкостью. Определены ширина запрещенной зоны и оптические параметры SrF_2 и пленки Ge.

3. Установлено, что при аморфизации приповерхностных слоев основной максимум плотности состояния валентных электронов Ge(111) сдвигается на

0,35 – 0,4 эВ и это значение хорошо согласуется с теоретическим расчетом, выполненным с использованием функции Грина.

4. Показано, что в процессе бомбардировки ионами Ar^+ плотность состояния валентных электронов $\text{Ge}(111)$ существенно изменяется, что объясняется, в основном, разупорядочиванием приповерхностных слоев. Показано, что на зависимости $-dR/dE_p$ (E_p) после имплантации ионов Ar^+ , Na^+ и O_2^+ все дифракционные максимумы сглаживаются, что объясняется аморфизацией приповерхностных слоев.

5. Установлено, что на спектре УОЭ положение пика основного уровня M_{45} $\text{Ge}(111)$ при бомбардировке ионами Ar^+ практически не меняется, при бомбардировке ионами Na^+ - смещается в сторону меньших энергий, а при бомбардировке ионами O_2^+ - в сторону больших энергий. Это говорит о том, что при бомбардировке ионами Ar^+ зарядовке состояние Ge не изменяется, при бомбардировке ионами Na^+ Ge получает электрон, а величине O^+ - отдай электрон

6. По значению химического сдвига пика M_{45} $\text{Ge}(111)$ оценены количества переносимого заряда и степень ионности связи I . В случае NaGe_2 значения $\Delta q = 0,9e$ и $I = 25 \%$, а в случае GeO_2 - $\Delta q = 1,5e$ и $I = 58 \%$.

7. Изучена динамика изменения элементного и химического состава приповерхностной области $\text{Ge}(111)$, имплантированного ионами Na^+ при термическом и лазерном отжиге

8. Показано, что с помощью термического прогрева можно получить слои с монотонно спадающей по глубине концентрацией активного элемента. В случае лазерного отжига между ионно-легированным слоем и матрицей возникает резкая граница. Обнаружено, что при $T=850$ К происходит полная кристаллизация приповерхностного слоя $\text{Ge}(111)$ и образуется соединение типа NaGe_2 .

9. Проведен анализ основных причин, приводящих к изменению электронной структуры поверхности ионно-легированных образцов, при вариации температуры прогрева и плотности энергии лазерного отжига. В частности, обнаружена определенная связь между изменениями состава, кристаллической структуры и макроскопических электронных характеристик поверхности ионно-легированных полупроводников.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING
OF SCIENTIFIC DEGREES PhD.03/31.03.2021.FM.70.06
OF KARSHI STATE UNIVERSITY**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED
AFTER ISLAM KARIMOV**

ABRAEVA SEVARA TOSHTEMIROVNA

**PRESENTATION ON THE ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES
OF NANOSTRUCTURES ON THE SURFACE OF Ge BY POLLINATION
AND ION IMPLANTATION METHODS**

01.04.04 – Physical electronics

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY
(PHD) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Karshi – 2024

The subject of doctor of philosophy dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.2.PhD/FM720.

The dissertation was completed at the Tashkent State Technical University named after Islam Karimov.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (rasume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.qarshidu.uz) and on Information-education portal “ZiyoNet” (www.ziynet.uz).

Scientific consultant: **Tashmukhamedova Dilnaza Artikbaevna**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
professor

Official opponents: **Egamberdiev Bakhrom Egamberdievich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
professor

Sadullaev Alovuddin Boboqulovich
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
associate professor

Leading organization: **Fergana Polytechnic Institute**

The defense will take place on “_____” _____ 2024 at _____ at the meeting of scientific council number PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 for the award of academic degrees at Karshi State University (Address: 180119, Uzbekistan, Karshi,.17 Kuchabag Street, Phone/fax: (99875) 225-34-13; e-mail: kardu@mail.ru).

The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at Karshi state university (is registered № _____) (Address: 180119 Uzbekistan, Karshi,.17 Kuchabag Street, Phone/fax: (99875) 225-34-13; e-mail: kardu@mail.ru).

The Abstract of the dissertation sent out on “_____” _____ 2024.
(Mailing report № _____ on “_____” _____ 2024).

Normuradov M.T.
Chairman of scientific council that awards
scientific degrees,
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Allayarova G.Kh.
Scientific secretary of the scientific
council on awarding scientific degrees,
candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor

Tashatov A.K.
Chairman of the scientific seminar,
doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (Abstract for the dissertation of PhD thesis)

The purpose of the dissertation is to study: the patterns of germanide formation on the Ge surface during atom deposition and ion implantation.

In accordance with this goal, it was necessary to solve the following tasks:

to study the dynamics of changes in the composition, electronic structure, emission and optical properties of monocrystalline Ge(111) during sputtering of Ba atoms and subsequent annealing. Determination of optimal technological modes of ion implantation and subsequent annealing for the formation of thin nanoscale germanide films;

to develop a technique for producing ultrathin single crystal Ge films on the surface of SrF₂(111) with high crystalline perfection and good smoothness;

to study the effect of Ar⁺ ion bombardment on the electronic structure of Ge(111). Theoretical explanation of the mechanisms of changes in the density of the valence electron state during ion bombardment;

to study the features of the photoelectron spectra of Ge implanted with Na⁺ ions. To study the effect of temperature and laser annealing on the composition, crystal and electronic structure of the surface of Ge(111) implanted with Na⁺ and Ba⁺ ions;

The objects of work Ge single crystal samples and thin films were calcd.

The scientific novelty of the research is as follows:

the main patterns of changes in the composition, electronic and crystal structure of the Ge(111) surface during barium deposition and subsequent annealing have been established. The optimal technological modes of ion implantation and subsequent annealing for the formation of thin nanoscale germanide films have been determined;

using the method of bombardment with Ar⁺ ions on the surface of SrF₂(111) at T=750K, an increase in the adhesion of sprayed Ge films was detected and a homogeneous, ultrathin single crystal Ge(111) film with a thickness of 25-30 Å was obtained in the transition layer of the Ge / SrF₂ system;

the effects of Ar⁺ ion bombardment on the crystal and electronic structures of the Ge(111) surface have been experimentally and theoretically determined;

the dynamics of changes in the density of the state of valence electrons Ge during implantation of Na⁺ ions has been studied. The main patterns of dynamics of changes in the main mechanisms of formation of germanides Name and Age 2, during implantation of Na⁺ ions in Ge(111) and subsequent annealing are determined.

Implementation of the research results.

The results of the study on the formation of nanoscale metal silicides in the surface and near-surface areas of silicon, as well as the algorithm of the formation of silicides and heterosystems germanide-germanium-metal were effectively used in the implementation of scientific and technical tasks of the Uzb-Ind-2021-78 project "Thermoelectric properties and self-organization processes in silicates doped with metal oxides" in particular to clarify ways to create efficient and cheap thermoelectric materials from silicon dioxide and nanosystems based on it, which

are intended for wide application in high-power energy, in film silicide and silicate glasses (Reference of the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek dated January 17, 2024 No. 01/11-590). Recommendations are given for the creation of modern strain gauges based on thermoelectric phenomena.

Based on the results obtained, the lattice parameters, the level of structure perfection were studied, and models of the atomic structure of various nanofilm systems created during low-energy ion implantation of Ge and Si surfaces, depending on energy, radiation dose and post-implantation annealing, were constructed. For the first time, when implanting active metal ions into silicon samples, it was found that the redistribution of impurity atoms in depth, depending on their type, increases either in the ion-doped layer or in the unalloyed Si region. The change in resistivity, the coefficient of REE and the coefficient of light reflection of surface layers during implantation with ions of germanium and silicon samples used in solar cells, as well as in JSC PHOTON, a material with high photosensitivity created on the basis of Si and Ge doped with impurity atoms was used (Reference of JSC Uzeltchanoat No.04-3/142 dated 30.01.2024). Based on the application of scientific results in practice, scientifically sound recommendations were given for the development of light sensors with high sensitivity.

Publication of the research results. A total of 16 scientific works on the topic of the dissertation, 5 articles in scientific publications recommended for publication of scientific of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertations of the Higher Test Commission of Uzbekistan (in republican scale, in scientific journals and in Scopus in journals in the database) published.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The text of the dissertation is presented on 114 pages of text, including 42 figures and 7 tables.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Abraeva S.T., Tashmukhamedova D.A., and Umirzakov B.E Epitaxial Growth of Ge Nanofilms on the Surface of SrF₂ // ISSN 1027-4510, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2023, Vol. 17, Suppl. 1, pp. S329-S332. Pleiades Publishing, Ltd., 2023. (Scopus, Journal Impact Factor: 0.4 (2023))

2. Abraeva S. T., Tashmukhamedova D. A., Yusupjanova M. B., Umirzakov B.E. Peculiarities of Photoelectron Spectra of Ge Implanted with Na⁺ ions // Technical Physics Letters 2023, Vol.49 No.Ipp.25-27.

3. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Абраева С.Т., Абдиев Х.Э., Умирзаков Б.Е. Влияние бомбардировки ионами Ar⁺ на спектр валентных электронов монокристалла Ge // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research Vol. 4 iss. 2 2022 pp.: 28-31.

4. Bekpulatov I., Turapov I., Abrayeva S., Normuminov J. Optimum technological modes of ion implantation and subsequent annealing for formation of thin nanosized silicide films // E3S Web of Conferences 264, 05037 (2021).

5. Abraeva S.T., Tashmukhamedova D.A., Gulyamova S.T., Yusupjanova M. B., Xujaniyazova A.U. The impact of bombardment by Ar⁺ Na⁺ and O₂⁺ ions on spectra of elastically scattered electrons of single-crystal // E3S Web of Conferences 401, 05006 (2023).

II бўлим (II часть, part II)

6. Ташмухамедова Д.А., Уроқов А.Н., Абраева С.Т., Умирзаков Б.Е., Назимходжаев С. Определение оптимальных условий получения эффективных фотопоглощающих структур на основе материалов различной природы // Тошкент шаҳридаги Миллий тадқиқот "МЕР" университети академик Мўминов Р.А. Таваллудининг 80 йиллигига бағишланган анжуман 28-29 октябр, Тошкент 2021, 35-36 бет.

7. Умирзаков Б.Е., Абраева С.Т., Юсупжанова М.Б., Мустафаев А., Ташмухамедова Д.А. Изменение электронной структуры Ge, имплантированного ионами Na⁺ // Физические и физико-химические основы ионной имплантации: Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов (Казань, 11–14 ноября 2022 г.). – Н. Новгород, 2022. – 92 с.стр.-88.

8. Юсупжанова М.Б., Абраева С.Т., Пак С.С., Абдувайтов А.А., Ташмухамедова Д.А. Закономерности роста нанопленок Ge на поверхности SrF₂ // Матералы III Международной научно-практической конференции «Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo'tkazgich materiallar III xalqaro ilmiy anjuman 24-25 noyabr 2022 yil стр.112-114.

9. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Абраева С.Т., Абдиев Х.Э., Уроков А.Н. Изменение электронной структуры монокристалла Ge бомбардировкой ионами Ar^+ // O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligi Urganch davlat universiteti ”Yarimo‘tkazgichlar, nanomateriallar va fotoenergetikaning dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani 9-10 – dekabr, 2022 yil 249-251 bet.

10. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Курбонова У.Х., Абраева С.Т., Мамасидикова Ш.М. Изменения состава и структуры при температурном отжиге Ge, имплантированного ионами Na // Материалы VI Международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления...» Фергана -2023, с.112-113.

11. Tashmukhamedova D.A., Abraeva S.T., Gulyamova S.T., Tolipova Sh.F., Xujaniyozova A.U., Boltaev X.X. Effect of bombardment by Ar^+ ions on the transmission spectrum of a Ge surface // IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования технологии» Лаплаз-2023, Москва, с.262.

12. Умирзаков Б.Е., Абраева С.Т., Гулямова С.Т., Худойбердиев И.Ф., Болтаев Х.Х., Ташмухамедова Д.А. Изучение электронной и кристаллической структуры Ge при бомбардировке ионами Ar^+ // 52-я международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва 30 мая-1июня 2023, с.139.

13. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Гулямова С.Т., Абраева С.Т., Хужаниязова А.У., Толипова Ш.А. Влияние температурного и лазерного отжига на состав и структуру ионно-легированных слоев Ge // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Роль женщин-учёных в развитии науки, инноваций и технологий» 15-17 августа 2023 года г.Худжанд, Согдийская область, Таджикистан, 146-152.

14. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Абраева С.Т., Умарходжаева З., Хужаниязова А. Влияние лазерного отжига на профили распределения атомов Na по глубине ионно-имплантированного Ge // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» 19-21 октября 2023, с.147.

15. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Уроков М.Б., Абраева С.Т., Жумаев Ж.М. Оптимальные технологические режимы ионной имплантации и последующего отжига для формирования тонких наноразмерных пленок германидов и силицидов // Карши-2023, 30-31 октября.

16. Ташмухамедова Д.А., Талипова Ш.А., Абраева С.Т., Хужаниязова А.У., Худойкулов Ф.Я., Эргашов Ё.С. Изучение электрофизических свойств тонких наноразмерных пленок силицидов // “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани Тошкент, 2023 йил, 3-4 ноябрь 179-180 бет.

Босишга рухсат этилди: 15.09.2024 йил Бичими 60x84^{1/8}, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди. Шартли босма табағи 4.

Адади: 50. Буюртма: № 4958

“Ёшлар иттифоқи китоблар олами” босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: Қарши шаҳри Кўчабоғ бўчаси 17-уй

