

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI FIZIKA-
MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI ILMIY
DARAJASINI BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

ISAKOV BOBIR OLIMJONOVICH

**KREMNIY SIRTIDA VA SIRT OLDI QATLAMIDA $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$
TUZILMALARNI HOSIL QILISH VA ULARNI KREMNIYNING OPTIK
XOSSALARIGA TA‘SIRI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYA AVTOREFERATI**

Farg‘ona – 2024

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiya avtoreferati
mundarijasi**

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

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

Isakov Bobir Olimjonovich

Kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ tuzilmalarni hosil qilish va ularni kremniyning optik xossasiga ta'siri.....3

Исаков Бобир Олимжонович

Формирование структур $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое и их влияние на оптические свойства кремния.....21

Isakov Bobir Olimjonovich

Formation of $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ structures on the silicon surface and in the pre-surface layer and their effect on the optical properties of silicon.....39

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of publications.....43

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI FIZIKA-
MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI ILMIY
DARAJASINI BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

ISAKOV BOBIR OLIMJONOVICH

**KREMNIY SIRTIDA VA SIRT OLDI QATLAMIDA $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$
TUZILMALARNI HOSIL QILISH VA ULARNI KREMNIYNING OPTIK
XOSSALARIGA TA‘SIRI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM732 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.ispm.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Iliyev Xalmurat Midjitovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Nuriddinov Izzatilla
Fizika-matematika fanlari doktori, professor,
O'zFA, Yadro fizikasi instituti, bosh ilmiy
hodimi

Radjapov Sali Ashirovich
Fizika-matematika fanlari doktori, professor,
O'zFA, FTI, bosh ilmiy hodimi

Yetakchi tashkilot:

Sh. Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti

Dissertatsiyaning himoyasi Farg'ona politexnika instituti huzuridagi falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 raqamli Ilmiy kengashning 2024 yil «13» 07 soat 10⁰⁰ da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86 uy. Tel: (+99873) 241-12-06, faks (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, kichik majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Farg'ona politexnika institutning axborot-resurs markazi ilmiy-uslubiy bo'limida tanishish mumkin. (209 raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86 uy. Tel: (+99891) 328-32-69).

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil «01» 07 kuni tarqatildi.
(2024 yil «01» 07 daqi 3 raqamli reestr bayonnomasi).



N.X. Yuldashev
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
fizika-matematika fanlari doktori, professor

B.J. Axmadaliyev
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash kotibi, fizika-matematika fanlari
bo'yicha falsafa doktori, dotsent

S.M. Otajonov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
xuzuridagi ilmiy seminar raisi, fizika-matematika
fanlari doktori, professor.

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda quyosh energiyasidan ko‘proq foydalanib, yer osti yoqilg‘i-energiya resurslarini tejash hamda quyosh elementlarining energiya samaradorligini oshirish asosida quyosh energiyasidan oqilona foydalanish masalalariga alohida ahamiyat berilmoqda. Hozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda “...quyosh energiyasidan elektr energiyani ishlab chiqarish, qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan elektr energiyasini ishlab chiqarishdagi qarib 46% ulushni tashkil etmoqda. 2025-2030 yillar oralig‘ida nol emissiya senariysida elektr energiyasini qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan ishlab chiqarish ulushini 60% dan orttirish belgilab olingan”¹. Bu borada kremniy xossalari tubdan farq qiluvchi xossalarga ega bo‘lgan, tarkibida III-V binar birikmalar bo‘lgan yangi materiallarni kashf qilish va ular asosida samaradorligi yuqori bo‘lgan quyosh elementlarini ishlab chiqishga alohida e‘tibor qaratilmoqda.

Jahonda kremniy materiali sirtida GaSb binar birikmalarni hosil qilish bilan materialning fizik xossalari o‘zgartirish, uning xususiyatlarini o‘rganish va yangi material asosida quyosh elementlari va infraqizil nurlanish sohasida ishlaydigan datchiklar hamda laserlar tayyorlashga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo‘nalishda, kirishma sifatida Ga va Sb elementlaridan foydalanib kremniy monokristalini diffuziya usuli bilan legirlash, Si sirtida GaSb binar birikmalarni hosil qilishning maqbul termodinamik sharoitlarni aniqlash, tarkibida GaSb birikmalari mavjud kremniyning optik, elektr-fizik va fotoelektrik xossalari boshqarish, Si sirtida GaSb binar birikmalarini hosil qilish orqali shakllangan $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ tuzilmali yangi materialning kristall panjara parametrlarini aniqlash bo‘yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanadi. Shu bilan birga, sirtida GaSb binar birikmalari hosil qilingan Si namunasining taqiqlangan soha energiyasini boshqarish, $Si_{0.5}GaSb_{0.5}$ tuzilmasini kompyuterda modelini yaratish dolzarb vazifalardan hisoblanadi.

Respublikamizda quyosh energiyasidan keng foydalanish va quyosh elementlarini samaradorligini oshirishga yordam beradigan yangi texnologiyalarni yaratish bo‘yicha keng ko‘lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. “O‘zbekiston — 2030” strategiyasida ““Yashil iqtisodiyot”ga o‘tish, uning asosi bo‘lgan qayta tiklanuvchi energiyadan foydalanish ko‘rsatkichlarini keskin oshirish”² bo‘yicha muhim vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida GaSb binar birikmalarini shakllantirish, tarkibida GaSb binar birikmalari shakllangan kremniy asosidagi quyosh elementlarini samaradorligini oshirish muhim hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 11 sentyabrdagi PF-158-son “ “O‘zbekiston — 2030” strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni, O‘zbekiston Respublikasi prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son “2022 — 2026-

¹ https://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2015_3_84_104.pdf

² O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 11-sentyabrdagi PF-158-son ““O‘zbekiston — 2030” strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni

yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni, 2019 yil 22 avgustdagi PQ-4422-son "Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to'g'risida", 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-son "Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. «Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligi rivojlanishi»ning ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarildi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Kremniy sirtida $A^{III}B^V$ binar birikmalarni, hususan GaSb binar birikmali qatlamni epitatsial o'stirish, Si sirtida GaSb nanokristallarini ion-implantatsiya usulida shakllantirish, yarimo'tkazgichlarda binar bog'lanishlarni hosil bo'lish shartlari va ularning matematik fizik modellarini ishlab chiqishga bir qator taniqli xorijiy olimlar katta xissa qo'shganlar. Jumladan Bei Shi, Jonathan Klamkin, Eric Tournié, Laura Monge-Bartolome, K. Madiomanana, Dmitry L. Goroshko, H. Toyota, T. Endoh, T. Todo, Y.K. Su, K.S. Napolskiy, A.V. Bulgakov, O.N. Koroleva, Rakesh Kumar Pandey³ va boshqalar.

Yarimo'tkazgichlarga kirishma atomlarini diffuziya texnologiyasi yordamida kiritish hamda yarimo'tkazgich materialning asosiy xossalarini boshqarishga O'zbekistonning taniqli olimlarining ilmiy ishlari bag'ishlangan. Bulardan R.A. Muminov, M.S. Saidov, M.K. Baxodirxanov, A.T. Mamadalimov, S.Z. Zaynabidinov, N.A. Sultanov, N.Yuldashev. Olib borilgan ilmiy tadqiqotlar natijasida yadro nurlarini o'lchovchi — yarimo'tkazgich detektorlari, lazerlar, quyosh nurini elektr energiyasiga aylantiruvchi asbob-uskunalarni ishlab chiqarish yo'lga qo'yilgan.

Shu bilan birga yuqoridagi olimlarning ishlarida, AIII B^V binar birikmalarni shakllantirishda asosan ion-inplantatsiya, molekulyar nurli epitaksiya, suyuq fazali epitaksiya kabi qimmat qurilmalarni talab qiladigan usullardan foydalanishgan. Diffuzion texnologiya asosida kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida GaSb binar birikmasini shakllantirish, shakllantirishning maqbul termodinamik sharoitlari va

³ Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xalqaro ilmiy tadqiqotlar sharhi quyidagi manbalar asosida amalga oshirildi: Keh Yung Cheng. III-V birikmali yarimo'tkazgichlar va qurilmalar asoslariga kirish. Springer xalqaro nashriyoti. Springer - 2020.; Burcu Arpapay, Y Eren Suyolcu, Gulcan Çorapçioğlu, Peter A van Aken, Mehmet Ali Gülgün and Ugur Serincan. Nominal va vicinal Si (100) tagliklarda molekulyar nur epitaksisi orqali o'stirilgan GaSb epiqatlamlari bo'yicha qiyosiy tadqiqot. Semicond. Sci. Technol. - 2020. – 12b.; Monzur-Ul-Akhir A.A.Md., Masayuki Mori, and Koichi Maezawa. Si(111) da past haroratda o'stirilgan GaSb plyonkalariga oqim nisbatining ta'siri. 2019 Informatika, elektronika va ko'rish bo'yicha 8-xalqaro konferentsiya (ICIEV) va Tasvirlash, ko'rish va chizmani aniqlash bo'yicha 3-xalqaro qo'shma konferentsiya (IVPR), - 2019, 312-317b. va boshqalar.

tarkibida $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$ tuzilma mavjud bo'lgan yangi materialning optik va fotoelektrik parametrlari hanuzgachacha o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi Toshkent davlat texnika universitetini "Raqamli elektronika va mikroelektronika" kafedrasidagi ilmiy tadqiqot rejasining OT-F2-50 raqamli «Kremniy panjarasida $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ va $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ yarimo'tkazgich birikmalarining elementar yacheykalari shakllanishining ilmiy asoslarini ishlab chiqish – fotoenergetika va fotonika uchun istiqbolli materiallar olishdagi yangi yondashuv» (2017-2020 yy.) mavzusidagi va OT-F2-55 "Yangi funktsional imkoniyatlarga ega nanomateriallarning yangi sinfi sifatidagi kirishma atomlari nanoklasterlarining shakllanishi negizida hajmiy strukturalashgan kremniy olishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish" (2017–2020 y.) mavzusidagi fundamental loyihalar doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi. Ushbu dissertatsiya ishi tadqiqotlarining maqsadi kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni hosil qilish va ularni kremniyning optik xossalariga ta'sirini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari. Ushbu dissertatsiya ishi tadqiqotining vazifalari etib quyidagilar belgilangan:

kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni hosil qilishning matematik hamda komputer modellarini yaratish;

kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni hosil qilishning maqbul termodinamik sharoitlarini aniqlash;

Ga, Sb elementlarini kirishma sifatida tabiatini hisobga olgan holda kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni hosil qilish;

kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni shakllanishi va taqsimlanishining shartlarini aniqlash;

$(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarga ega kremniyning optik va fotoelektrik xossalarini o'rganish;

shakllangan $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali yangi tuzilmaning panjara parametrlari hamda taqiqlangan soha energiyasini o'rganish.

Tadqiqotning ob'ekti sifatida elektronika sanoatida foydalanilgan KEF-1; KEF-4,5; KEF-100; KDB-0,5 (fosfor va bor konstentrastiyasi mos ravishda $N_p \approx 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $N_p \approx 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $N_p \approx 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; va $N_B = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) markali kremniy monokristallari tanlab olindi. Qorishma elementi sifatida Ga va Sb elementlari tanlab olingan.

Tadqiqotning predmeti. Kremniyning kristall panjara xossalariga $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ ko'rinishidagi qattiq qorishmali tuzilmaning ta'sir qilishi va uning optik xususiyatini o'zgartirishi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida kremniyga kirishmalarni kiritishda diffuziya usulidan foydalanilgan, namuna parametrlarini aniqlashda, Holl effekti, Bregg-Vulf, Tauk va Kubelka–Munk kabi usullardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni hosil bo'lishining maqbul termodinamik sharoitlari skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida aniqlangan;

ilk bor diffuziya usuli yordamida, Ga va Sb kirishma atomlari ishtirokida kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni hosil bo'lishi Raman spektroskopiyasi yordamida ko'rsatilgan;

kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida hosil bo'lgan $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali yangi tuzilma Si–0.44 va (GaSb)–0.56 ulushga (ya'ni $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$) ega ekanligi optik nurlarni akslanishini tahlili asosida aniqlangan;

$\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ qattiq qorishmali tuzilmaning kristall panjara parametrlari, miller indeksi (111) yo'nalishda, kristall panjara doimiysi $a_{\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}} = 5.67 \text{ \AA}$ kremniyning kristall panjara doimiysi (5,43 Å)dan ~4,4% katta ekanligi rentgen nurlarini difraksiyasi usuli yordamida aniqlangan;

$\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ qattiq qorishmali tuzilmani taqiqlangan soha energiyasi $E_{g,\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}} = 0.896 \text{ eV}$, kremniyning taqiqlangan soha energiyasidan 20% kichik ekanligi Vegard qonuni asosida aniqlangan;

diffuziya usulida Ga va Sb kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning fotoelektrik sezgirligi yorug'lik nurining infraqizil sohasi tomonga siljishi infraqizil spektroskopiya bilan aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarini olish texnologiyasi ishlab chiqilgan;

kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni hosil qilish bilan uning optik xususiyatlarini o'zgartirish mumkinligi ko'rsatildi. Natijada quyosh spektrini kengroq sohasini qamrab olish imkoniyati ko'rsatilgan;

diffuziya usuli yordamida kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida Ga va Sb atomlari ishtirokida p - n o'tish olingan va uning spektral sezgirligi infraqizil tomonga kengayishi aniqlangan.

Olingan natijalarning ishonchliligi ma'lumotlarni o'lchash va ishlov berishda bir biriga bog'liq bo'lmagan usullar majmuasidan foydalanilgan, hamda, kremniyda shakllangan $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ tuzilmalarning holatini skanerlovchi elektron mikroskop, kukunli rentgen difraktometr, rentgen spektral tahlil, UV-VIS-IR spektrofotometr va Raman mikroskop yordamida o'rganilganligi bilan ta'minlandi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundaki, kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni hosil qilish mumkinligi ko'rsatildi. Natijada kremniyning optik parametrlarida o'zgarish bo'lishi aniqlandi va bu jarayon kremniy kristall panjara parametrlarining o'zgarishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijasining amaliy ahamiyati kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni shakllantirishning maqbul texnologiyasi ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

Kremniyda GaSb binar birikmalarini hosil qilish bilan yangi material olish va fotoelementlarning spektral sezgirlik sohasini kengaytirish asosida:

Kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni shakllantirish texnologiyasi «FOTON» akstiyadorlik jamiyatida tranzistorlarni ishlab chiqarishga joriy etildi (“O‘zeltexsanoat” uyushmasining 2023 yil 07 dekabrda 04-3/1703 sonli ma’lumotnomasi). Natijada tarkibida $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ qattiq qorishmali tuzilmalar mavjud kremniydan yasalgan tranzistorlarning, ishlash tezligi tarkibida $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ qattiq qorishmali tuzilmalar mavjud bo‘lmagan kremniyga nisbatan tezkorligi 1,5 marotabaga oshishiga olib kelgan.

Kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ qattiq qorishmali tuzilmalarni shakllantirish texnologiyasi «FOTON» akstiyadorlik jamiyatida quyosh elementlarini ishlab chiqarishga joriy etildi (“O‘zeltexsanoat” uyushmasining 2023 yil 07 dekabrda 04-3/1703 sonli ma’lumotnomasi). Natijada tarkibida $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$ qattiq qorishmali tuzilmalar mavjud kremniy asosida yasalgan quyosh elementining samadorligini boshlang‘ichiga nisbatan 3,7 % gacha oshirilgan.

Kirishma atomlarini kremniydagi taqsimotini MathCad dasturi yordamida yaratilgan matematik modelidan Qarshi davlat universitetida 2019-2021 yillarda bajarilgan “Qarshi davlat universiteti va Qashqadaryo viloyatidagi ishlab chiqarish korxonalarini o‘rtasida talabalarni o‘qitish sifatini yaxshilashga qaratilgan munosabatlarni mustahkamlash” mavzusidagi loyihani bajarish doirasida, foydalanilgan (Qarshi davlat universitetining 2024 yil 10 yanvarda 04/60 sonli ma’lumotnomasi). Natijada diffuziya jarayonini matematik modellash bo‘yicha talabalarda ko‘nikmalarni shakllanishiga erishilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobastiyasi Dissertatsiya ishini bajarishda olingan asosiy ilmiy natijalar 9 ta xalqaro, 5 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda ma’ruza qilingan va muhokamadan o‘tgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 24 ta ilmiy ish chop etilgan bulardan 2 tasi O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, 2 tasi Scopus bazasida indexlangan jurnallarda, 3 tasi yuqori Impact Factorga ega xalqaro ilmiy jurnallarda nashr etilgan. Bundan tashqari 1 ta dasturiy vositaga guvohnoma (DGU) olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishi kirish, uchta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan va ilovalardan iborat bo‘lib, 56 ta rasm, 18 ta jadvalni o‘z ichiga olgan holda 114 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertasiyaning «**Kirish**» qismida mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yoʻnalishlariga mosligi koʻrsatilgan, muammoning oʻrganilganlik darajasi ochib berilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari, obykti, predmeti va metodlari keltirilgan, ishning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, ishning aprobatsiyasi, nashr etilgan ilmiy ishlar, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi haqida qisqacha maʼlumotlar keltirilgan.

Dissertasiyaning «**Kremniy sirtida III-V tipidagi binar birikmali qatlamlarni shakllantirish**» deb nomlangan birinchi bobning 1.1-§ boʻlimida kremniy tagligida III-V binar birikmali qatlamlarni olishning zamonaviy muammolari va ularning yechimlari, 1.2-§ boʻlimida kremniy tagligida III-V binar birikmali qatlamlarni olish usullari, 1.3-§ boʻlimida ushbu qatlamlarni qayd etish va oʻrganish usullari tahlil qilingan. 1.4-§ boʻlimda Ga va Sb atomlarining birikma hosil qilish xususiyatlari, 1.5-§ boʻlimda Ga va Sb atomlarini Si da birikma hosil qilish shartlari, 1.6-§ boʻlimda Ga va Sb atomlarining birikish termodinamikasi tadqiq qilingan.

Adabiyotlar tahlillaridan kelib chiqib, dissertatsiya ishini bajarish vazifalari shakllantirilgan.

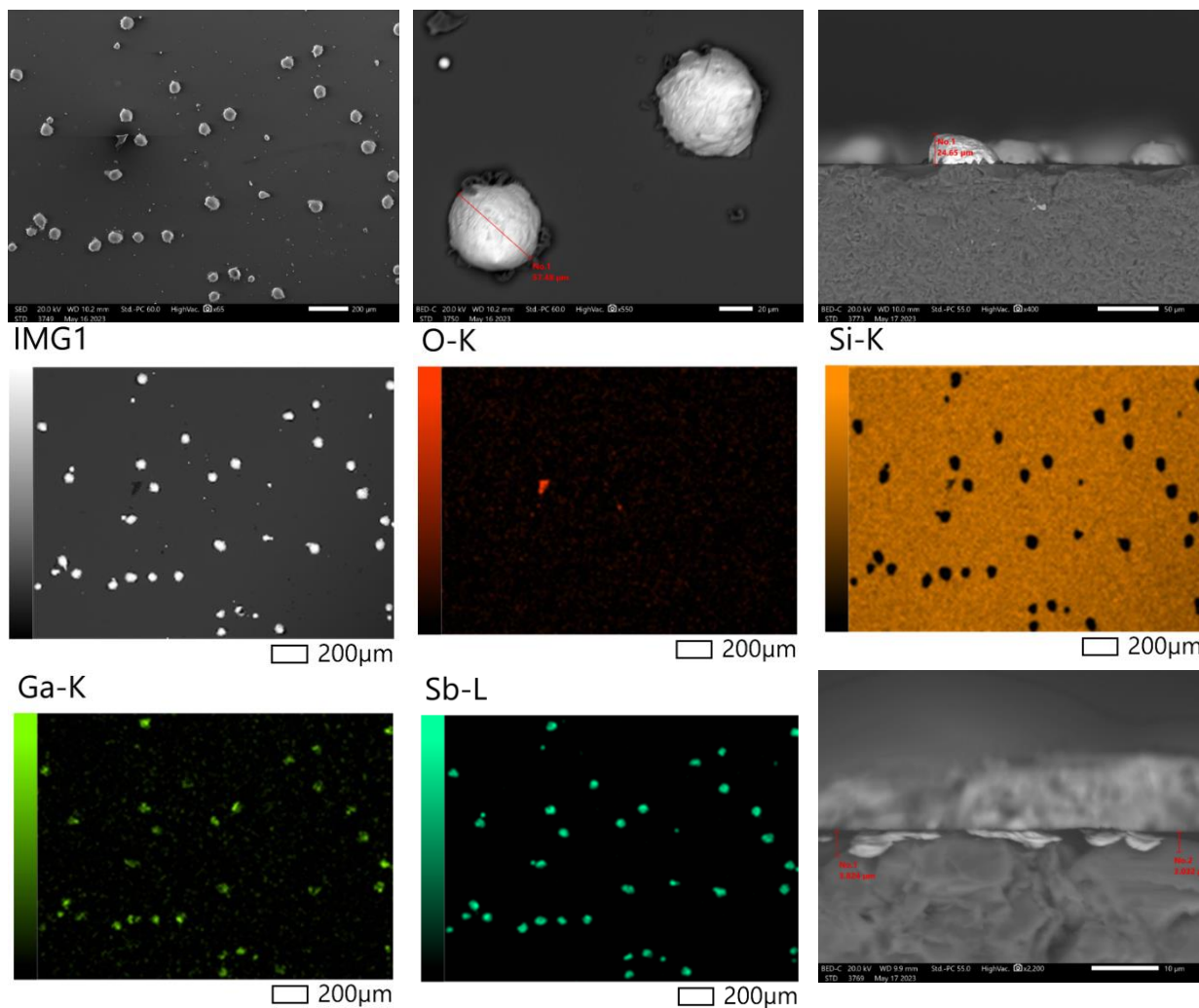
Dissertasiyaning «**(Si)_{1-x}(GaSb)_x tuzilmali kremniy namunalari olish texnologiyasi**» deb nomlangan ikkinchi bobi beshta boʻlimdan tashkil topgan boʻlib, 2.1-§ boʻlimda tajriba uchun tanlab olingan kremniy namunalari parametrlari va namunalarga mehanik hamda kimyoviy ishlov berish haqida soʻz boradi yaʼni namunalarni diffuziya jarayoniga tayyoshlash ketma-ketligi yoritib berilgan. 2.2-§ boʻlimda Ga va Sb atomlarining kremniydagi diffusion parametrlari hamda kremniyda GaSb binar birikmalarni hosil qilishning diffuziya texnologiyasi haqida soʻz yuritiladi. 2.3-§ boʻlimda kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida (Si)_{1-x}(GaSb)_x tuzilmalarni hosil qilish uchun, diffuziya texnologiyasini moslashtirish, 2.4-§ boʻlimda (Si)_{1-x}(GaSb)_x tuzilmalar hosil qilingan namunalarga termik ishlov berish haqida soʻz boradi. 2.5-§ boʻlimda kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida (Si)_{1-x}(GaSb)_x tuzilmalarni hosil qilishning maqbul texnologiyasi aniqlangan.

Maʼlumki kremniyning erish harorati $T=1414$ °C ga teng, $T=1300$ °C haroratdan kremniyning atomlari kuchli bugʻlanishni boshlaydi, $T=1000$ °C dan past haroratlarda Ga va Sb kirishma atomlarining kremniydagi diffuziya koeffitsienti juda kichikligi sababli $1000\div 1250$ °C haroratlar oraligʻida barcha tajribalar amalga oshirilgan.

Diffuziyaning $1000\div 1100$ °C harorat oraligʻida Ga va Sb kirishma atomlari birikma hosil qilmadi. Bunga sabab Ga va Sb kirishmalarning bugʻlangan atomlari yetarlicha bugʻ bosimini hosil qilmagan.

1-rasmda $T=1100$ °C haroratda 10 soat vaqt davomida Ga va Sb kirishma atomlari bilan bir vaqtda ligerlangan kremniy namunasi sirtining SEM tasviri keltirilgan.

1-rasmdan ko‘rinib turibdiki Ga va Sb kirishma atomlari kremniy sirtida birikma hosil qilgan. Bunda $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda Ga va Sb kirishmalarning bug‘langan atomlari yetarli darajada bug‘ bosimini hosil qilgan hamda, Ga va Sb kirishma atomlari birikib GaSb binar birikmali orolchalar shakllangan. Bundan tashqari shakllangan GaSb orolchalarning o‘lchamlari deyarli bir xil ($\sim 50\text{ }\mu$). Shuning uchun mazkur harorat GaSb binar birikmalar shakllanishi uchun eng maqbul harorat ekanligi aniqlandi.

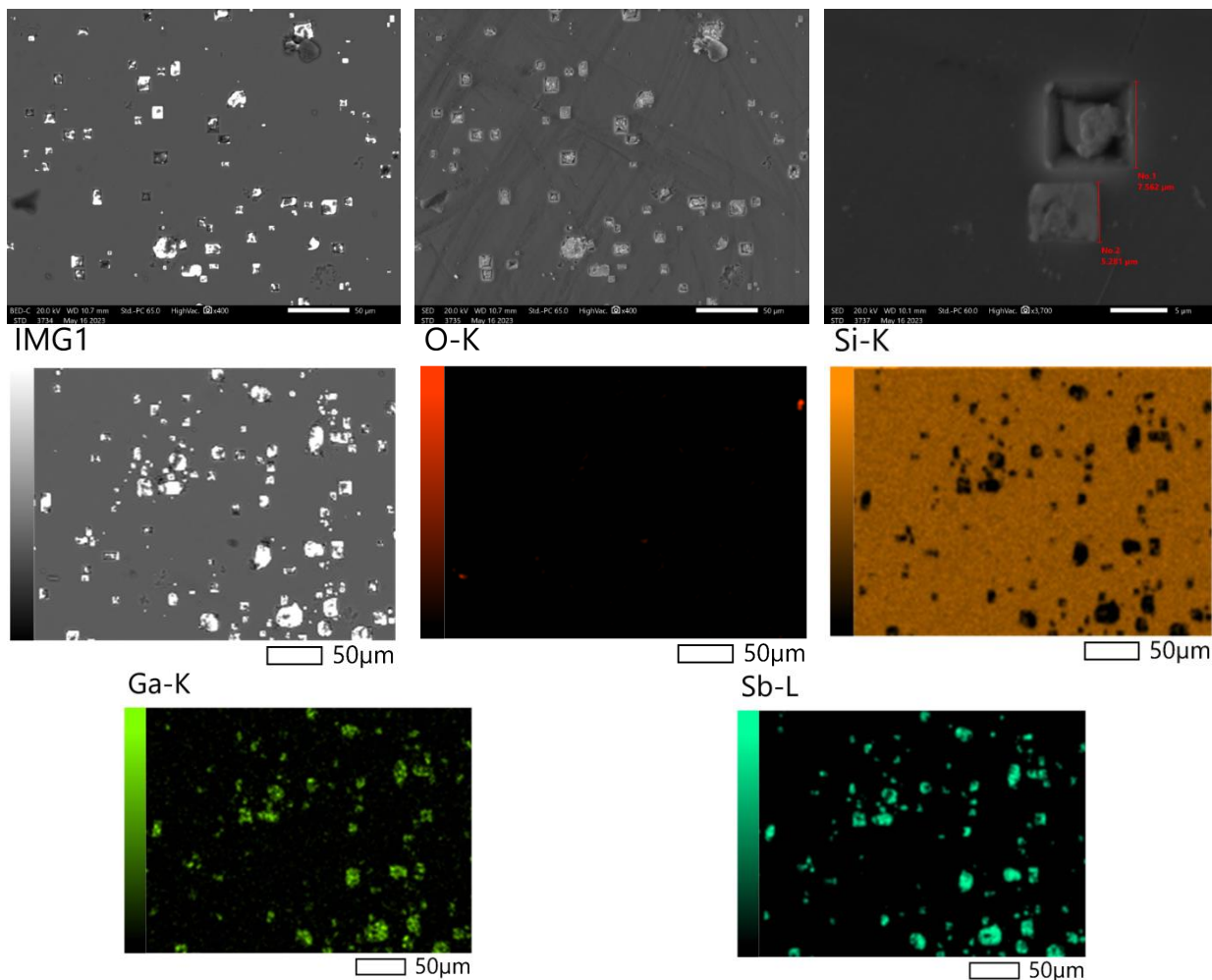


1-rasm. $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda 10 soat vaqt davomida Ga va Sb kirishma atomlari bilan bir vaqtda ligerlangan kremniy namunasi sirtining SEM tasviri

2-rasmda $T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda 10 soat vaqt davomida Ga va Sb kirishma atomlari bilan bir vaqtda ligerlangan kremniy namunasi sirtining SEM tasviri keltirilgan.

2-rasmdan ko‘rinib turibdiki Ga va Sb kirishma atomlari kremniy sirtida birikma hosil qilgan. Bunda $T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda Ga va Sb kirishmalarning bug‘langan atomlari yetarli darajada bug‘ bosimini hosil qilgan hamda, Ga va Sb kirishma atomlari birikib GaSb binar birikmali orolchalar shakllangan. Lekin shakllangan GaSb orolchalarning o‘lchamlari turli xil ($\sim 1\div 30\text{ }\mu$).

Diffuziyaning 1200÷1250 °C harorat oralig‘ida Ga va Sb kirishma atomlari birikma hosil qiladi, lekin GaSb binar birikmali orolchalari juda kichik o‘lchamlarda shakllanadi. Bunda Ga va Sb kirishmalarning ushbu haroratlarda kremniydagi diffuziya koeffitsientlarini kattaligi sababli kirishma atomlari kremniy kristall hajmiga singib ketadi.



2-rasm. T=1200 °C haroratda 10 soat vaqt davomida Ga va Sb kirishma atomlari bilan bir vaqtda ligerlangan kremniy namunasi sirtining SEM tasviri

1-jadvalda $T=1000, 1100, 1200$ va 1250 °C haroratlarda Ga va Sb kirishma atomlarini kremniyga diffuziya qilish natijasida GaSb binar birikmali orolchalarni shakllanishi haqidagi ma’lumotlar keltirilgan.

1-jadval. GaSb binar birikmalari o‘lchamlarini diffuziya haroratiga bog‘liqligi.

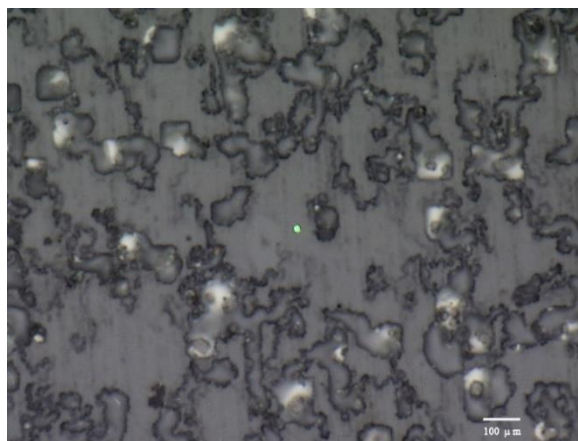
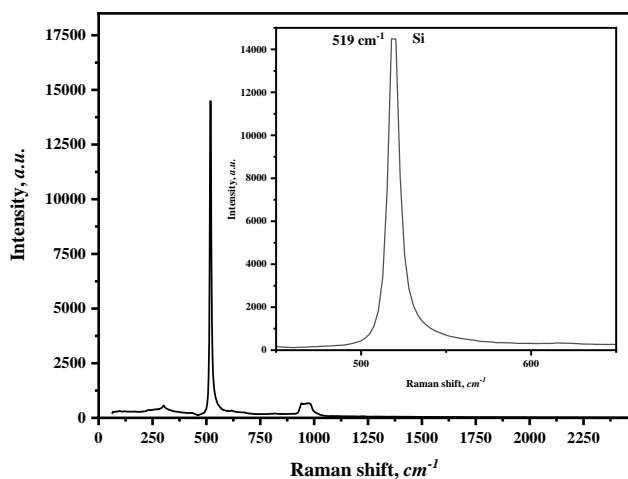
	T=1000 °C	T=1100 °C	T=1200 °C	T=1250 °C
GaSb binar birikmalari shakllanganligi	Shakllanmagan	Shakllangan		
GaSb binar birikmasining o‘lchami	–	o‘lchamlari deyarli bir xil	o‘lchamlari turli xil	o‘lchamlari turli xil va juda kichik
	–	~50 μm	~1÷30 μm	~0.1÷5 μm

Dissertasiyaning « $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ tuzilmali kremniyning optik, fotoelektrik va spektroskopik xossalari» deb nomlangan uchinchi bobi 7 ta bo‘limdan iborat bo‘lib, 3.1-§ bo‘limida Ga va Sb kirishma atomlari bilan ligirlangan kremniy namunasi birikmalarni aniqlashning Raman usuli yordamida, 3.2-§ bo‘limda GaSb binar birikmali kremniyning optik xossalari tadqiq qilingan. 3.3-§ GaSb binar birikmali kremniyning XRD tahlili, 3.4-§ bo‘limda GaSb binar birikmali kremniyning element tahlili, 3.5-§ bo‘limda $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ tuzilmali kremniyning fotoelektrik xossalari, o‘rganilgan. 3.6-§ bo‘limda $(\text{Si})_{0.5}(\text{GaSb})_{0.5}$ tuzilmani kristall panjarasi hamda elektronlarning energetik sathlar tuzilishini komputer dasturlari yordamida modellashtirish ko‘rib chiqilgan. 3.7-§ bo‘limda $(\text{Si})_{0.5}(\text{GaSb})_{0.5}$ tuzilmali yarimo‘tkazgichning kelajakdagi istiqbollari ochib berilgan.

3 – b, e, g rasmlarda Ga va Sb kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunasi sirtinining ko‘rinishi keltirilgan bo‘lib, to‘lqin uzunligi 532 nm quvvati 20mWatt bo‘lgan lazer nuri tushgan joylari ham tasvirlangan. Rasmlardan ko‘rinib turibdiki, namuna yuzasida kulrang, uning ustida oq orolchalar va qora yopiq egri chiziqlar mavjud. Shu uch xil bir biridan farq qiluvchi sohalar lazer nurini tushirish orqali Raman tahlili olindi. Har bir tanlangan nuqtani, Raman spektrining grafik ko‘rinishi mos ravishda 3 – a, d, f rasmlarda keltirilgan.

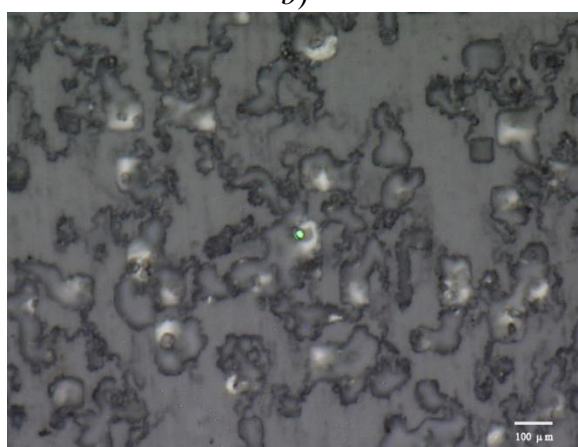
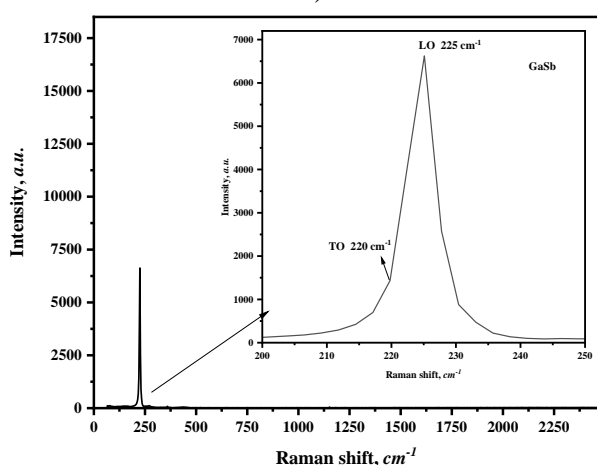
3 – a rasmda asosiy kulrang maydondan olingan Raman spektrining tahlili shuni ko‘rsatdiki, 519 cm^{-1} da intensivligi juda yuqori bo‘lgan (Intensity=15000 a.u.) bitta cho‘qqi aniqlandi. Bu cho‘qqi Si ga tegishli ekanligi adabiyotlardan o‘z tasdig‘ini topdi. 3 - d rasmda esa oq orolchalarning birini ustidan olingan spektr keltirilgan. Rasmdan ko‘rinib turibdiki, spektrda 225 cm^{-1} da (Intensity=7000 a.u.) bitta cho‘qqi aniqlandi va bu cho‘qqi GaSb (LO) kristalliga tegishli ekan. 3 – f rasmda qora chiziqning ustidan olingan spektr keltirilgan bo‘lib, bu holatda 2 ta bir biridan farqli cho‘qqilar olindi. Cho‘qqilarning qiymatlarini adabiyotlarda keltirilgan ma’lumotlar bilan solishtirilganda, $222,1 \text{ cm}^{-1}$ GaSb ga va 519 cm^{-1} cho‘qqi esa Si ga tegishli ekanligi aniqlandi. Oxirgi olingan natijalardan qora yopiq egri chiziqli sohani $\text{Si}(\text{GaSb})$ tarkibli kristal deb aytishimiz mumkin.

4-rasmda 3 ta $E_1=0.72 \text{ eV}$, $E_2=0.896 \text{ eV}$ va $E_3=1.02 \text{ eV}$ energiya qiymatlari aniqlandi. E_1 energiya GaSb yarimo‘tkazgich materialining taqiqlangan soha energiyasi, E_2 hamda E_3 energiyalar $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$ xosil bo‘lgan materialga tegishli taqiqlangan soha energiyasi. Vegard qonunini teskari hisoblash yordamida Si va GaSb moddalarning miqdoriy ulushini aniqlaymiz. $E_2=0.892 \text{ eV}$ ni $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$ materialining E_g , energiyasi deb faraz qilsak, uholda buni quyidagicha hisoblaymiz.



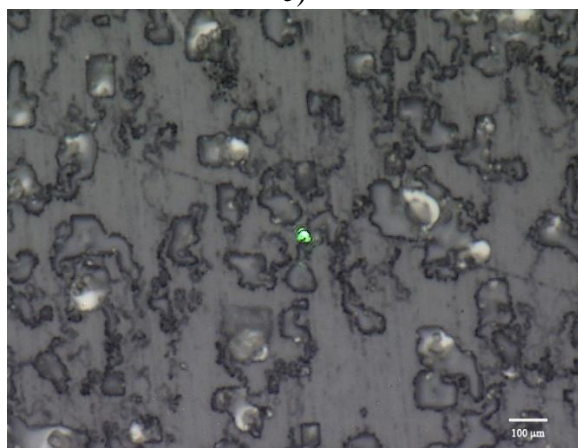
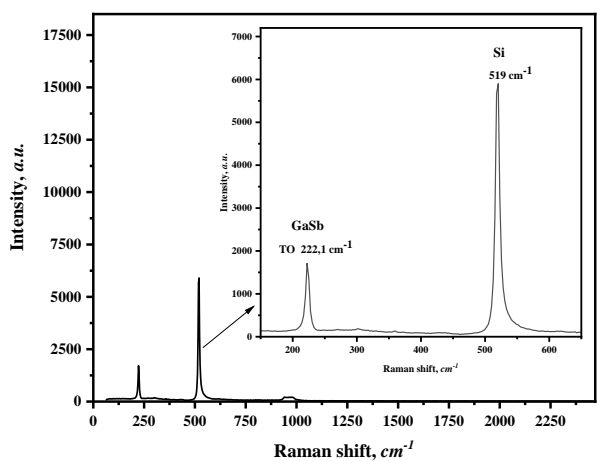
a)

b)



d)

e)



f)

g)

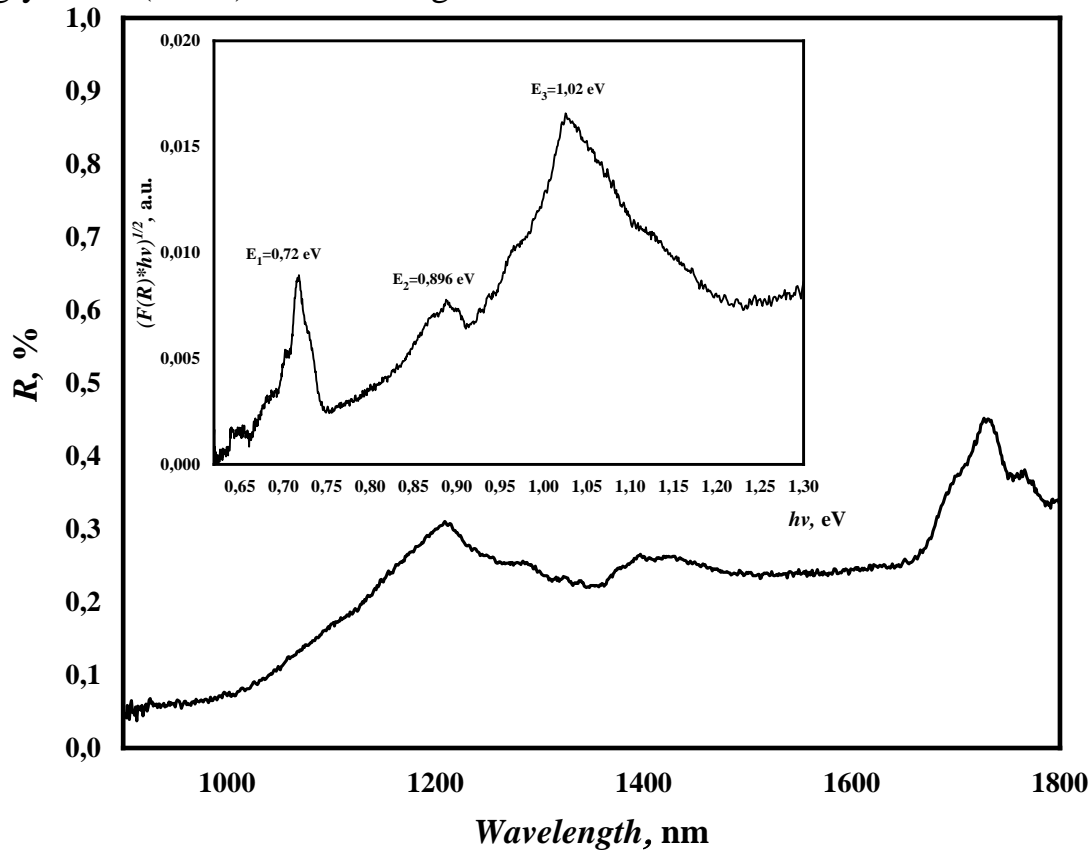
3-rasm. Ga va Sb kirishma atomlari bilan ligerlangan Si namuna yuza qismining Raman spektri va tasviri

$$E_{g, Si_{(1-x)}(GaSb)_x} = (1-x) \cdot E_{g, Si} + x \cdot E_{g, GaSb}$$

bu tenglamaga E_2 , $E_{g, Si}$, $E_{g, GaSb}$ energiya qiymatlarini qo‘ysak, u holda quyidagi bitta noma‘lumlik chiziqli tenglama hosil bo‘ladi.

$$0.896 = (1 - x) \cdot 1.12 + x \cdot 0.726$$

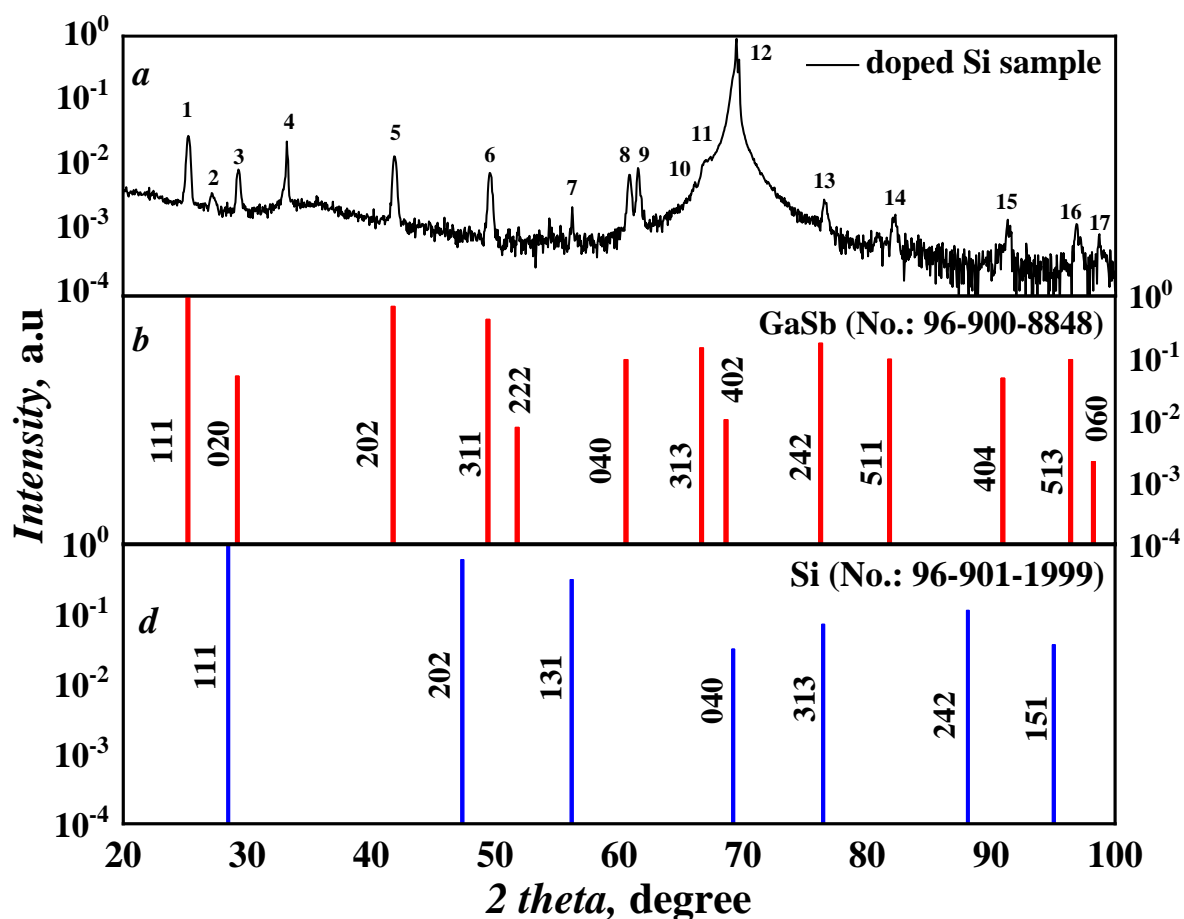
Bu tenglamadan $x=0.56$ ekanligi aniqlandi. Demak E_2 energiya $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ yangi shakllangan strukturaga tegishli deyishimiz mumkin. Xuddi shunday E_3 energiya $\text{Si}_{0.75}(\text{GaSb})_{0.25}$ strukturaga mos keladi.



4-rasm. Ga va Sb atomlari bilan ligerlangan Si namunasining nur qaytarish tavsifi.

5-rasmda Ga va Sb atomlari diffuziya usulida kiritilgan Si namunaning XRD spektri kristallografik ma'lumotlar bazasi COD dan olingan qiymatlar bilan solishtirilgan holatda tasvirlangan. Diffuziyadan so'ng Si sirtidan qaytgan rentgen nurlari hosil qilgan spektrdan 17 ta asosiy cho'qqilar belgilab olindi (5-a rasm). Olingan cho'qqilarni aniqlash maqsadida xalqaro ochiq kristallografik ma'lumotlar bazasidan GaSb va Si materiallari uchun 2θ burchakga mos keluvchi chiziqlar ustma-ust qo'yildi (5-b,d rasmlar). Si sirtida GaSb hosil bo'lganligi haqidagi ma'lumot 25.25, 29.35, 41.89, 49.58, 60.78, 66.05, 67.5, 76.55, 82.25, 91.32, 96.82, 98.71 cho'qqilarda aks etgan bo'lib, mos ravishda (111), (020), (202), (311), (040), (313), (402), (242), (511), (404), (513), (060) kristall tekisliklariga to'g'ri keladi. 5-a rasmdagi umumiy spektrda albatta Si ga tegishli cho'qqilar 56.23, 69.41, 76.55 mavjud bo'lib, mos ravishda (131), (040), (313) tekisliklarga to'g'ri keladi. Cho'qqilar tahlili shuni ko'rsatdiki, GaSb ga ham, Si ga ham tegishli bo'lmagan No2, No9 cho'qqilar hosil bo'lgan. Mazkur cho'qqilarni kristall panjara parametrlarini aniqlandi.

Ma'lumki GaSb va Si monokristallarining kristall panjara doimiysi mos ravishda $a=6.09 \text{ \AA}$, $a=5.34 \text{ \AA}$ ga teng.



5-rasm. Namunalarni XRD taxlili: *a* – Ga va Sb kirishma atomlari bilan legirlangan Si namunasi; *b* va *d* – COD (Crystallography Open Database) No: 96-900-8848 va No: 96-901-1999 raqamli ma’lumotlar bazasidan olingan mos ravishda GaSb va Si yarimo‘tkazgichlarning kristall ma’lumotlari.

5-*b* rasmdagi GaSb (242) hamda 5-*d* rasmdagi Si (313) cho‘qqilar ustma-ust tushgan. P. Paulraj va R. Harichandranlarning ishida No4 cho‘qqi SiC (101) ga tegishli ekanligi ko‘rsatilgan. Lekin No2, No9 cho‘qqilar mos ravishda GaSb $2\theta=25.25$ (111) va Si $2\theta=28.45$ (111) hamda GaSb $2\theta=60.51$ (040) va Si $2\theta=69.25$ (040) cho‘qqilarini orasida joylashganligi uchun, hosil bo‘lgan $Si_{1-x}(GaSb)_x$ yangi tuzilmani, No2 cho‘qqi (111) yo‘nalishiga, No9 cho‘qqi (040) yo‘nalishga tegishli deb aytish mumkin. Ushbu natijalar yordamida Si va uning sirtida shakllangan GaSb binar birikmasining panjara doimiysi (*a*) va difraksion panjara doimiysi (d_{hkl}) mos ravishda quyidagi 1 va 2 ifodalar orqali hisoblandi (2-jadval):

$$a = d_{hkl} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

$$d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad (2)$$

bu yerda θ Bragg burchagi va $\lambda=0.15402$ nm (Cu - α ning to‘lqin uzunligi).

Diffuziya uchun tayyorlangan kremniy namunalarni 2 guruhga ajratildi, I guruh namunalarga bir vaqtning o‘zida Ga va Sb kirishma atomlari diffuziya qilindi. II guruh namunalari kirishmalarsiz qizdirildi. 6 va 7-rasmlarda mazkur namunalarning sirtining element tahlili va sirt morfologiyasi keltirilgan.

6-a rasmdan ko‘rinib turibdiki, I-guruhdagi namuna sirtida tartibsiz ravishda oq dog‘lar shakllangan, II-guruhdagi namuna sirtida esa bunday dog‘lar mavjud emas (6-b) rasimga qarang). 6-a rasmda 3 ta spektrlar tahlil qilindi: 11-spektr, (6-a, rasmda ko‘rinib turgan oq chizikli maydon bo‘yicha element tahlil 6-d rasmda keltirilgan); 12-spektr (6-a rasmdagi oq orolchalar shakllanmagan nuqtaning element tarkibi 7-a rasmda keltirilgan), 13-spektr (6-a rasmdagi oq orolchalarning birini element tarkibi 7-b rasmda keltirilgan).

11-spektrda Si (shartli konsentratsiya 0.9 ga teng (3-jadvalga qarang)), Ga (shartli konsentratsiya 0.08 ga teng), Sb (shartli konsentratsiya 0.04 ga teng), O (shartli konsentratsiya 0.03 ga teng), C (shartli konsentratsiya 0.02 ga teng) elementlari aniqlandi.

12-spektrda faqatgina Si (shartli konsentratsiya 1.16 ga teng (3-jadvalga qarang)) elementi aniqlandi.

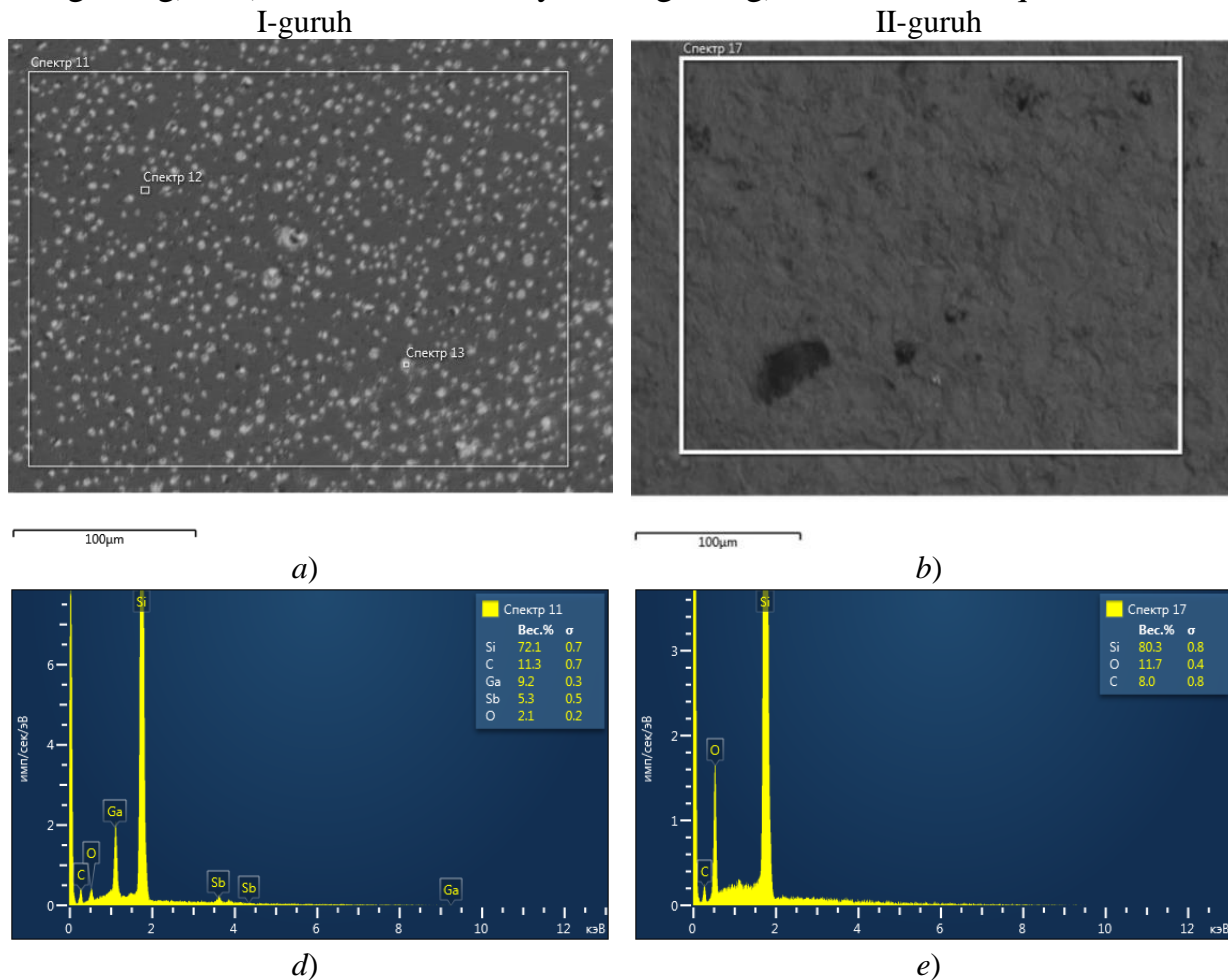
13-spektrda Si (shartli konsentratsiya 0.02 ga teng (3-jadvalga qarang)), Ga (shartli konsentratsiya 0.4 ga teng), Sb (shartli konsentratsiya 0.39 ga teng), O (shartli konsentratsiya 0.06 ga teng) elementlari aniqlandi.

2-jadval. 6-rasmdagi cho‘qqilar haqida ma’lumot

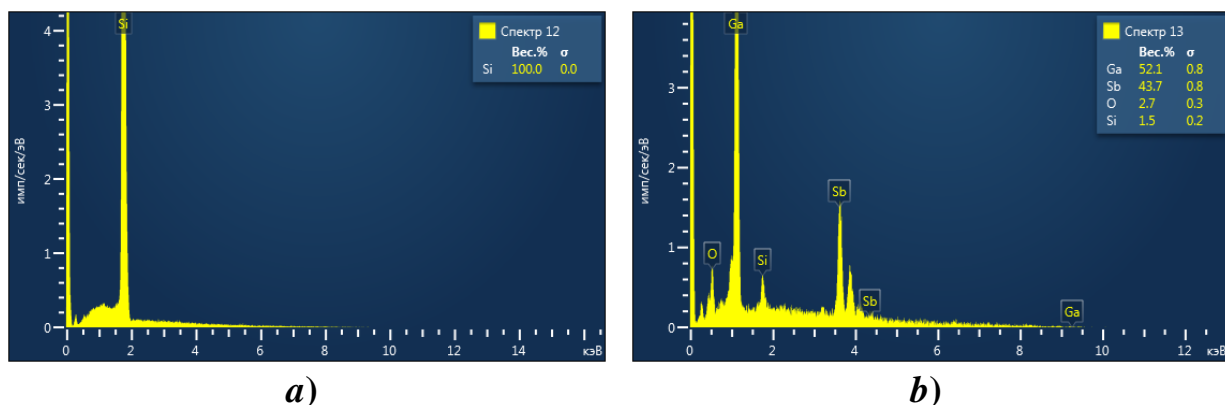
Kristall	Cho‘qqi No.	2 θ	h	k	l	$d_{hkl}, \overset{\circ}{\text{Å}}$	$a_{hkl}, \overset{\circ}{\text{Å}}$
GaSb	1	25,25	1	1	1	3,52	6,10
	3	29,35	0	2	0	3,04	6,08
	5	41,89	2	0	2	2,15	6,09
	6	49,58	3	1	1	1,84	6,09
	8	60,78	0	4	0	1,52	6,09
	10	66,05	3	1	3	1,41	6,16
	11	67,5	4	0	2	1,39	6,19
	13	76,55	2	4	2	1,24	6,09
	14	82,25	5	1	1	1,17	6,08
	15	91,32	4	0	4	1,08	6,09
	16	96,82	5	1	3	1,03	6,09
17	98,71	0	6	0	1,01	6,09	
Si	7	56,23	1	3	1	1,63	5,42
	12	69,41	0	4	0	1,35	5,41
	13	76,55	3	1	3	1,24	5,42
Si _{1-x} (GaSb) _x	2	27,19	1	1	1	3,28	5,67
	9	61,55	0	4	0	1,50	6,02

II-guruh namunasi sirtidagi oq chiziq bilan chegaralangan (7-b rasimga qarang) hududning element tarkibi 6-d rasmda keltirilgan (17-spektr).

17-spektrda Si (shartli konsentratsiya 0.97 ga teng), O (shartli konsentratsiya 0.16 ga teng), C (shartli konsentratsiya 0.01 ga teng) elementlari aniqlandi.



6-rasm. Namunalarni diffuziyadan so‘ng olingan SEM tahlili; a) I-guruh namunasi sirtining SEM tasviri; b) II-guruh namunasi sirtining SEM tasviri; d) I-guruh namunasi sirtining element tahlili; e) II-guruh namunasi sirtining element tahlili.



7-rasm. I-guruh namunasi sirtining lokal nuqtalaridan olingan elementar tahlil; a) 6, a-rasmdagi 12-spektrning element tahlili; b) 6, a-rasmdagi 13-spektrning element tahlili.

3-jadval. 6- va 7-rasmlardagi I va II guruh namunalaridan olingan element tahlili natijalari.

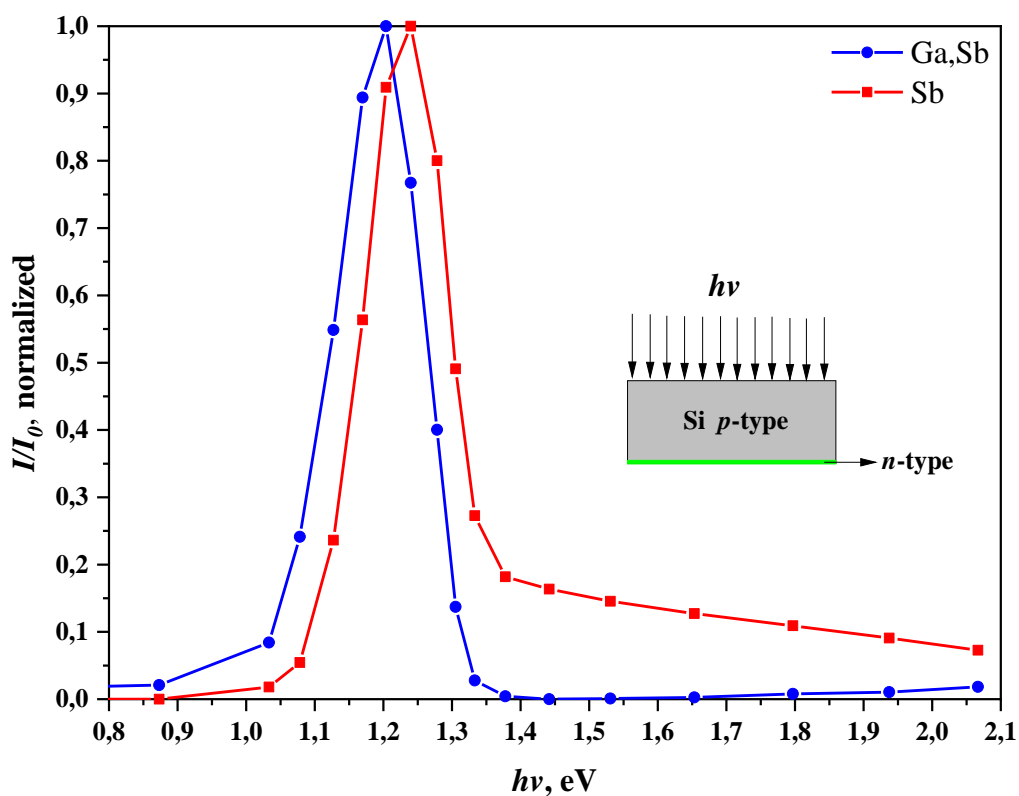
Element	Chiziq turi	Shartli kontsentratsiya	Og'irlik. %	Sigma Og'irlik. %
11-spectr				
C	K seriya	0.02	11.34	0.69
O	K seriya	0.03	2.12	0.24
Si	K seriya	0.90	72.12	0.74
Ga	L seriya	0.08	9.16	0.29
Sb	L seriya	0.04	5.26	0.50
Umumiy:			100.00	
12-spectr				
Si	K seriya	1.16	100.00	0.00
Umumiy:			100.00	
13-spectr				
O	K seriya	0.06	2.67	0.26
Si	K seriya	0.02	1.48	0.19
Ga	L seriya	0.40	52.14	0.82
Sb	L seriya	0.39	43.72	0.85
Umumiy:			100.00	
17-spectr				
C	K seriya	0.01	7.97	0.79
O	K seriya	0.16	11.71	0.39
Si	K seriya	0.97	80.32	0.78
Umumiy:			100.00	

Diffuziya uchun tayyorlangan kremniy namunalarini 2 guruhga ajratildi, I guruh namunalariga faqat Sb kirishma atomlari, II guruh namunalariga avval Ga so'ngra Sb kirishma atomlari diffuziya qilingan. Mazkur namunalarni fotoelektrik xossasi 8-rasmda tahlil qilingan.

I hamda II guruhlardagi namunalar diffuziyadan so'ng $T=600$ °C xaroratda qo'shimcha qizdirilgan.

8-rasmdagi grafiklardan ko'rinib turibdiki 1-guruhdagi namuna, ya'ni kremniyga faqat Sb kirishma atomlari ligirlangan namunaning fotoelektrik sezgirliги 1.0 eV dan boshlanib 1.24 eV energiyada o'zining maksimal qiymatiga erishgan. 2-guruhdagi namuna ya'ni kremniyga avval Ga so'ngra Sb kirishma atomlari kiritilgan namunaning fotoelektrik sezgirliги 0.87 eV dan boshlanib 1.2 eV energiyada o'zining maksimal qiymatiga erishgan. Bundan ko'rinib turibdiki Ga va

Sb kirishma atomlarining o‘zaro birikishi hisobiga kremniyning fotoelektrik sezgirligi infraqizil soha tomonga siljigan.



8-rasm. Namunadagi qisqa tutashuv tokini yorug‘lik energiyasiga bog‘liqlik grafigi. 1- va 2-guruhdagi namunalarni 600 °C xaroratda qo‘shimcha qizdirilgandan so‘ng olingan natijalari (barcha namunani p sohasiga (ya‘ni kirishma atomlari kiritilmagan sohasiga) yorug‘lik nuri tushilgan).

XULOSA

Dissertatsiya ishini bajarishda kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida yangi $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$ tuzilmalarni shakllantirish hamda mazkur tuzilmalarni kremniyning optik xossasiga ta'sirini tadqiq qilishda olingan natijalarni tahlil qilish natijasida quyidagi xulosalar qilindi:

1. Monokristall kremniyda GaSb binar birikmalarining shakllanish shartlari fizik-kimyoviy jihatdan ilmiy asoslangan.

2. $T=1100$ °C haroratda Ga va Sb kirishma atomlarini kremniyga diffuziya qilganda kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida GaSb binar birikmali orolchalar shakllanishining maqbul diffuziya harorati ekanligi aniqlandi va ushbu holat Ga va Sb kirishma atomlarining mazkur haroratdagi bug' bosimlari hamda kremniydagi diffuziya koeffitsientlari orqali tushuntirildi.

3. $T=1100$ °C haroratda kremniyga Ga va Sb kirishma atomlarini diffuziya qilganda kremniy sirtida o'lchamlari deyarli bir-xil (~ 50 μm) bo'lgan GaSb binar birikmali orolchalar shakllanishi aniqlandi.

4. $T=1200$ °C haroratda Ga va Sb kirishma atomlarini kremniyga diffuziya qilganda o'lchamlari turli xil (1-15 μm) bo'lgan GaSb binar birikmali orolchalar shakllanishi, mazkur orolchalarning kremniy sirtida tarqalish zichligi $\sim 10^6$ cm^{-2} ekanligi hamda GaSb orolchalari kremniy sirtidagi kislorod atomlarini yig'ish xususiyati aniqlandi.

5. $T=1200$ °C haroratda Ga va Sb kirishma atomlarini kremniyga diffuziya qilganda kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmalar shakllanishi ilk bor tajriba usulida aniqlandi.

6. Kremniy sirtida shakllantirilgan $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$ qattiq qorishmali tuzilmaning mol ulushlari $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ va $\text{Si}_{0.75}(\text{GaSb})_{0.25}$ ko'rinishida ekanligi tajriba natijalariga asoslanib nazariy hisoblab topildi.

7. Yangi shakllangan $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ va $\text{Si}_{0.75}(\text{GaSb})_{0.25}$ qattiq qorishmali tuzilmalarning taqiqlangan soha energiyasi (mos ravishda 0.896 eV va 1.02 eV) aniqlangan.

8. Kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida shakllangan yangi $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ qattiq qorishmali tuzilmaning kristall panjara doimiysi ($a=5.67$ Å) hamda kristallning o'sish yo'nalishi ($h,k,l=1,1,1$) aniqlangan.

9. Ga va Sb kirishma atomlari ketma-ket diffuziya qilingan kremniy namunasining spektral sezgirligi, namunalar $T=600$ °C haroratda qo'shimcha qizdirilganda yorug'lik nurining infraqizil sohasi tomonga siljishi, kremniy kristall panjarasida GaSb binar birikmalar shakllanganligi bilan tushuntirildi.

10. Kremniy sirtida va sirt oldi qatlamida GaSb binar birikmalarini hosil qilish uchun, Ga va Sb kirishma atomlarini bir vaqtda, kremniy hajmida GaSb binar birikmalarini shakllantirish uchun, Ga va Sb kirishma atomlarini ketma-ket diffuziya qilish usuli afzalligi aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК ПРИ ФЕРГАНСКОМ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ИСАКОВ БОБИР ОЛИМЖАНОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ НА ПОВЕРХНОСТИ
КРЕМНИЯ И В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Фергана - 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за №В2023.4.PhD/FM732.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.ispm.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Илиев Халмурат Миджитович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Нуриддинов Иззатилла
доктор физико-математических наук, профессор,
АН РУз, Институт ядерной физики, главный научный
Раджапов Сали Аширович
доктор физико-математических наук, профессор,
ФТИ АН РУз, Главный научный сотрудник
Самаркандский государственный университет
имени Ш. Рашидова

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «13» 07 2024 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, малый зал заседания).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке (ЦИР) института. (зарегистрирована за № 209) (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06).

Автореферат диссертации разослан «01» 07 2024 г.
(реестер протокола рассылки № 3 от «01» 07 2024 г.).



Н.Х. Юлдашев,
Председатель Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.м.н., профессор

Б.Ж. Ахмадалиев
Ученый секретарь Научного
совета по присуждению ученой
степени доктора философии, PhD ф.-
м.н., доцент

С.М. Отажонов
Председатель научного
семинара при Научном совете по
присуждению ученой степени доктора
философии, д.ф.м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации.

В мире особое внимание придается вопросам более масштабного использования солнечной энергии, экономии ископаемых топливно-энергетических ресурсов и рациональному использованию энергии Солнца в деле повышения энергоэффективности солнечных батарей. В настоящее время в развитых странах «...производство электроэнергии с использованием солнечной энергии составляет около 46% из общего объема произведенной альтернативными источниками энергии. В период 2025-2030 годов в обозначенном сценарии нулевых выбросов долю производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии планируется увеличить более чем на 60%»¹. В этой связи особое внимание уделяется открытию новых материалов, содержащих бинарные соединения III-V, свойства которых принципиально отличаются от свойств кремния, и разработке на их основе высокоэффективных солнечных элементов.

В исследовательских лабораториях по всему миру ведутся научные исследования, направленные на изменение физических свойств материала путем формирования на поверхности кремниевого материала бинарных соединений GaSb, изучению свойств подобного материала и разработки солнечных батарей, а также датчиков и лазеров, работающих в области инфракрасного излучения. В этом направлении приоритет отдается исследованиям в области легирования монокристалла кремния диффузионным методом с использованием в качестве исходных элементов Ga и Sb, определению оптимальных термодинамических условий образования бинарных соединений GaSb на поверхности Si, контролю оптических, электрофизических и фотоэлектрических свойств кремния, содержащего соединения GaSb, определению параметров кристаллической решетки нового материала со структурой $(Si)_{1-x}(GaSb)_x$, сформированного посредством создания бинарного соединения GaSb на поверхности Si. Вместе с этим, актуальными задачами являются управление шириной запрещенной зоны образца Si, на поверхности которого образуются бинарные соединения GaSb, а также разработка компьютерной модели структуры $Si_{0.5}GaSb_{0.5}$.

В нашей республике реализуются масштабные мероприятия по разработке новых технологий, способствующих повышению эффективности солнечных батарей и широкому использованию солнечной энергии. В стратегии «Узбекистан – 2030» обозначены важные задачи по «переходу к «Зеленой экономике» и резкому увеличению использования возобновляемых источников энергии, которые являются основой зеленой экономики»². При реализации этих задач, в частности, важным становится вопрос формирования бинарных соединений GaSb на поверхности кремния и в приповерхностном

¹ https://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2015_3_84_104.pdf

² Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года №ПФ-158 «О стратегии «Узбекистан – 2030»»

слое, повышение эффективности солнечных элементов на основе кремния с бинарными соединениями GaSb.

Научно-исследовательская работа в рамках данной диссертационной работы в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года, №УП-158 О Стратегии "Узбекистан – 2030", Указе Президента Республики Узбекистан от 28.01.2022 г., № УП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 — 2026 годы», Постановлении Президента Республики Узбекистан от 22.08.2019 г., № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», Постановлении Президента Республики Узбекистан от 10.07.2020 г., № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции путем повышения энергоэффективности экономики и задействования имеющихся ресурсов», а также а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан: III. «Энергетика, энергоресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Ряд известных зарубежных ученых внесли вклад в эпитаксиальный рост бинарных соединений A^{III}B^V, особенно слоя бинарного соединения GaSb на поверхности кремния, формирование нанокристаллов GaSb на поверхности Si методом ионной имплантации, условия формирования бинарных связей в полупроводниках и их математических и физических моделях. В том числе Бэй Ши, Джонатан Кламкин, Эрик Турнье, Лаура Монж-Бартоломе, К. Мадиманана, Дмитрий Л. Горощко, Х. Тойота, Т. Эндо, Т. Тодо, Ю.К. Су, К.С. Напольский, А.В. Булгаков, О.Н. Королева, Ракеш Кумар Пандей³ и другие.

Научные труды известных ученых Узбекистана посвящены внедрению атомов свинца в полупроводники с использованием диффузионной технологии и управлению основными свойствами полупроводникового

³ Обзор международных научных исследований по теме диссертации проводился исходя из следующих источников: Ке Юнг Ченг. Введение в основы соединений полупроводников и приборов III-V классов. Международное издательство Спрингер. Спрингер - 2020г.; Бурджу Арпапай, И. Эрен Суйолджу, Гюлькан Чорапчиоглу, Петер А. ван Акен, Мехмет Али Гюльгюн и Угур Серинкан. Сравнительное исследование слоев GaSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на номинальной и вицинальной подложках Si(100). Полусекундный. наук. Технол. - 2020г. – 12р.; Монзур-Уль-Ахир, доктор медицинских наук, Масаюки Мори и Коичи Маэзава. Влияние соотношения токов на пленки GaSb, выращенные при низкой температуре на Si(111). 2019 8-я Международная конференция по информатике, электронике и зрению (ICIEV) и 3-я Международная совместная конференция по визуализации, зрению и распознаванию образов (IVPR), - 2019, 312-317b. и другие.

материала. Из них Р.А. Муминов, М.С. Саидов, М.К. Баходирханов, А.Т. Мамадалимов, С.З. Зайнабидинов, Н.А. Султанов, Н. Юлдашев. В результате проведенных научных исследований налажено производство оборудования для измерения ядерного излучения – полупроводниковых детекторов, лазеров, преобразования солнечного света в электричество.

При этом в работах вышеуказанных ученых для формирования бинарных соединений А^{III}В^V в основном использовались методы, требующие дорогостоящих устройств, такие как ионная имплантация, молекулярно-лучевая эпитаксия и жидкофазная эпитаксия. Формирование бинарного соединения GaSb на поверхности и приповерхностном слое кремния на основе диффузионной технологии, оптимальные термодинамические условия формирования, а также оптические и фотоэлектрические параметры нового материала, содержащего структуру Si_{1-x}(GaSb)_x, пока не изучены.

Связь темы диссертации с научными исследованиями научно-исследовательской организации, где выполнена диссертационная работа.

Диссертационное исследование выполнено в Ташкентском государственном техническом университете на кафедре «Цифровая электроника и микроэлектроника» по проектам ОТ-F2-50 «Разработка научных основ формирования элементарных ячеек полупроводниковых соединений А^{III}В^V и А^{II}В^{VI} в решетке кремния - как новое направление в получении перспективных материалов для фотоэнергетики и фотоники» (2017-2020 гг.) и ОТ-F2-55 «Разработка научных основ получения объемноструктурированного кремния посредством формирования кластеров примесных атомов - как нового класса наноматериалов с новыми функциональными возможностями» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является формирование структур твердого раствора (Si)_{1-x}(GaSb)_x на поверхности кремния и в приповерхностном слое, а также исследование их влияния на оптические свойства кремния.

Задачи исследования. В качестве задач данного диссертационного исследования определены следующие:

создание математической и компьютерной моделей формирования структур твердого раствора (Si)_{1-x}(GaSb)_x на поверхности кремния и в приповерхностном слое;

определение оптимальных термодинамических условий формирования структур твердого раствора (Si)_{1-x}(GaSb)_x на поверхности кремния и в приповерхностном слое;

формирование структур твердого раствора (Si)_{1-x}(GaSb)_x на поверхности кремния и в приповерхностном слое с учетом природы примесных атомов Ga, Sb;

определение условий формирования и профиля распределения структур (Si)_{1-x}(GaSb)_x на поверхности кремния и в приповерхностном слое;

изучение оптических и фотоэлектрических свойств кремния с структурой твердого раствора (Si)_{1-x}(GaSb)_x;

исследование параметров решетки и ширины запрещенной зоны новой сформированной структуры твердого раствора типа $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$.

В качестве **объектов исследования** выбраны монокристаллические кремниевые образцы марок КЭФ-1; КЭФ-4,5; КЭФ-100; КДБ-0,5 (с концентрациями фосфора и бора $N_P \approx 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $N_P \approx 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $N_P \approx 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$; и $N_B = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, соответственно). В качестве примесных атомов выбраны элементы Ga и Sb.

Предметом исследования является влияние структур твердого раствора типа $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на кристаллическую решетку кремния и изменение его оптических свойств.

Методы исследования: В ходе исследований для легирования кремния примесями использовался диффузионный метод, а для определения параметров образца - такие методы, как эффект Холла, Брегга-Вульфа, Таука и Кубелки-Мунка.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Определены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) оптимальные термодинамические условия формирования структур твердого раствора типа $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностной области;

подтверждено с помощью Рамановской спектроскопии формирование впервые с применением диффузионного метода на поверхности кремния и в приповерхностном слое структуры твердого раствора типа $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ с участием примесных атомов Ga и Sb;

определены с применением анализа отражения оптических лучей массовые доли Si–0.56 и (GaSb)–0.44, соответственно (т.е. $\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}$) в новообразованной структуре твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое кремния;

определены методом дифракции рентгеновских лучей кристаллические параметры структуры твердого раствора $\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}$, установлены индексы Миллера (1,1,1) и постоянная кристаллической решетки $a_{\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}} = 5.67 \text{ \AA}$, что на ~4,4% больше постоянной кристаллической решетки кремния (5,43 Å);

определено на основе закона Вегарда, что ширина запрещенной зоны структуры твердого раствора $\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}$ ($E_{g,\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}} = 0.896 \text{ eV}$) на 20% меньше ширины запрещенной зоны кремния;

установлено смещение фотоэлектрической чувствительности кремния, легированного диффузионным методом примесными атомами Ga и Sb в сторону инфракрасной области спектра методом инфракрасной спектроскопии;

Практическая значимость результатов исследований заключается в следующем:

разработана технология получения структур твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое;

показана возможность изменения оптических свойств кремния посредством формирования структур твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое. В результате показана возможность охвата более широкого спектра солнечного излучения;

получен с помощью диффузионного метода *p-n* переход на поверхности кремния и в приповерхностном слое с участием атомов Ga и Sb и выявлен факт расширения спектрального диапазона чувствительности в инфракрасную область спектра.

Достоверность результатов исследования подтверждается применением комплекса независимых методов измерения и обработки данных, а также исследованием состояния сформированных на кремнии структур $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на сканирующем электронном микроскопе, порошковом рентгеновском дифрактометре, посредством рентгеновского спектрального анализа, на УФ-видимом-ИК- спектрофотометре, рамановском микроскопе.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследований обусловлена обоснованием возможности формирования на поверхности кремния и в приповерхностной области структур твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$. В результате выявлены изменения в оптических параметрах кремния, а данные изменения объясняются изменением параметров кристаллической решетки кремния.

Практическая значимость результатов исследования объясняется разработкой оптимальной технологии формирования структур твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое.

Внедрение результатов научных исследований.

На основе получения нового материала с сформированными бинарными соединениями GaSb и расширения спектральной области чувствительности фотоэлементов:

Акционерным Обществом «FOTON» внедрена технология формирования структур твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое при производстве транзисторов (на основании справки № 04-3/1703 «О‘ZELTEXSANOAT» от 07 декабря 2023 года). В результате, быстродействие транзисторов, разработанных на основе кремния с структурами твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ в 1,5 раза превысило быстродействие обычных кремниевых транзисторов с отсутствием в своем составе структур твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$.

Акционерным Обществом «FOTON» внедрена технология формирования структур твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое при производстве солнечных элементов (на основании справки № 04-3/1703 «О‘ZELTEXSANOAT» от 07 декабря 2023 года). В результате, КПД солнечного элемента, собраного на основе кремния с структурами твердого раствора $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на 3,7 % превысило КПД по сравнению с исходным.

Применена, в рамках проекта «Укрепление связей между Каршинским государственным университетом и производственными предприятиями Кашкадарьинской области в сфере повышения качества обучения студентов», реализованного в 2019-2021 годах в Каршинском государственном университете, математическая модель распределения примесных атомов в кремнии, разработанная с помощью программы MathCad (на основании справки № 04/60 Каршинского государственного университета от 10 января 2024 года).

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 9 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 24 научные работы, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 2 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, 3 статьи в международных зарубежных журналах с высоким импакт-фактором. Кроме того, получено 1 свидетельство регистрации программы для ЭВМ (DGU).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Текст диссертации изложен на 116 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

В «**Введении**» диссертационного исследования обоснована актуальность и востребованность темы, их соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики, раскрывается степень изученности проблемы, описываются цели и задачи, приводятся объект, предмет и методы исследования. Также приводятся сведения о научной новизне и практических результатах исследования, внедрении научных результатов исследования, опубликованных научных работах и их апробации, объеме и структуре диссертации.

В разделе 1.1-§ первой главы диссертации «**Формирование на поверхности кремния слоев с бинарными соединениями типа III-V**» приведен обзор современных проблем формирования слоев бинарных соединений III-V на кремниевой подложке и их решения, в разделе 1.2-§ приведен обзор методов формирования на подложке из кремния слоев бинарных соединений III-V, в разделе 1.3-§ приведен обзор методов выявления и исследования таких слоев, в разделе 1.4 рассмотрены особенности образования соединений атомов Ga и Sb, в разделе 1.5 - условия образования соединений атомов Ga и Sb в Si, в разделе 1.6 изучена термодинамика образования связей между атомами Ga и Sb.

На основе обзора литературных данных поставлены задачи по выполнению диссертационной работы.

Вторая глава дипломной работы под названием «**Технология получения образцов кремния со структурами $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$** » состоит из пяти разделов. В разделе 2.1 приведены параметры выбранных для эксперимента образцов кремния, описаны механические химические способы обработки образцов (т. е. описана последовательность подготовки образцов для осуществления последующего процесса диффузии). В разделе 2.2 обсуждаются параметры диффузионные параметры атомов Ga и Sb в кремнии, а также диффузионная технология образования бинарных соединений GaSb в кремнии. В разделе 2.3 описаны методы адаптации диффузионной технологии для формирования структур $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое, в разделе 2.4 рассматривается термическая обработка образцов с структурами $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$. В разделе 2.5 определена оптимальная технология формирования структур $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое.

Известно, что температура плавления кремния равна 1414°C . При достижении температуры в 1300°C начинается интенсивное испарение атомов кремния. В связи с тем, что при температурах ниже 1000°C коэффициенты диффузии примесных атомов Ga и Sb достаточно малы, все эксперименты проводились в диапазоне температур $1000\div 1250^\circ\text{C}$.

При температуре диффузии в пределах $1000\div 1100^\circ\text{C}$ примесные атомы Ga и Sb не образуют соединений. Причина заключается в том, что примесные атомы Ga и Sb не формируют достаточного давления паров.

На рисунке 1 приведено SEM-изображение поверхности образца кремния, легированного одновременно примесными атомами Ga и Sb в течение 10 часов при температуре $T=1100^\circ\text{C}$.

Как видно из рис. 1, входные атомы Ga и Sb образовали соединение на поверхности кремния. При температуре $T=1100^\circ\text{C}$ испаренные атомы входов Ga и Sb образовывали достаточное давление паров, а входные атомы Ga и Sb объединялись, образуя островки бинарных соединений GaSb. При этом размеры образовавшихся островков GaSb практически одинаковы (~ 50 мкм). Таким образом, было определено, что данная температура является оптимальной для образования бинарных соединений GaSb.

На рисунке 2 приведено SEM-изображение поверхности образца кремния, легированного одновременно примесными атомами Ga и Sb в течение 10 часов при температуре $T=1200^\circ\text{C}$.

На рисунке 2 видно, что примесные атомы Ga и Sb образовали соединение на поверхности кремния. При этом при температуре 1200°C давление паров примесных атомов Ga и Sb было достаточное для образования бинарных соединений типа GaSb в виде островков. Однако размеры образованных островков соединений GaSb различаются ($\sim 1\div 30$ мкм)

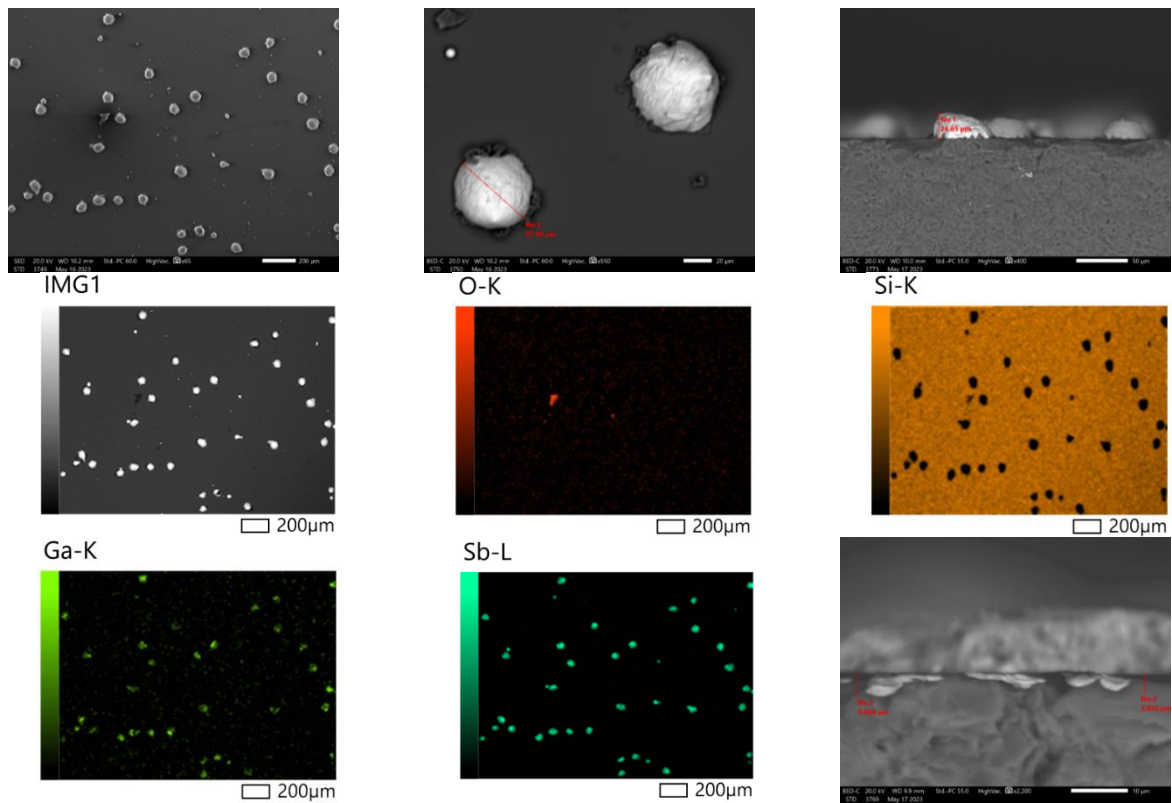


Рис. 1. SEM-изображение поверхности кремния, легированного одновременно примесными атомами Ga и Sb в течение 10 часов при температуре $T = 1100^{\circ}\text{C}$

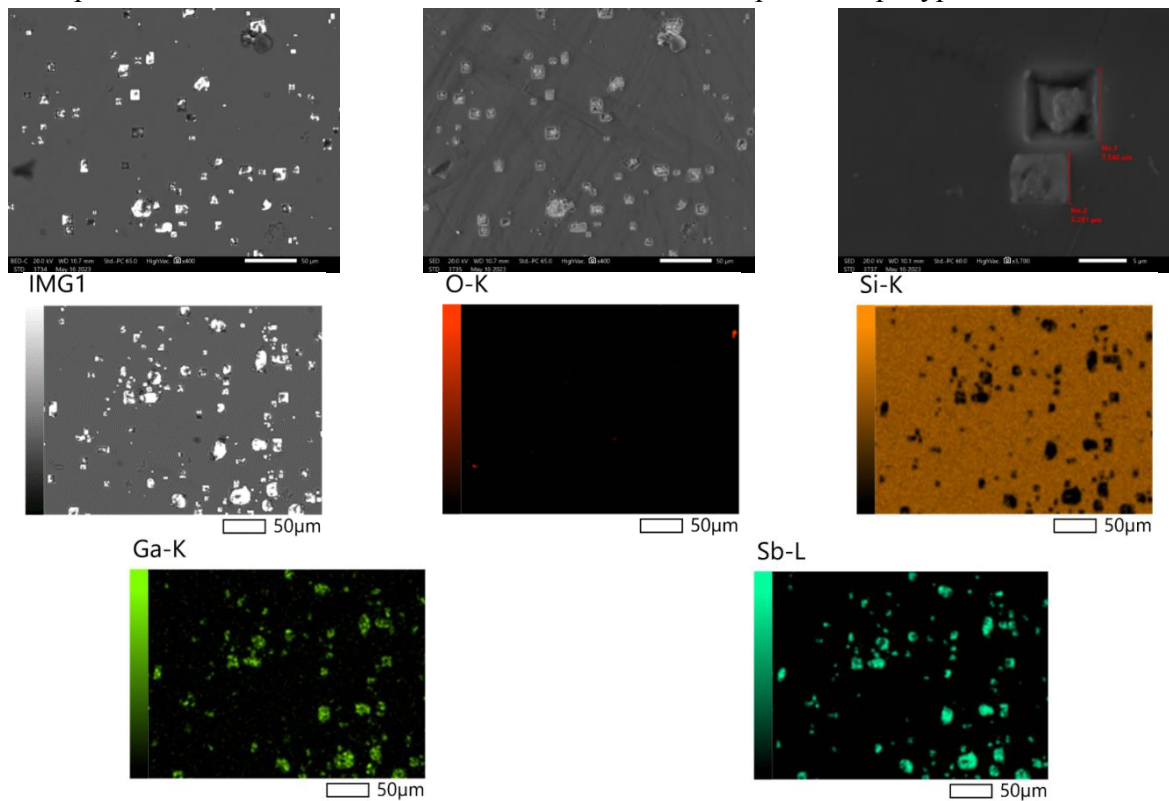


Рис. 2. SEM-изображение поверхности кремния, легированного одновременно примесными атомами Ga и Sb в течение 10 часов при температуре $T = 1200^{\circ}\text{C}$

В интервале температур диффузии $1200 \div 1250^{\circ}\text{C}$ примесные атомы Ga и Sb образуют соединение, но размеры сформированных островков бинарных соединений GaSb очень малы. При этом ввиду высоких коэффициентов

диффузии примесных атомов Ga и Sb в кремний при таких температурах все примесные атомы Ga и Sb полностью внедряются в объем кристалла кремния.

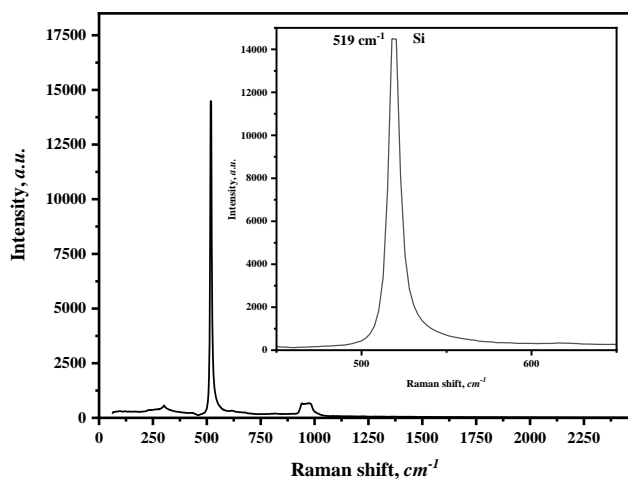
В таблице 1 приведены данные о формировании островков бинарных соединений GaSb в результате диффузии примесных атомов Ga и Sb в кремний при температурах $T = 1000, 1100, 1200$ и 1250°C

Таблица 1. Зависимость размеров бинарных соединений GaSb от температуры диффузии

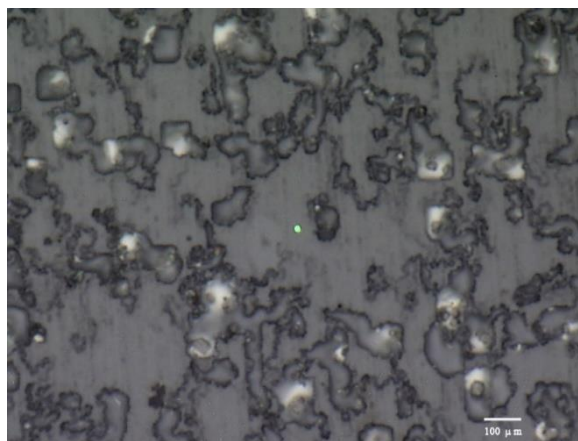
	$T=1000^\circ\text{C}$	$T=1100^\circ\text{C}$	$T=1200^\circ\text{C}$	$T=1250^\circ\text{C}$
Бинарное соединение GaSb	не формируется	формируется	формируется	формируется
Размеры бинарного соединения GaSb	–	Практически одинаковые	разные	Разного размера и очень маленькие
	–	$\sim 50 \mu\text{m}$	$\sim 1 \div 30 \mu\text{m}$	$\sim 0.1 \div 5 \mu\text{m}$

Третья глава диссертационной работы «**Оптические, фотоэлектрические и спектроскопические свойства кремния со структурой $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$** » состоит из 7 параграфов, причем в параграфе 3.1 образцы кремния, легированные примесными атомами Ga и Sb были исследованы на рамановском спектрометре, в параграфе 3.2 были исследованы оптические свойства образцов кремния с бинарными соединениями GaSb, в параграфе 3.3 был проведен рентгеноструктурный анализ образцов кремния с бинарными соединениями GaSb, в параграфе 3.4 был проведен элементный анализ образцов кремния с бинарными соединениями GaSb, в параграфе 3.5 были исследованы фотоэлектрические свойства образцов кремния с структурами типа $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$, в параграфе 3.6 было рассмотрено моделирование кристаллической решетки структуры $(\text{Si})_{0,5}(\text{GaSb})_{0,5}$ и вида энергетических уровней электронов с помощью компьютерного прикладного пакета. В параграфе 3.7 описаны перспективы применения полупроводника со структурой $(\text{Si})_{0,5}(\text{GaSb})_{0,5}$ в обозримом будущем.

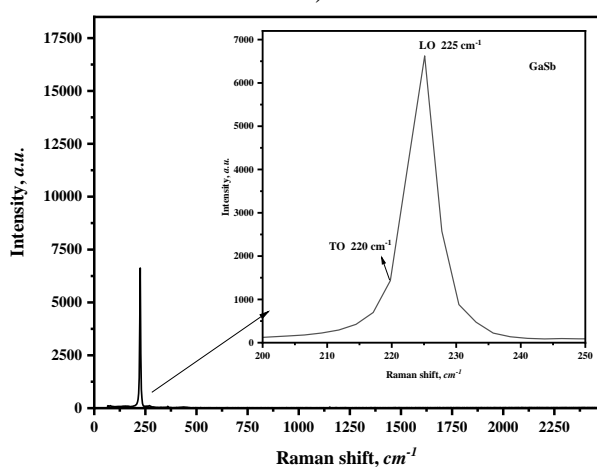
На снимках 3 - *b, e, g* приведен вид поверхности кремниевого образца, легированного примесными атомами Ga и Sb, а также изображены точки падающего лазерного излучения длиной волны 532 нм и мощностью 20мВт. На снимках видно, что на поверхности образца образуются обрамления серого цвета, над ними белые островки и закруглённые кривые полосы черного цвета. Был проведен анализ рамановского спектра с помощью лазерного освещения этих трех различных областей, отличающихся друг от друга. Графическое отображение рамановских спектров каждой выбранной точки приведены на рисунках 3 - *a, d, f*, соответственно.



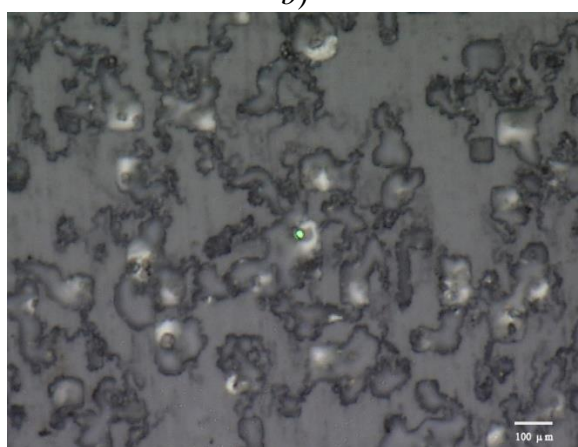
a)



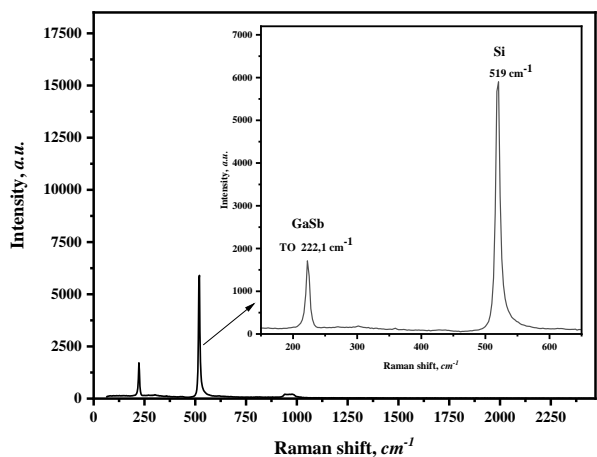
b)



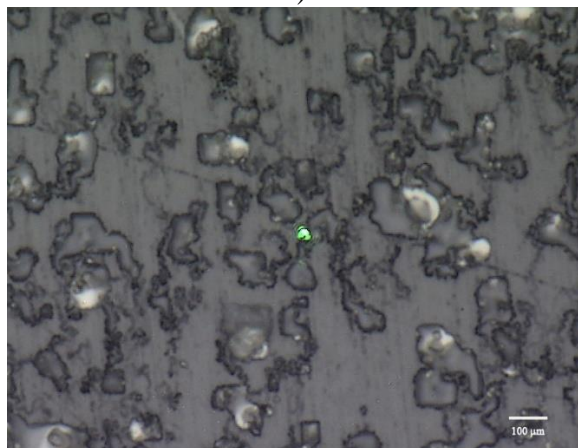
d)



e)



f)



g)

Рис. 3. Рамановский спектр и изображение поверхности образца Si, легированного примесными атомами Ga и Sb

Анализ рамановского спектра основной области серого цвета на рисунке 3-а выявил один пик с очень высокой интенсивностью (Intensity = 15000 a.e.) в точке 519 cm^{-1} . Данный пик принадлежит Si. На рисунке 3 - d приведен спектральный анализ одного из островков белого цвета. На снимке отчетливо

виден пик с интенсивностью (Intensity=7000 а.е.), соответствующий диапазону 225 см^{-1} , который относится к кристаллу GaSb (LO). На рисунке 3 - *f* приведены результаты спектрального анализа кривой черного цвета. Здесь заметны 2 пика, отличающиеся друг от друга. При сравнении величин пиков с данными, приведенными в литературе, установлено, что пик $222,1 \text{ см}^{-1}$ принадлежит GaSb, а пик 519 см^{-1} - Si. На основании анализа результатов можно предположить, что ограниченная кривой линией область является кристаллическим Si с GaSb в своем составе.

На рисунке 4 показаны 3 значения энергии $E_1=0.72 \text{ эВ}$, $E_2=0.896 \text{ эВ}$ и $E_3=1.02 \text{ эВ}$. Энергия E_1 представляет собой ширину запрещенной зоны полупроводникового материала GaSb, энергии E_2 и E_3 вероятнее всего относятся к материалу с сформированными соединениями $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$. С помощью обратного вычисления правила Вегарда мы смогли определить массовые доли Si и GaSb. Если считать что ширина запрещенной зоны E_g материала $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$ равна 0.892 эВ , то тогда дальнейший расчет осуществляется следующим образом:

$$E_{g,\text{Si}_{(1-x)}(\text{GaSb})_x} = (1-x) \cdot E_{g,\text{Si}} + x \cdot E_{g,\text{GaSb}}$$

Если вставить в данное уравнение значения энергии E_2 , $E_{g,\text{Si}}$, $E_{g,\text{GaSb}}$, то получим следующее линейное уравнение с одним неизвестным:

$$0.896 = (1-x) \cdot 1.12 + x \cdot 0.726$$

Из этого уравнения мы определил, что $x = 0.56$. Таким образом можно предположить, что энергия E_2 присуща новой сформированной структуре $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$. Аналогично, энергия E_3 в таком случае относится структуре $\text{Si}_{0.75}(\text{GaSb})_{0.25}$.

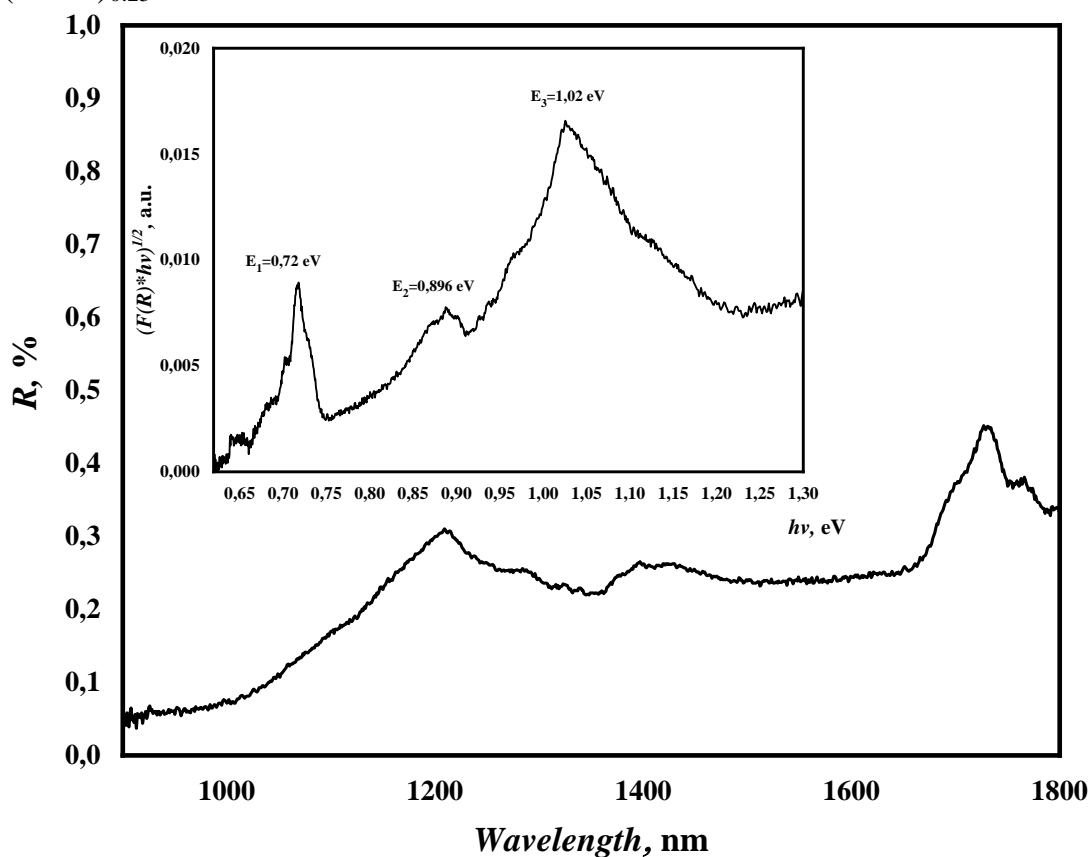


Рис. 4. Спектр отражения образца Si, легированного атомами Ga и Sb.

На рисунке 5 приведено сравнительное сопоставление результатов рентгеноструктурного анализа образца Si, легированного диффузионным методом примесными атомами Ga и Sb с данными, находящимися в международной базе кристаллографических данных COD. После диффузии были определены 17 основных пиков на спектре рентгеновских лучей, отраженных от поверхности Si (рисунок 5). В целях выяснения природы полученных пиков были выбраны и наложены друг на друга кривые, соответствующие углу 2θ (рисунки 5-b, d) для материалов GaSb и Si из кристаллографической базы данных с открытым доступом (рисунки 5-b, d). Информация о формировании соединений GaSb на поверхности Si отражена на пиках со значениями 25.25, 29.35, 41.89, 49.58, 60.78, 66.05, 67.5, 76.55, 82.25, 91.32, 96.82, 98,71, соответствующих кристаллическим плоскостям (111), (020), (202), (311) (040), (313), (402), (242), (511), (404), (513), (060). В общем спектре изображения (на рис. 5-а) заметны пики, принадлежащие Si 56.23, 69.41, 76.55, соответствующие кристаллографическим плоскостям (131), (040), (313). Анализ пиков показал, что в образцах обнаружены пики No2, No9 не принадлежащие ни GaSb, ни Si. Определены параметры кристаллических решеток этих пиков.

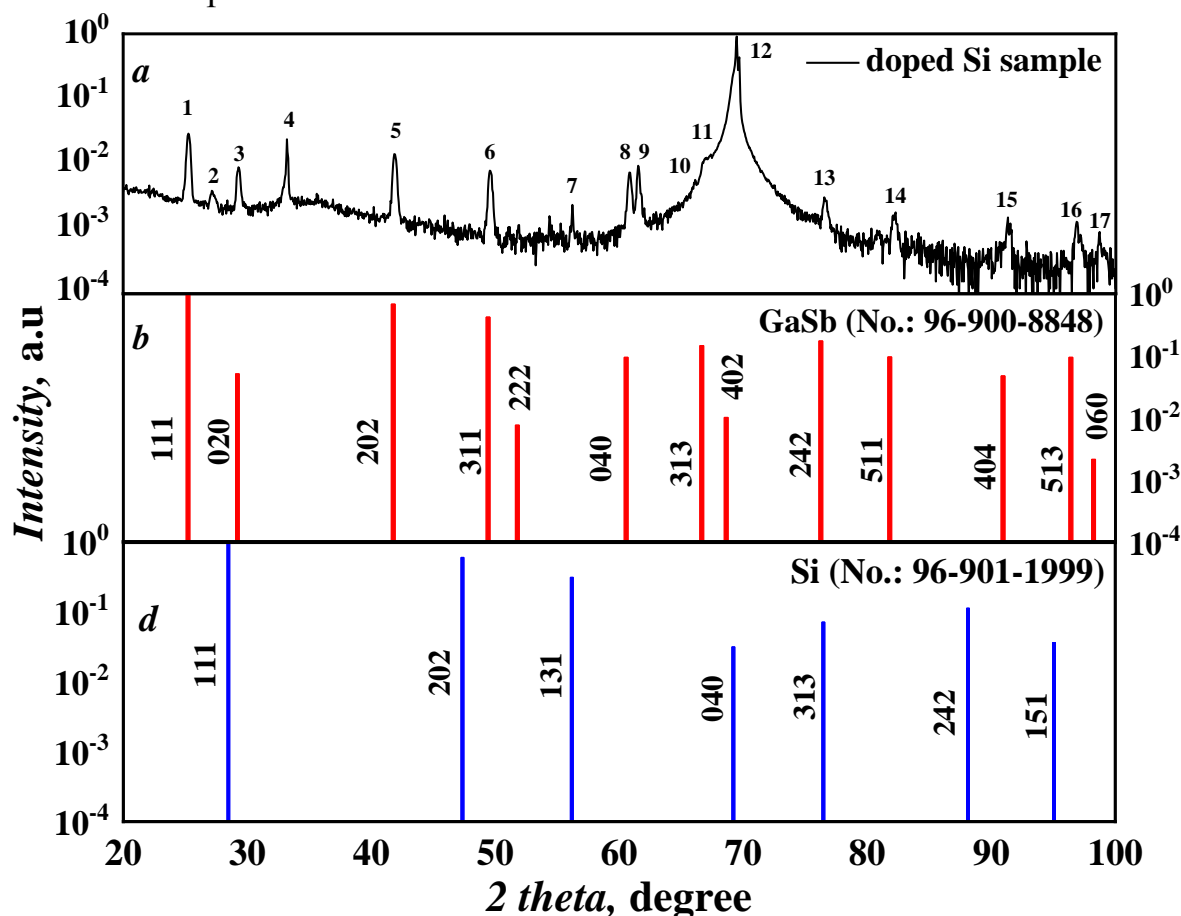


Рис. 5. Рентгеноструктурный анализ образцов: *a* - образец Si, легированный примесными атомами Ga и Sb; *b* и *d* – кристаллографические данные GaSb и Si, полученные из базы

Известно, что постоянные кристаллических решёток монокристаллов GaSb и Si равны $a = 6.09 \text{ \AA}$, $a = 5.34 \text{ \AA}$, соответственно.

Пики GaSb (242) на рисунке 5-b и Si (313) на рисунке 5-d наложены друг на друга. В работах авторов Paulraj и R. Narichandran указано, что пик No4 принадлежит SiC (101). Тем не менее, вследствие того, что пики No2, No9 располагались между пиками GaSb $2\theta=25.25$ (111) и Si $2\theta=28.45$ (111), а также пиками GaSb $2\theta=60.51$ (040) и Si $2\theta=69.25$ (040), соответственно, то новообразованную структуру типа $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$, можно соотнести пику No2 (111) и у No9 (040). На основании этих результатов по формулам 1 и 2, соответственно были рассчитаны постоянная решетки и дифракционная постоянная решетки (d_{hkl}) бинарного соединения GaSb (a), образованного на поверхности Si, а результаты приведены в таблице 2:

$$a = d_{hkl} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

$$d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad (2)$$

здесь θ - угол Брэгга, а $\lambda = 0.15402 \text{ нм}$ (длина волны Cu - $K\alpha$).

Образцы кремния, подготовленные для диффузии, были разделены на 2 партии. В образцы I партии одновременно проводилась диффузия примесных атомов Ga и Sb. Образцы II партии были нагреты без примесей. На рисунках 6 и 7 приведены элементный анализ и морфология поверхности данных образцов.

На рисунке 6 видно, что на поверхности образцов I-партии образуются беспорядочно разбросанные своеобразные пятна белого цвета, а на поверхности образцов II партии такие пятна отсутствуют (см. рис. 6-b). На рисунке 6 были проанализированы 3 спектра: 11-й спектр, (элементный анализ пятен белого цвета (рис. 6-a), приведен на рисунке 6-d); спектр 12 (элементный состав точки с пятнами белого цвета (рис. 6-a), приведен на рисунке 7-a), спектр 13 (элементный состав одного из белых островков приведен на рисунке 7-b).

На 11-спектре были определены следующие элементы: Si (условная концентрация равна 0.9 (см. табл. 3), Ga (условная концентрация равна 0.08), Sb (условная концентрация равна 0.04), O (условная концентрация равна 0.03), C (условная концентрация равна 0.02).

В 12 спектре выявлен только элемент Si (условная концентрация равна 1.16 (см. табл. 3)).

В 13-спектре выявлены элементы Si (условная концентрация равна 0.02 (см. табл. 3), Ga (условная концентрация равна 0.4), Sb (условная концентрация равна 0.39), O (условная концентрация равна 0.06).

Элементный состав островков, ограниченных белыми линиями на поверхности образцов II партии (см. рис. 7), приведен на рисунке 6-d (спектр 17).

В 17 спектре были выявлены элементы Si (условная концентрация равна 0.97), O (условная концентрация равна 0.16), C (условная концентрация равна 0.01).

Таблица 2. Информация о пиках на рисунке 6

Кристаллическая решетка	No. пика	2θ	h	k	l	$d_{hkl}, \text{Å}$	$a_{hkl}, \text{Å}$
GaSb	1	25,25	1	1	1	3,52	6,10
	3	29,35	0	2	0	3,04	6,08
	5	41,89	2	0	2	2,15	6,09
	6	49,58	3	1	1	1,84	6,09
	8	60,78	0	4	0	1,52	6,09
	10	66,05	3	1	3	1,41	6,16
	11	67,5	4	0	2	1,39	6,19
	13	76,55	2	4	2	1,24	6,09
	14	82,25	5	1	1	1,17	6,08
	15	91,32	4	0	4	1,08	6,09
	16	96,82	5	1	3	1,03	6,09
17	98,71	0	6	0	1,01	6,09	
Si	4	33,21	0	2	0	2,69	5,39
	7	56,23	1	3	1	1,63	5,42
	12	69,41	0	4	0	1,35	5,41
	13	76,55	3	1	3	1,24	5,42
$\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$	2	27,19	1	1	1	3,28	5,67
	9	61,55	0	4	0	1,50	6,02

I-партия

II-партия

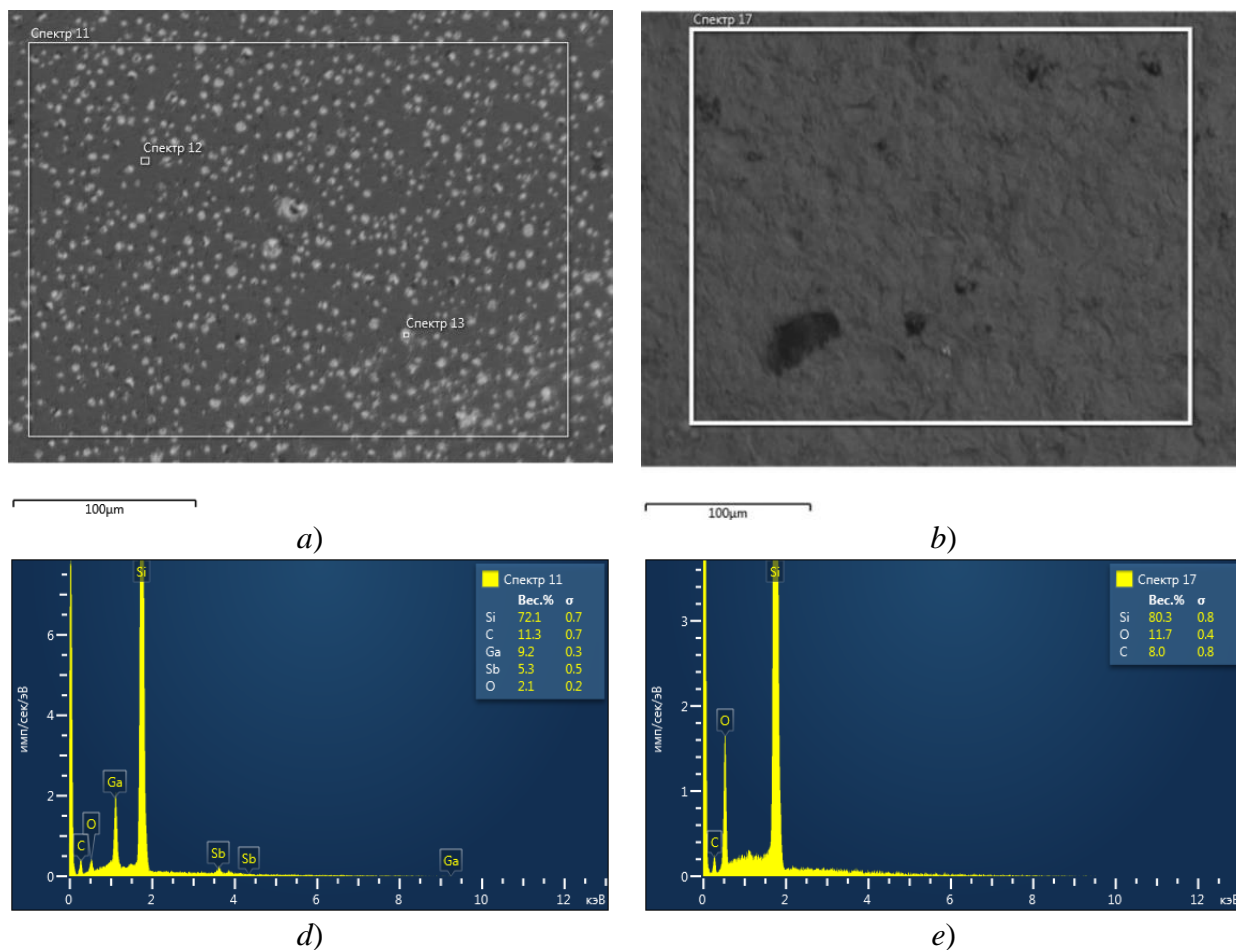


Рис. 6. SEM-анализ образцов, полученных после диффузии; *a)* SEM-изображение поверхности образца I партии; *b)* SEM-изображение поверхности образца II партии; *d)* элементный анализ поверхности образцов I партии; *e)* элементный анализ поверхности образца II партии.

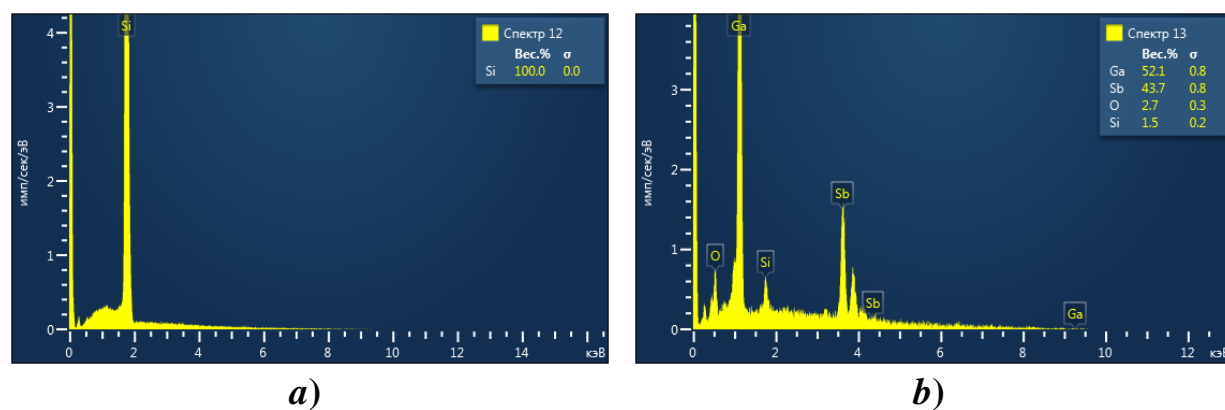


Рис. 7. Элементный анализ локальных точек на поверхности образца I партии; *a)* 7-*a)* элементный анализ 12-спектра; *b)* 7-*b)* элементный анализ 13-спектра

3-таблица. Результаты анализа элементного состава образцов I и II партий, изображенных на снимках 6 и 7

Элемент	Тип линии	Условная концентрация	Масса.%	Сигма Вес.%
11-spectr				
C	K seriya	0.02	11.34	0.69

O	K seriya	0.03	2.12	0.24
Si	K seriya	0.90	72.12	0.74
Ga	L seriya	0.08	9.16	0.29
Sb	L seriya	0.04	5.26	0.50
Сумма:			100.00	
12-spectr				
Si	K seriya	1.16	100.00	0.00
Сумма:			100.00	
13-spectr				
O	K seriya	0.06	2.67	0.26
Si	K seriya	0.02	1.48	0.19
Ga	L seriya	0.40	52.14	0.82
Sb	L seriya	0.39	43.72	0.85
Сумма:			100.00	
17-spectr				
C	K seriya	0.01	7.97	0.79
O	K seriya	0.16	11.71	0.39
Si	K seriya	0.97	80.32	0.78
Сумма:			100.00	

Образцы кремния, изготовленные для диффузии, разделены на 2 партии. В образцы I партии диффундированы только примесные атомы Sb, а в образцы II партии - примесные атомы Ga и Sb. Фотоэлектрические характеристики этих образцов проанализированы на рисунке 8.

Образцы I и II партий после диффузии подвергались дополнительному отжигу при $T = 600^{\circ}\text{C}$.

Как видно из графиков на рис. 8 видно, что в образце 1 партии, то есть в кремнии, легированном только примесными атомами Sb, фотоотклик начинается с 1,0 эВ и достигает своего максимального значения при 1,24 эВ. В образце 2-й партии, то есть в кремнии, легированном последовательно Ga и Sb, фотоотклик начинается со значения энергии ~ 0.87 эВ достигнув максимального значения энергии ~ 1.2 эВ. Можно утверждать, что фотоэлектрическая чувствительность кремния за счет взаимодействия атомов входов Ga и Sb смещается в сторону инфракрасного диапазона.

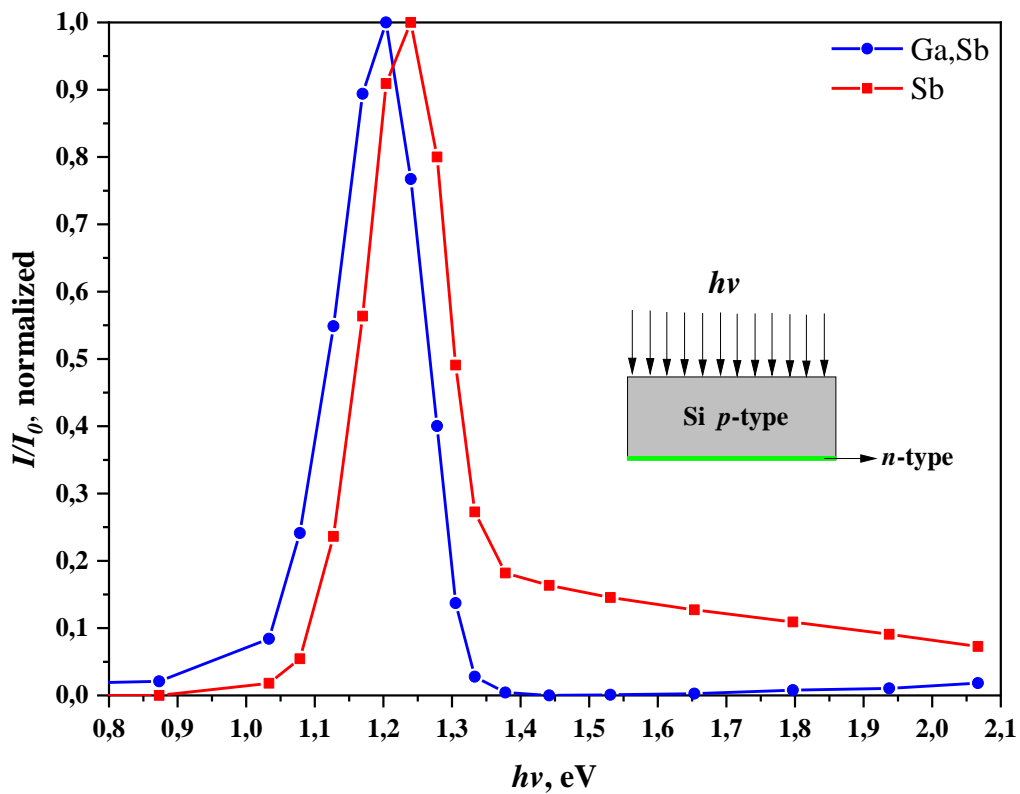


Рис. 8. График зависимости тока короткого замыкания в образце от энергии излучения. Результаты получены после дополнительного отжига образцов 1 и 2 партий при температуре 600°C (во всех образцах освещалась тыльная сторона образцов p -типа (не легированная примесными атомами сторона))

ВЫВОДЫ

По результатам анализа данных, полученных при выполнении диссертационной работы по формированию структур $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое и исследовании их влияния на оптические свойства кремния сделаны следующие выводы:

1. Научно-обоснованы условия формирования бинарных соединений GaSb в монокристаллическом кремнии с физико-химической точки зрения.

2. Установлено, что температура 1100°C является оптимальной температурой для формирования островков с бинарным соединением GaSb на поверхности кремния и в приповерхностном слое и данное значение температуры было объяснено через парциальные давления Ga и Sb и коэффициенты диффузии в кремнии при данной температуре.

3. Обнаружено формирование на поверхности кремния островков бинарного соединения GaSb с почти одинаковыми размерами (~50 μ) после диффузии кремния примесными атомами Ga и Sb при температуре 1100 °C.

4. Обнаружено формирование на поверхности кремния островков бинарного соединения GaSb с различными размерами (1÷15 μm) после диффузии кремния примесными атомами Ga и Sb при температуре 1200 °C, установлено, что плотность распределения данных островков на поверхности кремния составляет $\sim 10^6$ cm^2 , а также установлено, что островки GaSb обладают свойством сбора атомов кислорода с поверхности кремния.

5. Впервые экспериментально подтверждено формирование структур $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое при диффузии примесных атомов Ga и Sb в кремний при температуре 1200°C.

6. Установлено по результатам эксперимента, что массовые доли элементов структуры $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$, сформированной на поверхности кремния соотносятся как $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ и $\text{Si}_{0.75}(\text{GaSb})_{0.25}$.

7. Определены значения энергий запрещенных зон структур $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ и $\text{Si}_{0.75}(\text{GaSb})_{0.25}$ (0.896 эВ и 1.02 эВ, соответственно).

8. Установлено, что постоянная решетки новообразованной структуры $\text{Si}_{0.44}(\text{GaSb})_{0.56}$ на поверхности кремния и в приповерхностном слое составляет $a=5.67$ Å, а направление роста кристалла (h,k,l–1,1,1).

9. Объяснено смещение спектральной области чувствительности кремниевого образца диффузионно легированного последовательно примесными атомами Ga и Sb при дополнительном отжиге при T=600 °C в инфракрасную область спектра формированием бинарного соединения GaSb в решетке кремния.

10. Установлено, что для образования бинарных соединений GaSb предпочтительно на поверхности кремния и в приповерхностном слое следует проводить одновременную диффузию примесных атомов Ga и Sb, в то время как для образования бинарных соединений GaSb предпочтительно в объеме кремния следует применять метод последовательной диффузии примесных атомов Ga и Sb.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE FERGANA
POLYTECHNIC INSTITUTE OF UZBEKISTAN**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISAKOV BOBIR OLIMJONOVICH

**FORMATION Of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ STRUCTURES ON THE SILICON
SURFACE AND IN THE PRE-SURFACE LAYER AND THEIR EFFECT
ON THE OPTICAL PROPERTIES OF SILICON**

04.01.07 - Condensed matter physics

ABSTRACT

of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences

Ferghana -2024

The topic of dissertation of doctor of philosophy (PhD) in technical sciences was registered at the Higher Attestation Commission under ministers of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under № B2023.4.PhD/FM732

The dissertation has been prepared Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation is posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website (www.ispm.uz) and the "Ziyonet" Information and educational portal at (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Iliyev Khalmurat Midjitovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Official opponents: **Nuriddinov Izzatilla**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
AS RUz, Institute of Nuclear Physics, Chief Researcher
Radjapov Sali Ashirovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
AS RUz, FTI, Chief Researcher

Leading organization: **Samarkand State University named after Sh. Rashidov**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "13" 07 2024 at 10⁰⁰ hours at a meeting of the Scientific Council PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 at the Ferghana Polytechnic Institute (Address: 150107, Ferghana, Ferghana St., house 86. Tel: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, small meeting room).

The dissertation can be found in the library of the institute. (registered under No. 209)
(Address: 150107, Fergana, st. Fergana, house 86. Tel: (+99873) 241-12-06).

The abstract of the dissertation was distributed on " 01 " 07 2024.
(Registry record No. 3 dated " 01 " 07 2024)



N.Kh. Yuldashev,
Chairman of the Scientific Council for the
Award of Academic Degrees, Doctor of Physical and
Mathematical Sciences, Professor

B.J. Axmadaloyev
Scientific Secretary of Scientific Council on
award of PhD scientific degree, PhD in Physics and
Mathematics, Professor Assistant

S.M Otajonov
Chairman of Scientific Seminar of Scientific
Council on awarding of PhD scientific degrees, DSc
in Physics and Mathematics, professor

INTRODUCTION (annotation of Doctor of Philosophy (PhD) dissertation)

Importance and necessity of the dissertation topic. The scientific community the world over is paying a special attention to the issues of harnessing solar power, saving fossil fuels and conventional resources and rational use of solar energy in boosting the energy efficiency of solar panels. Currently, in the developed countries, "...electrical power production using solar energy accounts for about 46% of the overall production of power generated by renewables. In the period 2025-2030, as has been outlined in the designated "zero-emissions" scenario, the share of electrical power production from renewable energy sources is planned to increase by more than 60%"¹. In this regard, special attention is paid to the discovery of new materials containing III-V binary compounds, the properties of which do fundamentally differ from the properties of silicon, and the development of highly efficient solar cells based on them.

Research laboratories around the world are conducting research aimed at modifying the physical properties of the material by forming GaSb binary compounds on the surface of the silicon material, studying the properties of such a material and developing solar cells, as well as sensors and lasers operating in the field of infrared radiation. In this view, priority is given to research in the field of doping a single crystal of silicon by the diffusion method using Ga and Sb as initial impurities, determining the optimal thermodynamic conditions for the formation of GaSb binary compounds on the Si surface, monitoring the optical, electrophysical and photoelectric properties of silicon containing GaSb compounds, determining lattice parameters of a novel material with the structure $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$, formed by creating a GaSb binary compound on the Si surface. Meanwhile, the tasks of varying the band gap of the Si sample, on the surface of which GaSb binary compounds have been formed, as well as developing a computer model of the $\text{Si}_{0.5}\text{GaSb}_{0.5}$ structure remain of utmost importance.

The Republic of Uzbekistan is implementing large-scale activities aimed at developing new technologies that will improve the efficiency of solar panels and the widespread use of solar energy. The Strategy "Uzbekistan-2030" outlines important tasks for the "transition to a Green Economy" and a sharp increase in the use of renewable energy sources, which are the basis of a green economy"². When implementing these tasks, in particular, the issue of forming GaSb binary compounds on the silicon surface and in the near-surface layer and increasing the efficiency of silicon-based solar cells with GaSb binary compounds becomes important.

The research work done within the framework of this dissertation serves to a certain extent to fulfill the tasks provided for in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated September 11, 2023, № PD-158 "On the Strategy

¹ https://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2015_3_84_104.pdf

² Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated September 11, 2023 No. PF-158 "On the strategy "Uzbekistan - 2030"

"Uzbekistan - 2030", Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated 01.28.2022, № PD-60 "On the development strategy of New Uzbekistan for 2022 - 2026", the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated 08.22.2019, № PR-4422 "On accelerated measures aimed at improving energy efficiency of economic and social sectors, the introduction of energy-saving technologies and development of renewable energy sources", the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated July 10, 2020, № PR-4779 "On additional measures to reduce the dependence of economic sectors on fuel and energy products by increasing the energy efficiency of the economy and using available resources", as well as in other regulatory documents adopted in this area.

Compliance of the research with the priority directions of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. The dissertation work was fulfilled within the framework of priority areas for the development of science and technology of the Republic of Uzbekistan: III. "Energy, energy resource conservation, transport, mechanical and instrument engineering, development of modern electronics, microelectronics, photonics, electronic instrument engineering."

Level of study of the problem. A number of well-known foreign scientists have contributed to the epitaxial growth of AIIIBV binary compounds, especially the GaSb binary compound layer on the silicon surface, the formation of GaSb nanocrystals on the Si surface by ion-implantation method, the conditions for the formation of binary bonds in semiconductors and their mathematical and physical models. major contributors. Including Bei Shi, Jonathan Klamkin, Eric Tournié, Laura Monge-Bartholome, K. Madiomanana, Dmitry L. Goroshko, H. Toyota, T. Endoh, T. Todo, Y.K. Su, K.S. Napolsky, A.V. Bulgakov, O.N. Koroleva, Rakesh Kumar Pandey³ and others.

The scientific works of famous scientists of Uzbekistan are devoted to introduction of lead atoms into semiconductors using diffusion technology and control of the main properties of semiconductor material. Of these, R.A. Muminov, M.S. Saidov, M.K. Bakhodirkhanov, A.T. Mamadalimov, S.Z. Zaynabidinov, N.A. Sultanov, N. Yuldashev. As a result of the conducted scientific research, the production of equipment for measuring nuclear radiation - semiconductor detectors, lasers, and converting sunlight into electricity has been launched.

At the same time, in the work of the above scientists, the formation of AIIIBV binary compounds mainly used methods that require expensive devices, such as ion-implantation, molecular beam epitaxy, and liquid phase epitaxy. Formation of GaSb binary compound on silicon surface and pre-surface layer based on diffusion technology, optimal thermodynamic conditions of formation and optical and

³ A review of international scientific research on the topic of the dissertation was carried out based on the following sources: Ke Yung Cheng. Introduction to the basics of connections of semiconductors and class III-V devices. International publishing house Springer. Springer - 2020; Burcu Arpapaj, I. Eren Suyolcu, Gülkan Çorapçioğlu, Peter A. van Aken, Mehmet Ali Gülgün and Uğur Serincan. Comparative study of GaSb layers grown by molecular beam epitaxy on nominal and vicinal Si(100) substrates. Half a second. Sci. Technol. - 2020 – 12 rub.; Monzur-UI-Akhir, M.D., Masayuki Mori, and Koichi Maezawa. Effect of current ratio on GaSb films grown at low temperature on Si(111). 2019 8th International Conference on Computer Science, Electronics and Vision (ICIEV) and 3rd International Joint Conference on Imaging, Vision and Pattern Recognition (IVPR), - 2019, 312-317b. and others.

photoelectric parameters of new material containing $\text{Si}_{1-x}(\text{GaSb})_x$ structure have not been studied yet.

The connection of the dissertation research with the research plans of the higher educational institution where the dissertation was completed. The dissertation research was carried out at the Tashkent State Technical University at the Department of "Digital Electronics and Microelectronics" in the range of tasks defined in the following projects: OT-F2-50 "Developing scientific basis for the formation of elementary cells of semiconductor compounds $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ and $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ in a silicon lattice as a novel area for engineering perspective materials for photoenergy and photonics" (2017-2020) and OT-F2-55 "Developing scientific basis for the production of bulk structured silicon by means of formin clusters of impurity atoms as a novel class of nanomaterials with new functionality" (2017-2020).

The purpose of the study. The purpose of the study is to engineer $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the near-surface layer, as well as to study their effect on the optical properties of silicon.

Tasks of research. The following tasks of the dissertation research were defined:

- developing mathematical and computer models of formation of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the near-surface layer;

- determining optimal thermodynamic conditions for the formation of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the near-surface layer;

- forming $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the near-surface layer taking into account the nature of Ga and Sb impurity atoms;

- determining conditions for the formation of and figuring out the distribution profile of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the surface layer;

- study of the optical and photoelectric properties of silicon with the $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures;

- study of the lattice parameters and band gap of the newly formed solid solution structure of the $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ -type.

The object of the research. Single crystalline silicon samples of Phosphorus-doped-Silicon-1; Phosphorus-doped-Silicon -4.5; Phosphorus-doped-Silicon -100; Boron-doped-Silicon-0.5-types (with phosphorus and boron concentrations $N_{\text{P}} \approx 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $N_{\text{P}} \approx 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $N_{\text{P}} \approx 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; и $N_{\text{B}} = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, respectively) were chosen as starting materials. The elements Ga and Sb were chosen as impurity atoms.

The subject of research is the influence of the $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ structure on the properties of the silicon crystal lattice and changes in its optical properties.

Research methods. During the research, the diffusion method was used to dope silicon with impurities, and methods such as the Hall effect, Bragg's law, Tauck and Kubelka-Munk effects were used to determine the parameters of samples.

The scientific novelty of the study is as follows:

The optimal thermodynamic conditions for the formation of solid solution structures of the $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ -type on the silicon surface and in the near-surface region have been determined by scanning electronic microscope (SEM);

For the first time, using the diffusion method, the formation of a solid solution structure of the $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ -type with the participation of Ga and Sb impurity atoms on the silicon surface and in the near-surface layer was experimentally established by implementing Raman spectroscopy;

The mass fractions of Si–0.56 and GaSb–0.44, respectively (i.e., $\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}$) in the newly formed structure of the $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ -type solid solution on the silicon surface and in the near-surface layer of silicon were determined by applying the technique of optical ray reflection analysis;

the crystalline parameters of the solid solution structure of type $\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}$ were determined by applying the XRD technique, the Miller indices (1,1,1) and the crystal lattice constant $a_{\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}} = 5.67 \text{ \AA}$ were determined, which is ~4.4% greater than the crystal lattice constant of silicon (5.43 Å);

it was determined by applying Vegard's law that the band gap of the solid solution structure of type $\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}$ ($E_{g,\text{Si}_{0.56}(\text{GaSb})_{0.44}} = 0.896 \text{ eV}$) is 20% less than the band gap of silicon;

A shift in the photoelectric sensitivity of silicon doped by the diffusion method with Ga and Sb impurity atoms towards the infrared region of the spectrum has been revealed by applying the method of infrared spectroscopy.

The practical results of the research are as follows:

a technology has been developed for obtaining $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the near-surface layer;

the possibility of changing the optical properties of silicon through the formation of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the near-surface layer is shown. As a result, it became possible to cover a wider spectrum of solar radiation;

a *p-n* transition on the silicon surface and in the near-surface layer with the participation of Ga and Sb atoms was obtained using the diffusion method and also the expansion of the spectral range of sensitivity toward the infrared region of the spectrum was shown.

The reliability of the obtained results is confirmed by the use of a complex of independent methods of measurement and data processing, as well as by studying the state of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ structures formed on silicon using a scanning electron microscope, a powder X-ray diffractometer, by means of XRD spectral analysis, and a UV-visible-IR spectrophotometer, Raman microscope.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the research results is due to the substantiation of the possibility of forming $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the near-surface region. As a result, changes in the optical parameters of silicon were identified, and these changes are explained by changes in the parameters of the silicon crystal lattice.

The practical significance of the research results is explained by the development of an optimal technology for the formation of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the surface layer.

Implementation of research results into practice. Based on developing a novel material with GaSb binary compounds and the expansion of the spectral range of sensitivity of photocells:

«FOTON» Joint Stock Company had implemented a technology for the formation of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the pre-surface layer in the production of transistors (based on reference letter № 04-3/1703 from "O'ZELTEXSANOAT" dated December 07, 2023). As a result, the performance of transistors developed on the basis of silicon with $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures turned out to be 1.5 times higher than the performance of conventional silicon transistors without $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures in their composition.

«FOTON» Joint Stock Company had implemented a technology for the formation of $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ solid solution structures on the silicon surface and in the pre-surface layer in the production of solar cells (based on reference letter № 04-3/1703 from "O'ZELTEXSANOAT" dated December 07, 2023). As a result, the efficiency of a solar cell assembled on the basis of silicon with solid solution structures $(\text{Si})_{1-x}(\text{GaSb})_x$ turned out to be 3.7% higher in compare to a reference one.

A mathematical model of the distribution of impurity atoms in silicon, developed using the MathCad program, was applied within the framework of the project “Strengthening ties between Karshi State University and industrial enterprises of the Kashkadarya region in the field of improving the quality of student education”, implemented in 2019-2021 at Karshi State University (based on reference letter № 04/60 of Karshi State University dated January 10, 2024).

Approval of research results. The main results of the dissertation work were reported and discussed at 9 international and 5 regional scientific and practical conferences.

Publication of research results. Relevant to the topic of the dissertation 24 research papers were published, of which 2 are in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations, including 2 papers in journals indexed in the Scopus database, 3 papers in international reviewed journals with high impact factor. In addition, 1 application for registration of a computer program (DGU) was received.

Dissertation structure and size. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and applications. The text of the dissertation is presented on 116 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1A. Iliyev X.M., Isamov S.B., Isakov B.O., Qurbonova U.X., Abduraxmonov S.A. A surface study of Si doped simultaneously with Ga and Sb // East european journal of physics, 2023. No3. -pp. 303-307. [№ 3 Scopus Q4, CiteScore: 0,8].

2A. Iliyev X.M., Odzhaev V.B., Isamov S.B., Isakov B.O., Ismaylov B.K., Ayupov K.S., Hamrokulov Sh.I., Khasanbaev S.O. X-ray diffraction and raman spectroscopy analyses of GaSb-enriched Si surface formed by applying diffusion doping technique // East european journal of physics, 2023. No3. -pp. 363-369. [№ 3 Scopus Q4, CiteScore: 0,8].

3A. Илиев Х.М., Зикриллаев Н.Ф., Исамов Б.С., Исаков Б.О., Ковешников С.В. Изменение концентрации атомов кислорода в кремнии при диффузии атомов сурьмы и галлия // Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ДАН), 2022. №6. -С.35-40. [01.00.00; № 7].

4A. Isakov B.O., Hamrokulov Sh.I., Abdurakhmonov S.A., Abdurakhmonov H.A. Doped silicon with gallium and antimony impurity atoms // Science and innovation International scientific journal, 2023. vol. 2, No 5. -pp. 255-261. [№ 23; Scientific Journal Impact Factor, IF: 5.608].

5A. Исаков Б.О. Теоретическое распределение концентрации галлия и сурьмы элементов легированного, диффузионным способом в кремнии // Ilim ha'm ja'miyet, 2022. №2. -С. 19-20. [01.00.00; № 15].

6A. Isakov B.O., Xudoynazarov Z.B., Kushiev G.A., Sattorov A.A., Abduqahhorov F.I. Thermodynamic conditions for the formation of GaSb binary compound in Si sample // Science and innovation International scientific journal, 2023. vol. 2. No 10. -pp. 29-34. [№ 23; Scientific Journal Impact Factor, IF: 5.608].

7A. Isakov B.O. Effect of gallium and antimony impurity atoms on the photoelectric properties of silicon // Eurasian Journal of Physics, Chemistry and Mathematics, 2023, vol. 23, pp. 70-74. [№ 23; Scientific Journal Impact Factor, IF: 6.979].

II bo'lim (II часть; part II)

9A. Isakov B.O., Rakhmonov B.R., Subkhonberdiev Sh.N. Influence of Impurity Atoms of Gallium and Antimony on the Concentration of Optically Active Oxygen in the Silicon Lattice // International journal on orange technology, 2022. vol. 4. issue 6. -pp. 57-60.

10A. Isakov B.O., Hudoynazarov Z.B., Zikrillayev X.F., Oktyabrov A.U., Daminov S.N. Kremniy panjarasida III-V guruh elementlari elementar yacheekalarini shakllantirish mexanizmi // Республиканской конференции (с участием ученых стран СНГ) «Современные проблемы физики полупроводников». Нукус, 20 ноября, 2019. –С. 200-201.

11A. Iliyev X.M., Isakov B.O., Namroqulov Sh.I., Subxonberdiyev Sh., Madjitov M.X. Galliy va surma atomlari bilan ketma-ket legirlangan kremniyning optik xossalari // II Xalqaro ilmiy anjuman “Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo‘tkazgich materiallar”. Toshkent, 19-20 noyabr, 2021. -С. 326-329.

12A. Илиев Х.М., Просолович В.С., Исамов С.Б., Исаков Б.О., Янковский Ю.Н. Расчет профилей распределения примесных атомов галлия и сурьмы при их совместной диффузии в кремнии // X Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники». Минск, 12-14 октября, 2022. -С.89-93.

13A. Iliyev X.M., Zikrillayev N.F., Isamov S.B., Isakov B.O., Sheraliyev J., Nazarov A. X-ray analysis of silicon diffused with gallium and antimonite atoms // III Xalqaro ilmiy anjuman “Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo‘tkazgich materiallar”. Toshkent, 24-25 noyabr, 2022. -С. 129-132.

14A. Исаков Б.О., Исамов С.Б., Кушиев Ф.А., Худойназаров З.Б. Дифференциальный расчет диффузионных распределений с двумя примесями в кремнии с атомами галлия и сурьмы // Science and innovation, 2022. -С. 333-335.

15A. Iliyev Kh.M., Isamov S.B., Isakov B.O., Kurbanova O‘.Kh., Uralbayev Kh. Photoelectric property of silicon (Si) samples doped with gallium (Ga) and antimony (Sb) impurity atoms // VI Международная конференция «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро – и наноструктурах». Фергана, 28-30 сентября, 2023. -С. 19-20.

16A. Isakov B.O., Iliyev X.M., Rakhmonov B.R., Isamov S.B. Theoretical distribution of the element concentration of gallium and antimony in diffusion-doped silicon // Respublika ilmiy-amaliy anjumani “Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari”. Urganch, 27-28 may, 2022. –С. 227-229.

17A. Isamov S.B., Haqqulov M.K., and Isakov B.O. Concentration of simultaneously doped gallium and antimony impurity atoms in silicon // International Conference “Fundamental and Applied Problems of Modern Physics”, Tashkent, October 19-21, 2023. –P. 200-203.

18A. Zikrillayev N.F., Iliyev X.M., Isakov B.O., Isamov S.B. Galliy va surma kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning spektroskopik tahlili // II-международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники», Ташкент, 27-28 октября 2023 г. –С. 69-71.

19A. Zikrillayev N.F., Iliyev X.M., Isakov B.O., Isamov S.B. Galliy va surma kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning element tahlili // II-международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники», Ташкент, 27-28 октября 2023 г. –С. 21-22.

20A. Sheraliyev J.N., Rakhmanov U.M., Isakov B.O., Isamov S.B. Successive diffusion of gallium and antimony atoms into silicon // II-международная научная конференция «Научные основы использования

информационных технологий нового уровня и современные проблемы - автоматизации», 19-20 май, СБУМИПТК, Ташкент 2023 г. –С. 697-703.

21А. Iliyev X.M., Isamov S.B., Isakov B.O., Sobirjonov R., Sultonov V. Kremniyda III-V binar birikmalarni shakllantirish shartlari // Международной научной конференции “Тенденции развития физики конденсированных сред” Фергана, 30-31 октября, 2023 г. –С. 131-134.

22А. Isakov B.O., Iliyev X.M., Isamov S.B. Galliy va surma kirishma atomlari bilan ligerlangan kremniyni kristall panjara doimiysi // “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. Тошкент, 2023 йил, 3-4 ноябрь. –С. 146-148.

23А. Isakov B.O., Iliyev X.M., Isamov S.B., Sultonov V., Sobirjonov R. Galliy va surma kirishma atomlari bilan ligerlangan kremniyni raman spektroskopik tahlili // “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. Тошкент, 2023 йил, 3-4 ноябрь. –С. 148-150.

24А. Isakov B.O., Iliyev X.M., Xudoynazarov Z.B. Galliy va surma kirishma atomlarini kremniyda taqsimotini hisoblash dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya Vazirligi Huzuridagi Intellektual Mulk Agentligi № DGU 16793. O‘zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reestrída 14.06.2022 y. ro‘yxatdan o‘tkazilgan.

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari Farg‘ona politexnika institutining “Ilmiy texnika jurnali” tahririyati tomonidan 2024 yil 27 aprelda tahrirdan o‘tkazildi.

Bosishga ruxsat etildi: 2024 y. Nashriyot bosma tabog‘i-3,25.
raqamli bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog‘i-1.625. Bichimi 64x108 1/16. Adadi 50.

“ALPHA BRAND” MCHJ
150107. Farg‘ona shahar, Farg‘ona ko‘chasi 86-uy