

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

TUREKEEV XOJAAXMETJAN SABI'RBAEVICH

**KREMNIYDA FOSFOR VA GALLIY BINAR BIRIKMALARINING
SHAKLLANISHINI BOSHQARISH**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent – 2023

**Fizika–matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

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

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on
physical and mathematical sciences**

Turekeev Hojaaxmetjan Sabi'rbievich Kremniyda fosfor va galliy binar birikmalarining shakllanishini boshqarish.....	3
Турекеев Хожаахметжан Сабырбаевич Управление формированием бинарных соединений фосфора и галлия в кремнии.....	21
Turekeev Hojaaxmetjan Sabi'rbievich Controlling the formation of binary compounds of phosphorus and gallium in silicon.....	39
E'lon qilingan ishlar ro'yxati Список опубликованных работ List of published works.....	43

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

TUREKEEV XOJAAXMETJAN SABI'RBAEVICH

**KREMNIYDA FOSFOR VA GALLIY BINAR BIRIKMALARINING
SHAKLLANISHINI BOSHQARISH**

01.04.10 –Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent – 2023

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy Attestatsiya komissiyasida B2022.3. PhD/FM488 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya 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 rahbari:

Zikrillaev Nurullo Fatxullaevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Egamberdiyev Baxrom Egamberdiyevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Mamadaliyeva Lola Kamiljanovna
texnika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

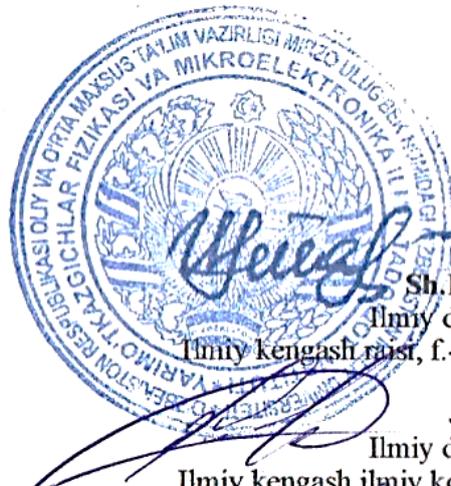
O'zR FA Fizika-texnika instituti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil «18» 10 soat 12⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Tashkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy, Tel.: (+99871)248-79-94, faks: (+99871)248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.)

Dissertatsiya bilan Raqamli ta'lim texnologiyalarini joriy etish bo'limida tanishish mumkin. (58- raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil «03» 10 kuni tarqatildi.

(2023 yil «03» 10 dagi 58- raqamli reestr bayonnomasi).



Sh.B. Utamuradova
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., professor

J. J. Hamdamov
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash ilmiy kotibi, (PhD) k.i.x.

N.A. Turgunov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi
ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., dotsent

KIRISH (Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirda dunyo miqyosida mikro- va nanoelektronikali yarimo‘tkazgichlar asosidagi qurilma va asboblarni ishlab chiqarishning jadal rivojlanishi materialshunoslik va asbobsozlik sohasida faoliyat olib borayotgan tadqiqotchi olim va mutaxassislarni yangi turdagi material va strukturalar yaratishga bo‘lgan qiziqishlarini yanada ortishiga zamin yaratadi. Bu yo‘nalishda optoelektronika va fotoenergetika sohalari uchun kremniy asosida o‘ziga xos o‘zgacha elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlarga ega materiallar va strukturalar yaratish muhim ahamiyat kasb etadi. Tadqiqotlar orqali aniqlangan kremniy kristall panjarasiga kimyoviy elementlar jadvalining III va V guruhiga oid elementlar atomlari kiritilgan kremniyning elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlari avval ma’lum bo‘lmagan jihatlarni namoyon eta olishi tadqiqotchi olim va mutaxassislarning e’tiborini tobora jalb qilmoqda. Noyob xususiyatlarga ega elektron qurilmalarni yaratish uchun tadqiq qilingan va o‘rganilgan elektrofizik xossalari tufayli (jumladan tashqi ta’sirlarga o‘ta sezuvchanligi, yorug‘likni yutish spektrini kengaytirish imkoniyati, yaratilgan qurilmalarning ishlash muddatini uzaytirishi va ishlash tezligini oshirish, issiqlik va radiatsiyaga chidamligini ko‘rsatib o‘tish mumkin) ta’qiqlangan sohada chuqur energetik sathlar hosil qiladigan kirishma atomlar bilan legirlangan kompensatsiyalangan kremniydan tobora ko‘proq foydalanilmoqda. Shu bilan birga, mikro- va nanoelektronikaning intensiv rivojlanishi optoelektronika va fotoenergetika uchun yangi imkoniyatlarga ega bo‘lgan kremniy olishning takrorlanadigan texnologiyasini ishlab chiqishni taqozo etmoqda.

Hozirgi vaqtda dunyoning yetakchi ilmiy markazlarida izlanishlar olib borayotgan tadqiqotchi olimlar kremniy asosidagi yangi materiallarni olishning turli texnologiyalarini ishlab chiqish va ularni qo‘llash natijasida olingan materiallarning elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarini o‘rganish, o‘z navbatida yangi elektron qurilmalarni ishlab chiqarishda ushbu materiallardan asos sifatida foydalanishga katta e’tibor bermoqdalar.

Respublikamizda yangi materiallar yaratish va ularni amaliyotga tatbiq etish bo‘yicha keng ko‘lamli ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda, bu esa qayta tiklanuvchi energiya manbalari samaradorligini oshirish va ulardan keng foydalanishga xizmat qiladi. 2022-2026 yillarga rejalashtirilgan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta’minlash hamda “Yashil iqtisodiyot” texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish»¹ bo‘yicha vazifalar belgilangan. Mazkur vazifalarni amalga oshirishda tarkibida yangi turdagi binar birikmalarga ega materialga asoslangan fotoelementlarni ishlab chiqish muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

Ushbu dissertatsiya ishida olib borilgan tadqiqotlar O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son «2022-2026 yillarda yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida» gi farmoni, 2020 yil 10 iyuldagi

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022–yil 28 yanvardagi PF–60–son “2022-2026 yillarda yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida” gi Farmoni.

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, 2021 yil 9 apreldagi PQ-5063-son «O'zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi va vodorod energetikasini rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi, 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-son «Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida» gi, 2023-yil 16-fevraldagi PQ-57-son «Qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi qarorlarini hamda mazkur faoliyatiga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlarining III. «Energiya, energiya resurslarni tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish» ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. So'nggi vaqtlarda nanotexnologiya va nanoelektronika sohasida ish olib boradigan olimlar va mutaxassislar kirishma atomlarining nanoklasterlarini o'rganish, xususan, turli xil kirishma atomlari asosida binar birikmalarni hosil qilish texnologiyalarini ishlab chiqishga katta e'tibor qaratmoqdalar. Chet el olimlari S. Adachi va boshqalar elementar va birikmali yarimo'tkazgichlarning fizik xossalarini o'rganishgan, shuningdek J. Kang, J.S. Kang, P. Stradins, S.H. Wei kremniydagi izovalent bo'lmagan Si-III-V va Si-II-VI qotishmali birikmalarning kovalent, ionli va aralash fazalarini tadqiq qilishgan. Rossiyalik olimlar Yu.V. Jilyaev, V.V. Krivolapchuk, N. Nazarov, I.P. Nikitina, N.K. Poletaev, D.V. Sergeev, V.V. Travnikov, L.M. Fedorov va boshqalar kremniy tagligida o'stirilgan galliy fosfid epitaksial qatlamlarning past haroratli fotolyuminesentsiyasini o'rganishgan. V.V.Evstropov, Yu.V.Jilyaev, N. Nazarov, D.V. Sergeev, L.M. Fedorov galliy fosfidning gaz fazali epitaksiyasi bilan olingan anizotipik GaP/Si geterostrukturalarining elektr va fotoelektrik xossalarini tadqiq qilishgan. Rossiyalik olimlar A.V. Uvarov, K.S. Zelentsov, A.S. Gudovskiylar atom qatlamli plazma kimyoviy cho'ktirish usulida olingan GaP/Si geterostrukturalarning fotoelektrik xossalariga termik qizdirishning ta'sirini tadqiq qilganlar.

O'zbekistonda akademik M.K. Bahadirxanov ilmiy maktabida professorlar N.F. Zikrillaev va X.M. Iliev marganets, xrom va yevropiy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda magnit nanoklasterlari hosil bo'lishini o'rgandilar va ilmiy asosladilar. Akademik A.T. Mamadalimovning ilmiy maktabida turli xil kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning fotoo'tkazuvchanligi va uni past haroratlarda tadqiq qilingan, akademik R.A. Mo'minovning ilmiy maktabida litiy bilan legirlangan kremniy asosidagi yadro nurlanish detektori ishlab chiqilgan, akademik M.A. Saidov ilmiy maktabida $(Si_2)_{1-x}(GaP)_x$ turdagi qattiq eritmalarni o'stirishning o'ziga xos jihatlari tadqiq etilgan. Akademik S.Z. Zaynabiddinov va

professor Sh.B.Utamuradova kremniyda chuqur energetik sathlar hosil qilgan kirishma atomlarining energetik sathlarini fotohajmiy spektroskopiya usuli yordamida o'rganishgan.

Biroq bugungi kunga qadar kremniy kristall panjarasida galliy va fosfor atomlari hosil qilgan birikmalarining hosil bo'lishi va ularning elektrofizik parametrlari o'rganilmagan. GaP binar birikmalari mavjud kremniy materialining elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarini boshqarish va fizik mexanizmlari o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Toshkent davlat texnika universitetining OT-F2-50 «Kremniy panjarasida $A^{II}B^{VI}$ va $A^{III}B^V$ yarimo'tkazgich birikmalarning elementar yacheykalari shakllanishining ilmiy asoslarini ishlab chiqish–fotoenergetika va fotonika uchun istiqbolli materiallar olishdagi yangi yondashuv», hamda OT-F2-55 «Yangi funktsional imkoniyatlarga ega nanomateriallarning yangi sinfi sifatidagi kirishma atomlarning nanoklasterlarini shakllanishi negizida hajmiy strukturalashgan kremniy olishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish» ilmiy loyihalari doirasida amalga oshirilgan.

Tadqiqotning maqsadi kremniy asosidagi fosfor va galliy kirishma atomlarining binar birikmalarining elektrofizik, fotoelektrik va optik xossalarini o'rganish.

Tadqiqotning vazifalari:

kremniy panjarasida fosfor va galliy kirishma atomlarining Si_2GaP turdagi binar birikmalar hosil bo'lishining optimal termodinamik sharoitlari va texnologik bosqichlarini aniqlash;

fosfor va galliy kirishma atomlarining kremniydagi kontsentratsiya taqsimotini ushbu atomlarning diffuziya koeffitsientini hisobga olgan holda tadqiq qilish;

fosfor va galliy kirishma atomlarining kristall kremniy namunalari sirt oldi qatlamida hosil qilgan binar birikmalarning zaryad tashuvchilarining harakatchanligini o'rganish;

fosfor va galliy kirishma atomlarining binar birikmalariga ega bo'lgan kremniyning elektrofizik, fotoelektrik va optik xossalarini tadqiq qilish.

Tadqiqotning ob'ekti sifatida dastlabki turli kontsentratsiyali bor va fosfor bilan legirlangan KDB va KEF markali sanoat monokristall kremniy, fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy olingan.

Tadqiqotning predmeti fosfor va galliy kirishma atomlarining kremniy panjarasidagi parametrlari va xususiyatlarini boshqarish uchun termodinamik sharoitlarini va texnologik bosqichlarni aniqlash, fosfor va galliy kirishma atomlarining binar birikmalari mavjud kremniyning elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarini o'rganishdan iborat.

Tadqiqotning usullari. Qo'yilgan vazifalarni yechish uchun quyidagi usullar qo'llanilgan: tadqiqot jarayonida kirishma atomlarni legirlash gaz fazasidan diffuzion texnologiya asosida amalga oshirilgan. Spektrometrik tadqiqotlar IKS-12 qurilmasida, Xoll o'lchashlari Van der Pauw Ecopia HMS-3000 markali qurilmada

Van-der-Pau usulida, olingan namunalarning element tarkibi EVO MA10 markali skanerlovchi elektron mikroskop va JSM-IT200 markali rasterlovchi elektron mikroskop yordamida tadqiq qilingan. Empyrean rentgen difraktometri, Senterra II The Next Level of Compact Raman Microscopy markali Raman spektroskopiyasi strukturaviy xossalarni tadqiq etish uchun foydalanilgan. DILB832 markali vakuum qurilmasida vakuum-termik bug‘lanish o‘tkazilgan. Solver Next markali atom kuchlari mikroskopida olingan kremniy namunalarning sirt morfologiyasi o‘rganilgan hamda boshqa zamonaviy standart usul va qurilmalardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor kristall panjarasida fosfor va galliy kirishma atomlariga ega bo‘lgan monokristall kremniy asosida Si_2GaP binar birikmalarini olish texnologiyasi ishlab chiqilgan;

ilk bor $T=1000\div 1250$ °C harorat oralig‘ida fosfor bilan qo‘shimcha legirlangan n-Si ga galliy kirishmasi diffuziya qilinganda galliy atomlarining konsentratsiyasi fosforsiz namunalarga nisbatan 6-10 marta oshishi aniqlangan;

galliy va fosfor kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda elektronlarning harakatchanligi faqat fosfor kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari qaranganda 2÷3 baravar kam ekanligi aniqlangan;

kremniyda binar birikmalarning mavjudligi Si_2GaP birikmali kremniy asosida yaratilgan fotoelementlarning ($\lambda=380\div 760$ nm) sezgirlik spektral diapazonining kengayishiga olib kelishi aniqlangan;

ilk bor fosfor va galliy atomlarining binar birikmalari asosida geterovarizon strukturali barqaror parametrlarga ega yuqori samarali fotoelementlarni tayyorlash bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

kremniy panjarasida Si_2GaP ko‘rinishidagi fosfor va galliy kirishma atomlari ishtirokida yangi binar birikmalar hosil bo‘lishining optimal termodinamik sharoitlari va texnologik bosqichlari $T=1000\div 1250$ °C harorat oralig‘ida bo‘lishi aniqlangan;

kremniy panjarasida hosil bo‘lgan Si_2GaP turdagi binar birikmalar asosida geterovarizon struktura olingan, bu spektral sezgirlik oralig‘i kengaytirilgan fotodiodlarni ishlab chiqish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy o‘lchash vositalar va tadqiqot usullarining qo‘llanilganligi, eksperimental va hisoblangan ma’lumotlarni boshqa mualliflarning nazariy natijalari bilan muvofiqligi, shuningdek olingan natijalarni zamonaviy fizik modellar asosida tavsiflanganligi bilan asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarning ilmiy ahamiyati geterovarizon strukturaning zaryad tashish mexanizmlari, kremniyda Si_2GaP turdagi birikmalarning shakllanish mexanizmlari nazariy jihatdan asoslangan va tajribalar orqali aniqlangan.

Tadqiqot natijalarning amaliy ahamiyati elektron qurilmalar va asboblar ishlab chiqarishda foydalanadigan kremniy asosidagi GaP binar birikmalarining geterovarizon strukturasi olishning termodinamik shartlari va texnologik bosqichlari aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy asosida yaratilgan fotodiodlarning spektral sezgirliги diapazonini kengaytirish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

ishlab chiqilgan kremniy panjarasida yangi turdagi Si₂GaP birikmalarni olish texnologiyasi «FOTON» aksiyadorlik jamiyati tomonidan qo'llanilgan («O'zeltexsanoat» uyushmasining 2022 yil 28 dekabrda 04-3/2744-son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish «FOTON» AJ da qo'llash asosida fosfor va galliy atomlarining binar birikmalarini o'z ichiga olgan monokristall kremniy asosida yaratilgan fotodiodlarning spektral sezgirliги diapazonini kengaytirishga erishilgan. Ishlab chiqilgan diffuziya texnologiyasidan foydalanish energiya sarfini tejashga va kirishma atomlarining diffuziya vaqtini kamaytirishga imkon bergan;

dissertatsiyani bajarishda olingan ilmiy natijalardan Samarqand davlat universiteti Qattiq jismlar fizikasi kafedrasida 2017-2021 yillarda OT-F2-37-raqamli "Gaz aralashmasini tovushdan tez oqimidan foydalanib metallarni eritish, g'ovak metallar olish va ularning fizik xossalarni tadqiq qilish" mavzusidagi fundamental loyihani amalga oshirishda foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2023 yil 22 fevralda 89-02-86-son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish barqaror parametrlarga ega, fosfor va galliy atomlarining binar birikmalari asosidagi geterovarizon strukturali yuqori samarador fotoelementlarini olish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 8 ta xalqaro va 2 ta respublika miqyosida o'tkazilgan ilmiy-amaliy konferentsiyalarda ma'ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha asosiy natijalar 17 ta ilmiy ishda, ulardan 7 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shu jumladan 3 ta maqola xorijiy xalqaro jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 48 ta rasm, 11 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda, 110 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya ishi mavzusining dolzarbligi, ishning maqsad va vazifalari asoslab berilgan, ishning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati qisqacha tavsiflangan, olingan asosiy natijalar va ularni «FOTON» AJ va Samarqand davlat universitetida amaliyotda qo'llanganligi to'g'risida ma'lumot berilgan.

«Uchinchi va beshinchi guruh elementlarining kremniydagi binar birikmalarining tuzilishi va xususiyatlari» nomli birinchi bobida binar nanoklasterlar, III va V guruh elementlarining kremniyda yangi binar birikmalarni shakllantirishdagi diffuziya usullari, termodinamik sharoitlar va ularning kremniydagi xususiyatlari haqida qisqacha ma'lumotlar berilgan.

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatdiki, III va V guruhlardagi elementlarning atomlari bilan legirlangan kremniyning fizik xususiyatlari va strukturaviy xarakteristikalari batafsil tadqiq qilingan. Biroq fosfor va galliy kirishma atomlari hosil qilgan binar birikmalarning kremniyga ta'siri bugungi kungacha o'rganilmaganligi ko'rsatib berilgan. Bob oxirida ushbu dissertatsiya ishini amalga oshirishdagi tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlar belgilangan.

«**Fosfor va galliyning kremniyda binar birikmalarini olish texnologiyasi va tadqiqot usullari**» deb nomlangan dissertatsiyaning ikkinchi bobida monokristall kremniyga fosfor va galliy kirishma atomlarini gaz holatidan diffuziya qilishning texnologik jarayonlarini aniqlash va tahlil qilish, hamda kirishma atomlarning kremniydagi diffuziya mexanizmlarini o'rganishga bag'ishlangan. Bu bobda dissertatsiyani bajarishda foydalanilgan elektrofizik va fotoelektrik o'lchov usullari va zamonaviy elektron mikroskop va spektrometrlarning imkoniyatlari ko'rsatib berilgan.

Fosfor va galliy atomlarining kremniyga diffuziyasini uch xil usulda amalga oshirilish texnologiyasi keltirilgan.

1. Ketma-ket diffuziya (avval fosfor atomlarining, keyin galliy atomlarining diffuziyasi).

2. Birgalikdagi diffuziya (fosfor va galliy atomlarining kukun shaklidagi galliy fosfiddan kremniyga diffuziyasi).

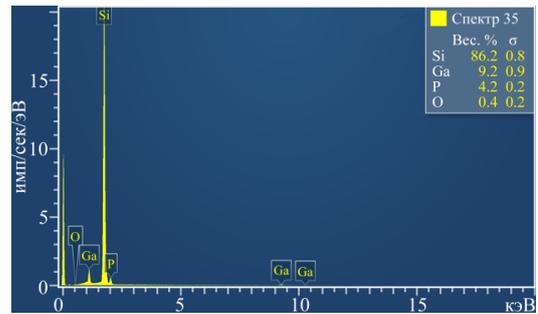
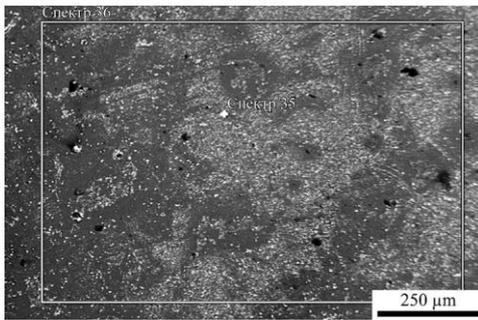
3. Kremniy namunalari sirtiga purkalgan galliy fosfidining diffuziyasi.

Ikkinchi bob oxirida fosfor va galliy atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari olishning texnologik bosqichlari hamda Si_2GaP turdagi binar birikmalari bo'lgan kremniy namunalari elektrofizik, fotoelektrik va optik tadqiq qilish usullari batafsil tavsiflangan.

«**Fosfor va galliy kirishma atomlarining kremniydagi binar birikmalarini tayyorlash texnologiyasi**» deb nomlangan uchinchi bobda galliy va fosfor kirishma atomlarining kremniydagi konsentratsiya taqsimotini tadqiq qilish natijalari va kremniy sirtida binar birikmalarning konsentratsiyasini oshirish usullari keltirilgan.

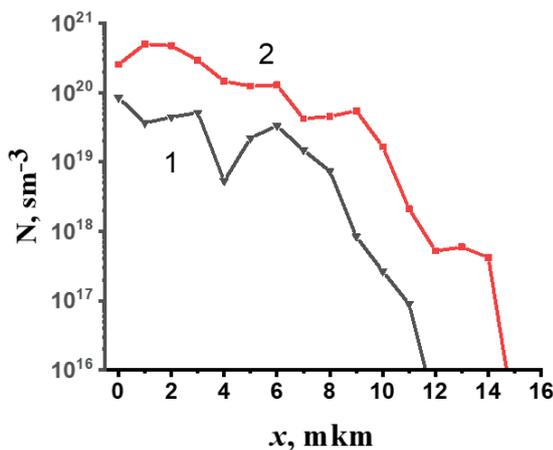
Birgalikdagi diffuziya uchun FGECH-1-17 markali sof galliy fosfid kristallini maydalash orqali olingan kukuni ishlatilgan. Kremniy namunalari kerakli mexanik va kimyoviy ishlov berilgandan so'ng galliy fosfid kukuni gaz fazasidan $T=1250\text{ }^\circ\text{C}$ da $t=2$ soat vaqt davomida diffuziya qilingan.

1-rasmda kremniy namunalari galliy va fosfor kirishma atomlari diffuziyasidan so'ng EVO MA 10 markali skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida tadqiq etish orqali olingan o'lchash natijalari ko'rsatilgan bo'lib, bu natijalar kremniy namunalari sirtida hosil bo'lgan qatlamning element tarkibini aniqlashga imkon bergan.

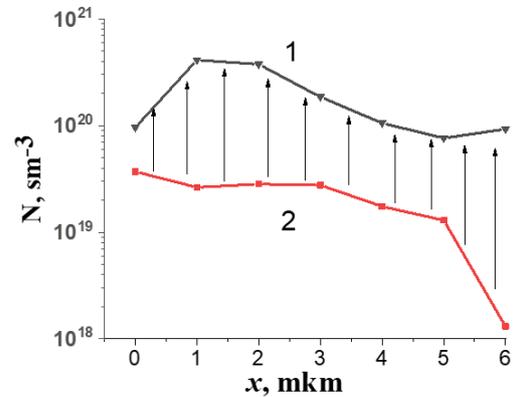


1-rasm. Si namunasi sirtining GaP kukuni diffuziyasidan keyingi tashqi ko‘rinishi (a) va element tarkibi (b)

2-rasmda kremniy namunalardagi fosfor va galliy atomlarining $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ va $t=2$ soat vaqt davomidagi diffuziyasidan keyingi konsentratsion taqsimoti keltirilgan. Shuningdek kremniyga fosfor atomlarining $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ va $t=2$ soat vaqt davomidagi diffuziyasining konsentratsion taqsimoti ham berilgan.



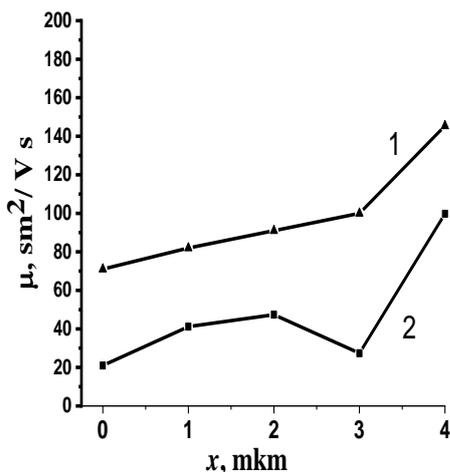
2-rasm. Zaryad tashuvchilarning $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=2$ soat diffuziyadan keyingi Ga va P atomlari bilan bir vaqtda legirlangan (1) va P atomlari bilan legirlangan (2) Si dagi konsentratsion taqsimoti



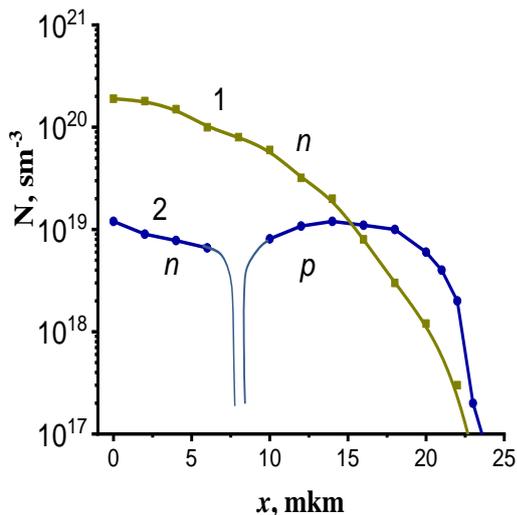
3-rasm. Namunalardagi zaryad tashuvchilarning galliy va fosfor atomlarining birgalikdagi diffuziyasidan keyingi (1) va galliy atomlarining diffuziyasidan keyingi konsentratsion taqsimoti

Olingan natijalar asosida (3-rasm, 1 va 2 egrilar) $N_{Ga} = n_0 - n_1$ elektroneytrallik tenglamasi yordamida sirtga nisbatan $x=0\div6\text{ } \mu\text{m}$ chuqurlik sohasida fosfor va galliy atomlari bilan birgalikda legirlangan kremniydagi galliy atomlarining konsentratsiyasi hisoblandi, bunda n_0 – faqat fosfor atomlari bilan $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=2$ soat vaqt oralig‘ida legirlangan namunadagi fosfor kirishma atomlarining konsentratsiyasi, n_1 – fosfor va galliy atomlari bilan birgalikda legirlangan kremniydagi fosfor atomlari konsentratsiyasi.

4-rasmda Van der Pau usuli yordamida fosfor va galliy atomlari bilan birgalikda legirlangan va faqat fosfor atomlari bilan legirlangan kremniydagi zaryad tashuvchilarning harakatchanligini sirtga nisbatan chuqurligini o‘zgarishdagi natijalar keltirilgan.



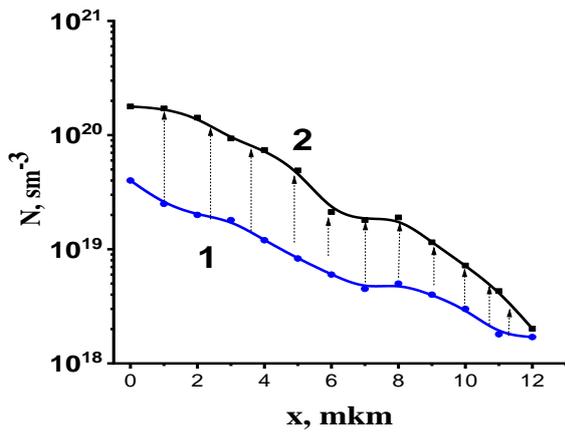
4–rasm. Fosfor kirishma atomlari (1) va fosfor va galliy kirishma atomlari birgalikda legirlangan (2) kremniydagi elektronlar harakatchanligining joylashish chuqurligiga bo‘g‘liqligi



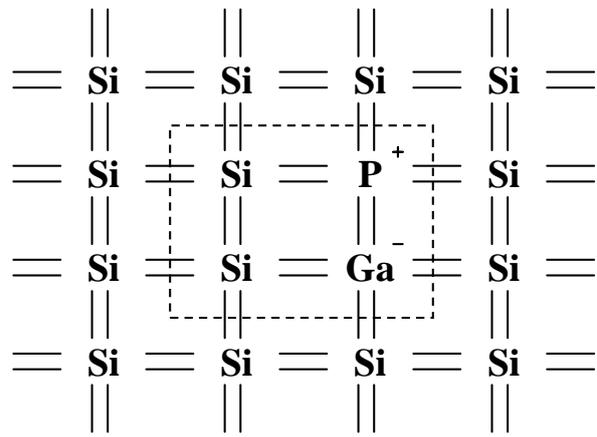
5–rasm. T=1250 °C, t=4 soat vaqtda qo‘shimcha qizdirilgan kremniy namunalaridagi P kirishma atomlarining (1), Ga zaryad tashuvchilarining oldin P bilan legirlangan kremniyning chuqurlik bo‘yicha konsentratsion taqsimoti (2). n va p –kremniyning o‘tkazuvchanlik turi

5-rasmda fosfor va galliy kirishma atomlarining ketma-ket diffuziyadan keyingi tajriba natijalari ko‘rsatilgan. T=1250 °C va t=4 soat vaqt davomida qo‘shimcha qizdirilgan kremniy namunalaridagi fosforning konsentratsion taqsimoti (1 egri), oldin fosfor bilan T=1000 °C, t=2 soat vaqt davomida legirlangan kremniyga galliy atomlarining T=1250 °C, t=4 soat vaqt davomida legirlangandagi konsentratsion taqsimoti (2 egri).

Tadqiqot natijalarini tahlil qilish asosida galliy atomlarining kremniydagi konsentratsiyasi sezilarli darajada oshishi fosfor atomlarining konsentratsiyasi galliy atomlarining konsentratsiyasidan katta yoki teng bo‘lganda sodir bo‘lishi aniqlandi ($N_p \geq N_{Ga}$) (6-rasm). Shunday qilib, fosforning yuqori konsentratsiyasi bilan kremniydagi galliy atomlari konsentratsiyasining ortishi kremniy panjarasida elektroneytral molekular ko‘rinishidagi binar birikmalarning shakllanishi bilan bog‘liqligini ta’kidlash mumkin (7-rasm).

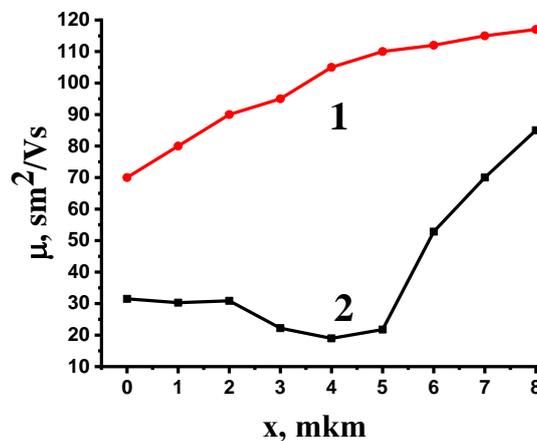


6-rasm. Nazorat namunalaridagi galliyning (1) va fosfori bor galliyning (2) konsentratsion taqsimoti



7-rasm. Kremniydagi $\text{Si}_2\text{Ga}\cdot\text{P}^+$ tipidagi binar elektroneytral birikmasi

Buni Van der Pau usuli bilan olingan kremniy namunasining qalinligi bo‘ylab zaryad tashuvchilarning harakatchanligini tadqiq qilish natijalari ham tasdiqladi. 8-rasmdan ko‘rinib turibdiki, 8 mkm chuqurlikgacha galliy atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari (fosfor atomlari bilan oldindan legirlangan) n turdagi o‘tkazuvchanlikka ega bo‘ldi. Fosfor va galliy atomlarini binar birikmalari bilan legirlangan kremniydagi elektronlarning harakatchanligi faqat fosfor atomlari bilan legirlangan namunadagi elektronlarning harakatchanligidan 2÷3 baravar kam bo‘lishi aniqlandi.



8-rasm. Si namunalariidagi faqat P atomlari bilan legirlangan (1) va galliy bilan legirlangan P atomlari bor Si namunalariidagi (2) zaryad tashuvchilari harakatchanligining chuqurlikka bog‘liqligi

Shuni ham ta’kidlash kerakki, faqat fosfor bilan legirlangan kremniydagi elektronlarning konsentratsiyasi fosfor va galliy bilan legirlangan kremniydagi elektronlar konsentratsiyasidan bir darajaga yuqori bo‘ldi.

Diffuziya uchun FGECH-1-17 markali toza monokristall galliy fosfidini maydalash yo‘li bilan olingan, 200-300 mkm kukun holdagi, galliy fosfidini

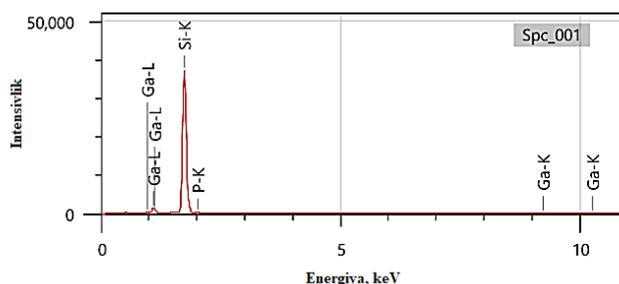
vakuumda purkalgan qatlamidan foydalanildi. Kremniy sirtiga qalinligi ~1 mkm bo‘lgan yupqa qatlam DILB832 vakuum qurilmasida termik bug‘latish usuli bilan hosil qilindi.

GaP yupqa qatlamga ega kremniy namunalarining sirt morfologiyasi va tarkibini aniqlash uchun JSM-IT200 markali rasterlovchi elektron mikroskop (REM) yordamida tekshirildi (9-rasm va 1-jadval).

1-jadval va 9-rasmga skanerlovchi elektron mikroskop yordamida aniqlangan kremniy sirtidagi GaP yupqa qatlamining tarkibi ko‘rsatilgan.

1-jadval.

Element	Mass %	Atom %
Si	90,62±0,23	94,12±0,24
P	3,74±0,08	3,52±0,07
Ga	5,65±0,18	2,36±0,08

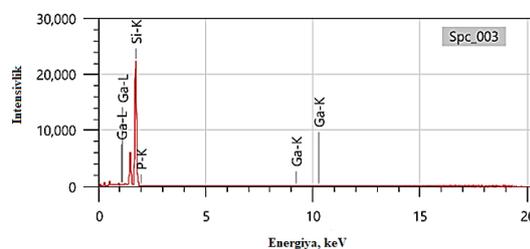


9-rasm. Kremniy sirtida hosil qilingan galliy fosfidi yupqa qatlamining element tarkibi

Hosil qilingan GaP yupqa qatlamining diffuziyasidan keyingi uning tarkibi rasterlovchi elektron mikroskop JSM-IT200 yordamida qayta tadqiq qilindi (10-rasm va 2-jadval).

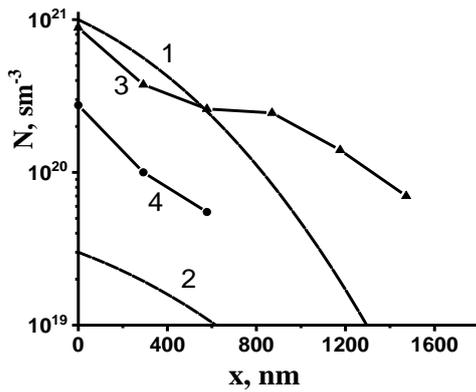
2-jadval

Element	Mass %	Atom %
Si	97,52±0,32	98,29±0,33
P	1,39±0,08	1,27±0,07
Ga	1,10±0,14	0,45±0,06

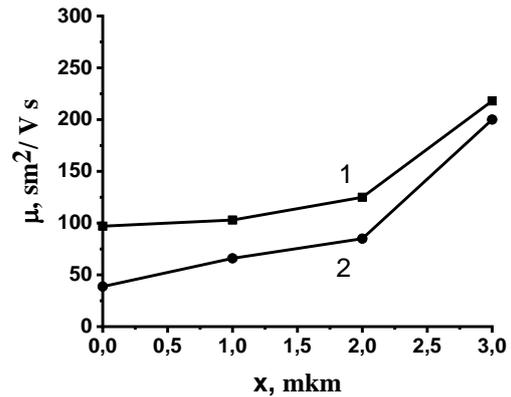


10-rasm. Purkalgan GaP qatlamidan Ga va P atomlari diffuziya qilingandan keyingi Si sirtining element tarkibi

11-rasmga kremniy namunasining yon tomondan REM JSM-IT200 yordamida o‘lchangan fosfor va galliy kirishma atomlarining konsentratsion taqsimoti keltirilgan.



11-rasm. GaP purkalgan qatlamidan Ga va P atomlari Si ga kiritilgan namunaning yon tomonidan REM yordamida o‘lchangan konsentratsion taqsimoti. Nazariy hisoblangan natija bo‘yicha P atomlari uchun (1), Ga atomlari uchun (2), tajribada aniqlangan natija bo‘yicha P atomlari uchun (3), Ga atomlari uchun (4)



12-rasm. Fosfor kirishma atomlari bilan legirlangan (1) va galliy fosfidining purkalgan qatlamidan legirlangan (2) kremniydagi zaryad tashuvchilarning harakatchanligining joylashish chuqurligiga bog‘liqligi

12-rasmda kremniy namunalarning zaryad tashuvchilar harakatchanligining chuqurlik bo‘yicha Van-der-Pau usulida aniqlangan taqsimoti keltirilgan. Harakatchanlikning bunday kuchli pasayishi galliy atomlarining elektroaktiv qismi mavjudligi bilan bog‘liq bo‘lib, uni ionlashgan fosfor konsentratsiyasi bilan solishtirish (fosforning elektroaktiv konsentratsiyasining yarmi tartibida), shuningdek hosil bo‘lgan birikmalar ta’sirida elektronlar tarqalishining ortishi bilan taxmin qilish mumkin.

Bundan tashqari, zaryad tashuvchilarning harakatchanligining pasayishi panjara bir hil bo‘lmaganligi bilan bog‘liq sochilishi (kremniy panjarasida $(\text{GaP})_n$ turdagi multikomplekslar) va ularning sirt konsentratsiyasi yetarlicha yuqori bo‘lganligi sababli bo‘lishi mumkin.

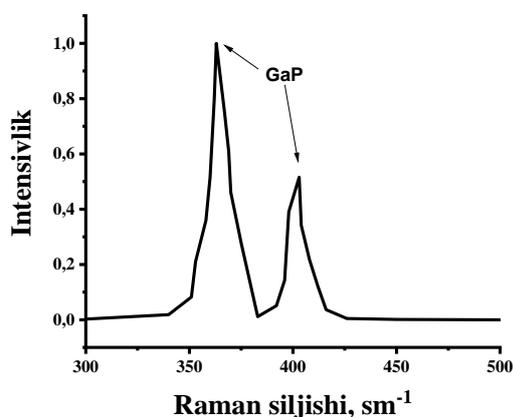
Kremniy panjarasidagi galliy va fosfor atomlarining o‘zaro ta’sirining Kulon energiyasi qiymatini nazariy hisoblashlar uning $\sim 0,5$ eV ga teng bo‘lishi aniqlandi. Bu Arrenius nisbati bo‘yicha muvozanat sharoitida galliy atomlari konsentratsiyasini ~ 10 martagacha oshishiga olib kelishi mumkinligini ko‘rsatdi va bu olingan tajriba natijalariga mos keladi.

«Fosfor va galliy kirishma atomlarining binar birikmalari mavjud kremniyning fotoelektrik va optik xususiyatlari» nomli to‘rtinchi bobda diffuziya usuli bilan gaz fazasidan fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning fotoelektrik va optik xususiyatlari o‘rganilgan. Hosil bo‘lgan binar birikmalarning fotoelektrik va optik tadqiqotlarining natijalari, yorug‘likning kombinatsion sochilish spektri va namunalarning element tarkibining rentgenogrammasi keltirilgan. Kremniyda fosfor va galliy atomlarining binar

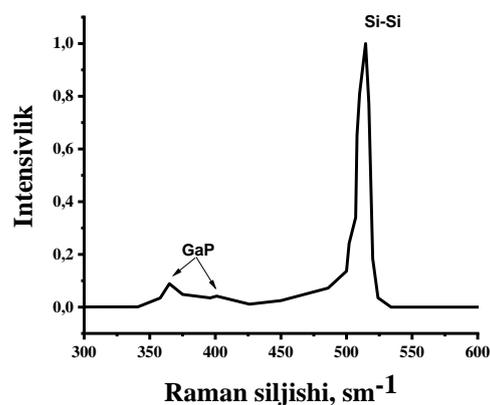
birikmalarining shakllanish mexanizmi taklif etilgan, tadqiqotlar natijalariga asoslangan asosiy ilmiy xulosalar keltirilgan.

13-rasmda monokristall galliy fosfidi namunasining yorug'likning kombinatsion sochilishidagi spektri ko'rsatilgan. $T=300$ K haroratda olingan spektrlarning tahlili shuni ko'rsatdiki, spektrda galliy fosfid atomlariga mos keladigan ~ 363 sm^{-1} va ~ 403 sm^{-1} cho'qqilari kuzatildi.

Galliy va fosfor kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning $T=300$ K haroratda yorug'likning kombinatsion sochilishining spektrida 365 sm^{-1} , 404 sm^{-1} va 514 sm^{-1} cho'qqilar kuzatildi (14-rasm). Bu kremniy sirtida fosfor va galliy kirishma atomlarining birikmalarini hosil bo'lishini taxmin qilishga imkon beradi.

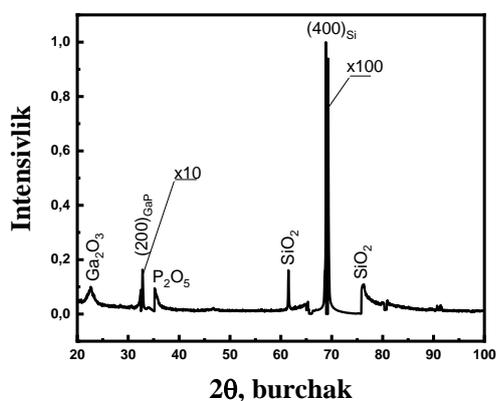


13-rasm. FGECH-1-17 markali sof galliy fosfida yorug'likning kombinatsion sochilish spektri



14-rasm. Fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda yorug'likning kombinatsion sochilish spektri

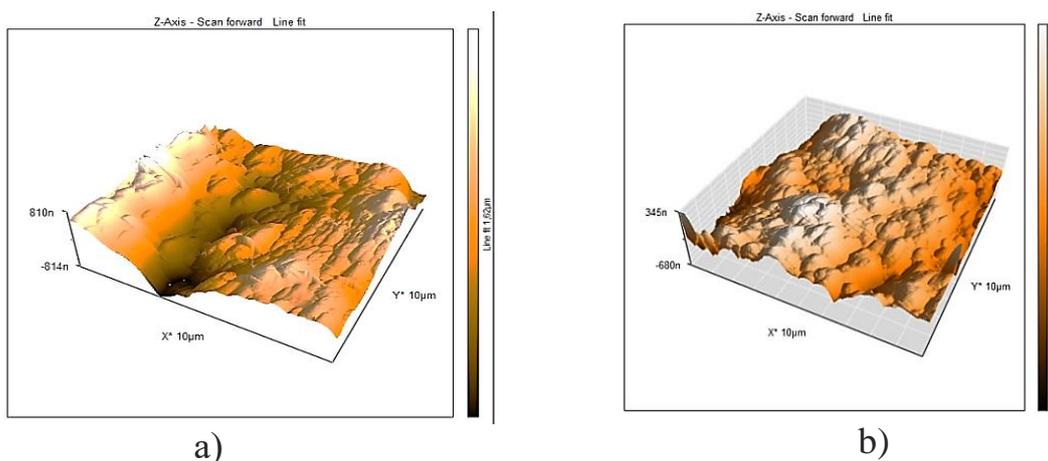
15-rasmda fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning rentgenogrammasi keltirilgan.



15-rasm. Ga va P kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning rentgenogrammasi

Difraksiya tasviridan ko‘rinib turganidek, turli xil intensivlikda bir nechta reflekslar hosil bo‘ldi. $h00$ turdagi bir necha reflekslar ($h=1,2,3,\dots$), yuqori intensivlikda 200_{GaP} $d/n=0,546$ nm va 400_{Si} $d/n=0,27$ nm reflekslar kuzatildi. 400_{Si} refleksining nisbatan tor, ammo yuqori intensivligi ($4 \cdot 10^5$ impuls/s) kremniyning asosiy matritsa atomlariga mos kelishi aniqlandi.

16-rasmda AKM yordamida olingan fosfor va galliy atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari sirtining rasmi ko‘rsatilgan. Rasmdan ko‘rinadi, kremniy namunalari sirtining tashqi ko‘rinishi fosfor va galliy kirishma atomlari hosil qilgan birikmalarning kontsentratsiyasi va zaryadiga bog‘liq bo‘lib sirt relefining notekisligi kuchli bo‘lishiga sabab bo‘lar ekan.



16-rasm. Fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlangan (a) va fosfor kirishma atomlari bilan legirlangan (b) kremniy yuzasining AKMda olingan rasmlari

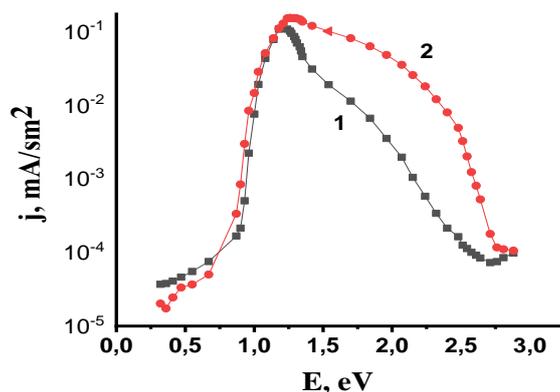
Rasmdan ko‘rinadi, fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy sirtida tarkibiy qismlarga asoslangan orolchalarning shakllanishi fosfor kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyga qaraganda o‘rtacha g‘adur-budurligini $\sim 1,6$ baravar oshiradi.

Ma‘lumki, kremniy panjarasida fosfor atomlari kristall tugunlarida musbat zaryadlangan ion – P^+ ko‘rinishida joylashgan bo‘lib, o‘tkazuvchanlik sohasida qo‘shimcha elektronlarni hosil qiladi, ularning qiymati $N_{p^+}=n$ ga teng bo‘ladi. Musbat zaryadlangan fosfor (P^+) atomlari kristall sirtidan kremniy chuqurligiga qarab taqsimlangan elektr potentsiallarini hosil qiladi va diffuziya paytida galliy atomlarining kontsentratsiyasi ortishiga sabab bo‘ladi. Bu o‘z navbatida kremniyda manfiy galliy (Ga^-) ionlari shaklidagi aktseptorlarni hosil qiladi. Fosfor va galliy atomlari o‘zaro ta‘sir natijasida kremniy panjarasida donor-aktseptor binar birikmalarini, ya‘ni neytral kvazi-molekulalarni $[Ga^-P^+]$ shakllantiradi.

17-rasmda faqat fosfor atomlari bilan legirlangan (1-egri chiziq) va galliy fosfidi bilan legirlangan (2-egri chiziq) kremniy asosida olingan p-n o‘tishning qisqa tutashuv tokining spektral sezgirligi keltirilgan.

Fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning fotoelektrik xossalari spektr sezuvchanligidan ko‘rinadigan nurlarining soha oralig‘i tomon

sezilarli kengayadi. Bunday muhim ilmiy natijalar kremniyda Si_2GaP turidagi binar birikmalar shakllanadi deb taxmin qilishga asos bo‘ladi.



17-rasm. P kirishma atomlari bilan (1) va Ga va P kirishma atomlari bilan (2) legirlangan Si ning fotoelektrik xossalari

Kremniy panjarasida galliy va fosfor kirishma atomlarining binar birikmalarining shakllanish mexanizmlari

Olingan tajriba natijalarini donor (P) va aktseptor (Ga) kirishma atomlarining o‘zaro kompensatsiyasi bilan izohlab bo‘lmaydi. Si panjarasida P va Ga atomlari xaotik taqsimlanadi va bu atomlar Si da fazoviy ravishda bir-biridan ajralgan bo‘ladi. Bu P atomlarining muayyan konsentratsiyasida Ga atomlarining konsentratsiyasi oshishiga ta‘sir qilishini anglatmaydi. Shuning uchun olingan tadqiqot natijalaridan Ga va P atomlarining kremniyda birikmalar hosil qilib o‘zaro ta‘sirlashishi bilan tushuntirish mumkin.

Olingan natijalarni tahlil qilish ko‘rsatadi ki bunday birikmalar faqat Ga va P atomlari o‘zaro yaqin joylashgan hollarda, ya‘ni Si panjarasida qo‘shni ikkita tugunni egallaganlarida mavjud bo‘lishi mumkin.

Bu omillarning barchasi fosfor va galliy binar birikmalarining shakllanishini rag‘batlantiradi. Si da P atomlarining etarlicha yuqori konsentratsiyasini mavjudligi Ga atomlari diffuziya qilganda ularning konsentratsiyasini oshirishi uchun yanada qulay sharoit yaratadi. Shunday qilib, Ga atomlarining Si dagi miqdorining oshishi P konsentratsiyasining Si panjarasida elektroneytral molekular shaklida birikmalarining shakllanishi bilan bog‘liq deb ta‘kidlash mumkin.

Shu bilan birga, Si panjarasining qo‘shni tugunlarida joylashgan Ga va P binar birikmalarini shakllantirish bilan bog‘liq quyidagi juda qiziqarli holatlarni ham ta‘kidlash kerak. Si panjarasida bunday birikmalar hosil bo‘lganda, Si_2GaP^+ turdagi yangi binar elektroneytral birikmalar hosil bo‘lar ekan.

Bunday binar birikmalar, boshlang‘ich Si ning elementar panjarasidan farqli o‘laroq qisman ion, qisman kovalent bog‘lanishlarga va ularga mos energetik tuzilishga ega bo‘ladi. Bunday binar birikmalarining yetarlicha yuqori konsentratsiyalarida bo‘lishi Si ning elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlariga sezilarli ta‘sir ko‘rsatar ekan, ya‘ni Si ning asosiy elektrofizik

parametrlarida sezilarli o'zgarishlarga olib keldi, bu bizga Si asosidagi yangi materialni olishga imkon beradi.

Xulosa o'rnida, ushbu dissertatsiya ishimni bajarishda o'zlarining amaliy va qimmatli maslahatlari bilan yordam bergan rahmatli ustozim akademik M.K.Baxadirxanovga, ilmiy rahbarim professor N.F.Zikrillaevga va TDTU «Raqamli elektronika va mikroelektronika» kafedrasining barcha jamoasiga yordamlari va qo'llab quvvatlaganlari uchun o'zimning chuqur minnotdarchiligimni bildiraman.

XULOSA

1. Ilk bor kremniy panjarasida Si_2GaP ko'rinishidagi fosfor va galliy kirishma atomlari ishtirokida yangi binar birikmalar hosil bo'lishining termodinamik shartlari aniqlandi. $T=1000\div 1250$ °C harorat oralig'ida fosfor va galliy kirishma atomlari bilan legirlanganda kremniy panjarasida binar birikmalarni shakllantirishning optimal texnologik rejimlari aniqlandi.

2. Fosfor atomlarining yuqori konsentratsiyasi bilan oldindan legirlangan kremniyda ($N_P \geq N_{Ga}$) galliy kirishma atomlarining diffuziyasida konsentratsiyasi sezilarli darajada oshishi aniqlangan.

3. Ilk bor bir vaqtning o'zida galliy va fosfor kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari elektronlarning harakatchanligi faqat fosfor kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari qaraganda 2–3 baravar kam ekanligi aniqlandi.

4. Kremniy panjarasida hosil bo'lgan galliy-fosfor binar birikmalarining Kulon bog'lanish energiyasi $\sim 0,5$ eV ga teng ekanligi aniqlandi.

5. Kremniy panjarasida fosfor va galliyning binar birikmalari shakllanganda qisman ion va qisman kovalent bog'lanishga va mos energetik tuzilishga ega Si_2GaP tipidagi yangi elektroneytral binar birikmalar hosil bo'lishi aniqlandi.

6. Kremniyda binar birikmalarning mavjudligi Si_2GaP birikmali kremniy asosida yaratilgan fotoelementlarning ($\lambda=380\div 760$ nm) sezgirlik spektral diapazonining kengayishiga olib kelishi aniqlandi.

7. Ilk bor fosfor va galliy atomlarining binar birikmalari asosida geterovarizon strukturali barqaror parametrlarga ega yuqori samarali fotoelementlarni tayyorlash bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
УЗБЕКИСТАНА**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ТУРЕКЕЕВ ХОЖААХМЕТЖАН САБЫРБАЕВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ БИНАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ФОСФОРА И ГАЛЛИЯ В КРЕМНИИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент - 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2022.3. PhD/FM488

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

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

Научный руководитель: **Зикриллаев Нурулло Фатхуллаевич**
доктор физико-математических наук, профессор

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

Мамадалиева Лола Камилжановна
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: **Физико-технический институт Ан РУз**

Защита диссертации состоится «18» «10» 2023 г. в 12⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871)248-79-94, факс: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения цифровых образовательных технологий института (зарегистрирована за № 58) по адресу: 100057, Узбекистан, г.Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871)248-79-59.

Автореферат диссертации разослан «03» 10 2023 г.
(реестер протокола рассылки № 58 от 03.10 2023 г.).



Ш.Б. Утамурадова
председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

Ж.Ж. Хамдамов
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор философских наук (PhD), с.н.с.

Н.А. Тургунов
Председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время интенсивное развитие производства микро- и нанoeлектронных полупроводниковых материалов, приборов и устройств на их основе во всем мире служит стимулом для повышения интереса ученых и специалистов, работающих в области материаловедения и приборостроения к созданию новых видов материалов и структур. В этом направлении более актуальным является получение материалов с новыми электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами на основе кремния для оптоэлектроники и фотоэнергетики. Изучение электрических и фотоэлектрических свойств кремния, легированного элементами III и V групп таблицы химических элементов, привлекает все большее внимание ученых и специалистов своими, установленными путем исследований новыми, ранее неизвестными электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами. Благодаря своим обнаруженным и изученным электрофизическим свойствам (например, высокая фоточувствительность, возможность расширения области спектра поглощения, увеличение времени функционирования, быстроедействие, термостабильность и радиационная стойкость), компенсированный кремний, легированный примесными атомами, которые создают глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне, все более широко применяется для создания электронных устройств с уникальными свойствами. Вместе с тем интенсивное развитие микро- и нанoeлектроники требует разработки воспроизводимой технологии получения новых материалов на основе кремния для оптоэлектроники и фотоэнергетики с новыми возможностями.

В настоящее время ученые исследователи ведущих мировых научных центров уделяют большое внимание разработке различных технологий создания новых материалов на основе кремния, изучению электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств материалов, полученных с помощью разработанных технологий, и в свою очередь применению этих материалов в качестве основы в производстве новых электронных устройств.

В нашей Республике осуществляются широкомасштабные исследования по созданию новых материалов и внедрению их в практику, которые будут способствовать повышению эффективности и широкому использованию возобновляемых источников энергии. В «Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», среди прочего, поставлены задачи «Непрерывного снабжения экономики электроэнергией и активного внедрения технологий «Зеленой экономики» во все отрасли, повышения энергоэффективности экономики на 20 процентов»¹. При реализации этих задач одной из важных задач считается разработка фотоэлементов с новыми типами бинарных соединений.

¹Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы».

Данная диссертационная работа в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 года, в постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции путем повышения энергоэффективности экономики и задействования имеющихся ресурсов» от 10 июля 2020 года, № ПП-5063 «О мерах по развитию возобновляемой и водородной энергетики в Республике Узбекистан» от 9 апреля 2021 года, № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года, № ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий» от 16 февраля 2023 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах, а также поставленных в других нормативных актах, связанных с данной деятельностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. В последнее время ученые и специалисты в области нанотехнологий и наноэлектроники уделяют большое внимание изучению нанокластеров примесных атомов, в частности разработке технологий получения бинарных соединений на основе различных примесных атомов с управляемой структурой и составом. Зарубежные ученые S.Adachi и другие изучали физические свойства элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений, J. Kang, J.S. Kang, P. Stradins, S.H. Wei исследовали ковалентные, ионные и смешанные фазы неизовалентных сплавов соединений Si-III-V и Si-II-VI в кремнии. В своих работах российские ученые Ю.В. Жилияев, В.В. Криволапчук, Н. Назаров, И.П. Никитина, Н.К. Полетаев, Д.В. Сергеев, В.В. Травников, Л.М. Федоров и другие изучали низкотемпературную фотолюминесценцию эпитаксиальных пленок фосфида галлия, выращенных на кремниевых подложках. Электрические и фотоэлектрические свойства анизотипных GaP/Si гетероструктур, полученных методом газофазной эпитаксии фосфида галлия исследовались авторами В.В. Евстроповым, Ю.В. Жилияевым, Н. Назаровым, Д.В. Сергеевым, Л.М. Федоровым. Российские ученые А.В. Уваров, К.С. Зеленцов, А.С. Гудовских исследовали влияние термического отжига на фотоэлектрические свойства гетероструктур GaP/Si, полученных методом атомно-слоевого плазмохимического осаждения.

В Узбекистане в научной школе академика М.К. Бахадырханова, профессорами Н.Ф. Зикриллаевым и Х.М. Илиевым было исследовано и научно обосновано формирование магнитных нанокластеров в кремнии, легированном примесными атомами марганца, хрома и европия. В научной школе академика А.Т. Мамадалимова исследовались фотопроводимость и температурное гашение фотопроводимости кремния, легированного различными примесными атомами, в научной школе академика Р.А. Муминова был разработан детектор ядерного излучения на основе кремния легированного литием, в научной школе академика М.А. Саидова исследовались особенности выращивания твердых растворов типа $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$. Академик С.З. Зайнабиддинов и профессор Ш.Б. Утамурадова с помощью метода фотоэмиссионной спектроскопии изучали энергетические уровни примесных атомов, образующих глубокие энергетические уровни в кремнии.

Однако до настоящего времени не исследовано получение бинарных соединений фосфида галлия в кристаллической решетке кремния и их электрофизические параметры. Также не изучены физические механизмы управления электрофизическими, фотоэлектрическими и оптическими свойствами кремния с бинарными соединениями GaP.

Связь диссертационного исследования с планом научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена по плану научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета при выполнении программы государственных грантов: ОТ-Ф2-50 «Разработка научных основ формирования элементарных ячеек $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ и $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ в решетке кремния – новый подход в получении перспективных материалов для фотоэнергетики и фотоники», а также ОТ-Ф2-55 «Разработка научных основ формирования нанокластеров примесных атомов, как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями»

Целью исследования является исследование электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств бинарных соединений примесных атомов фосфора и галлия на основе кремния.

Задачи исследования:

определение оптимальных термодинамических условий и технологических режимов формирования бинарных соединений примесных атомов фосфора и галлия типа Si_2GaP в решетке кремния;

исследование концентрационного распределения примесных атомов фосфора и галлия в кремнии с учетом коэффициента диффузии этих атомов;

исследование подвижности носителей заряда бинарных соединений примесных атомов фосфора и галлия, образованного в приповерхностном слое образцов кристаллического кремния;

исследование электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств кремния с бинарными соединениями примесных атомов фосфора и галлия.

Объектом исследования является промышленный монокристаллический кремний марки КДБ и КЭФ с различной концентрацией, исходного бора и фосфора, диффузионно легированный атомами фосфора и галлия.

Предметом исследования является определение термодинамических условий и технологических режимов управления параметрами и поведением атомов примесей галлия и фосфора в решетке кремния, и изучения электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств кремния с бинарными соединениями атомов примесей фосфора и галлия.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: в процессе исследований использована технология диффузионного легирования атомами примеси из газовой фазы. Спектрометрические исследования проводились на установке ИКС-12, Холловские измерения - на установке Van der Pauw Escoria HMS-3000 методом Ван-дер-Пау, изучение элементного состава полученных образцов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа марки EVO MA10 и растровым электронным микроскопом марки JSM-IT200. Рентгеновский дифрактометр Empyrean, Рамановская спектроскопия для структурного анализа марки Senterra II The Next Level of Compact Raman Microscopy использовались для исследования структурных свойств. Вакуумно-термическое испарение производилось на вакуумной установке марки DILB832. Атомно-силовой микроскоп марки Solver Next использовался для анализа морфологии поверхности полученных образцов кремния, а также использовались другие стандартные методы и устройства.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые разработана технология получения бинарных соединений Si_2GaP в монокристаллическом кремнии, содержащем в кристаллической решетке примесные атомы фосфора и галлия;

впервые обнаружено, что при диффузии примеси галлия в n-Si, дополнительно легированный фосфором в интервале температур $T=1000\div 1250^\circ\text{C}$, концентрация атомов галлия в 6-10 раз больше по сравнению с образцами без дополнительного слоя фосфора;

установлено, что в кремнии, легированном примесными атомами галлия и фосфора, подвижность электронов в 2÷3 раза меньше, чем в образцах кремния, легированных только атомами фосфора;

обнаружено, что наличие бинарных соединений в кремнии приводит к расширению спектрального диапазона чувствительности фотоэлементов ($\lambda=380\div 760$ нм), созданных на основе кремния с Si_2GaP ;

впервые разработаны рекомендации по получению высокоэффективных фотоэлементов с гетероваризонной структурой на основе бинарных

соединений атомов фосфора и галлия, обладающих стабильными параметрами.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: определены оптимальные термодинамические условия и технологические режимы формирования новых бинарных соединений с участием примесей атомов галлия и фосфора в решетке кремния типа Si_2GaP в интервале температур $T=1000\div 1250$ °С;

получена гетероваризонная структура на основе бинарных соединений типа Si_2GaP в решетке кремния, которая позволила разработать фотодиоды с расширенными спектральными диапазонами чувствительности.

Достоверность результатов исследований обосновывается применением современных измерительных средств и методов исследования, соответствием экспериментальных и расчетных данных с теоретическими результатами других авторов, а также трактовкой полученных результатов на основе современных физических моделей.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в том, что выявлены механизмы переноса заряда гетероваризонной структуры, теоретически обоснованы и экспериментально установлены механизмы образования соединений типа Si_2GaP в кремнии.

Практическая значимость результатов исследования заключается в определении оптимальных технологических режимов получения гетероваризонных структур бинарных соединений GaP на основе кремния для использования в производстве электронных приборов и устройств.

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных научных результатов по расширению диапазона спектральной чувствительности фотодиодов, созданных на основе кремния, легированного атомами примесей фосфора и галлия:

разработанная технология получения новых бинарных соединений типа Si_2GaP в решетке кремния была использована акционерным обществом «FOTON» (Справка №04–3/2744 ассоциации «Узэлтехсаноат» от 28.12.2022 года). Использованием научных результатов в АО «ФОТОН», достигнуто расширение диапазона спектральной чувствительности фотодиодов, созданных на основе монокристаллического кремния, содержащего бинарные соединения атомов фосфора и галлия. Использование разработанной диффузионной технологии позволило сэкономить электроэнергию и сократить время диффузии примесных атомов;

научные результаты, полученные в процессе работы над диссертацией, использованы при выполнении фундаментального проекта на кафедре физики твердого тела Самаркандского государственного университета № ОТ-Ф2-37 “Плавление металлов с использованием сверхзвукового потока газовой смеси, получение щелочных металлов и исследование их физических свойств”, в 2017-2021 годах (Справка Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан от 22 февраля 2023 года № 89-02-

86). Использование научных результатов позволило получить высокоэффективные фотоэлементы с гетероваризонной структурой на основе бинарных соединений атомов фосфора и галлия, обладающие стабильными параметрами.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 17 научных трудах, из них 7 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 3 статьи в зарубежных международных реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 110 страниц, включая 48 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В **вводной** части приводятся актуальность темы диссертационной работы, обоснованы цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость работы, кратко описаны основные полученные результаты и сведения о внедрении их на заводе АО «FOTON» и в Самаркандском государственном университете.

В первой главе под названием «**Структура и свойства кремния с бинарными соединениями элементов третьей и пятой групп**», приведен краткий литературный обзор о диффузионных методах формирования бинарных нанокластеров – новых бинарных соединений III и V групп, термодинамические условия и поведение их в кремнии.

Анализ литературных данных показал, что подробно исследованы физические свойства и структурные характеристики кремния, легированного примесными атомами III и V групп. Однако, до настоящего времени не было исследовано влияние бинарных соединений образованных атомами примесей фосфора и галлия в кремнии. В конце главы показаны основные направления исследований при выполнении данной диссертационной работы.

Вторая глава «**Технология получения и методы исследований бинарных соединений фосфора и галлия в кремнии**» посвящена анализу и подбору технологических режимов диффузионного легирования из газовой фазы монокристаллического кремния атомами примесей фосфора и галлия, а также изучению механизмов диффузии атомов этих примесей в кремнии. Описаны методы электрофизических и фотоэлектрических измерений и возможности современных электронных микроскопов и спектрометров, которые были использованы в процессе выполнения диссертационной работы.

Диффузия атомов фосфора и галлия в кремний осуществлялась тремя различными способами.

1. Последовательная диффузия (сначала диффузия атомов фосфора, затем атомов галлия).
2. Одновременная диффузия (диффузия порошкообразного фосфида галлия в кремний).
3. Диффузия из напыленного на поверхности образцы кремния фосфида галлия.

В конце второй главы подробно описаны технологические режимы получения образцов кремния, легированных атомами фосфора и галлия, методы электрофизических, фотоэлектрических и оптических исследований, полученных образцов кремния с бинарными соединениями типа Si_2GaP .

В третьей главе «**Фундаментальные параметры кремния с бинарными соединениями примесей атомов фосфора и галлия**» представлены результаты исследования концентрационных распределений и методов повышении концентрации бинарных соединений фосфида галлия на поверхности кремния.

Для совместной диффузии был использован порошок, полученный путем измельчения чистого кристалла фосфида галлия марки ФГЭЧ-1-17. После необходимых механических и химических обработок образцов кремния проводилась диффузия из газовой фазы порошка фосфида галлия при $T=1250\text{ }^\circ\text{C}$ в течение $t=2$ часов.

На рис.1 представлены результаты исследования образцов кремния, после диффузии в них атомов примесей галлия и фосфора, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа марки EVO MA 10 (СЭМ), и позволяющие определить элементный состав слоя, образованного на поверхности образцов кремния.

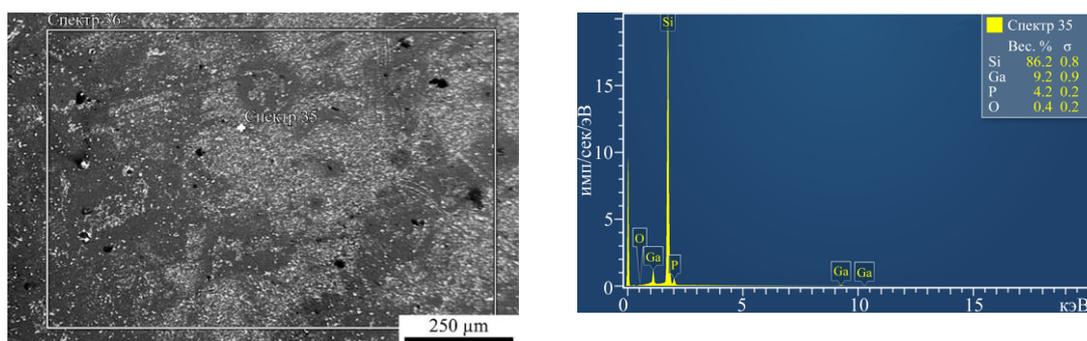


Рис.1. Внешний вид (а) и элементный состав (б) поверхности образца Si после диффузии из порошка GaP

На рис.2 представлено концентрационное распределение атомов галлия и фосфора в кремнии после диффузии при $T=1250\text{ }^\circ\text{C}$, в течение $t=2$ часов. Также представлено концентрационное распределение атомов фосфора после диффузии при $T=1250\text{ }^\circ\text{C}$, в течение $t=2$ часа.

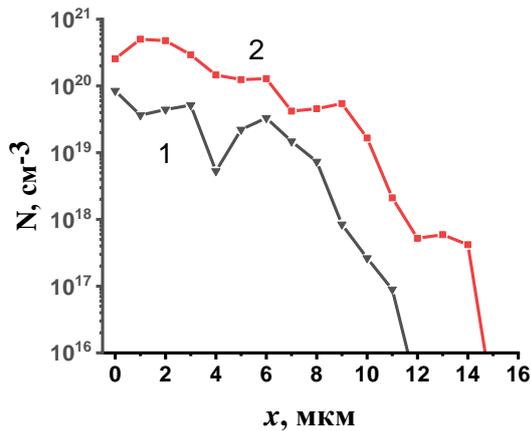


Рис.2. Концентрационное распределение носителей заряда в Si, одновременно легированном атомами Ga и P (1) и легированном атомами P (2) после диффузии при $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=2$ часам

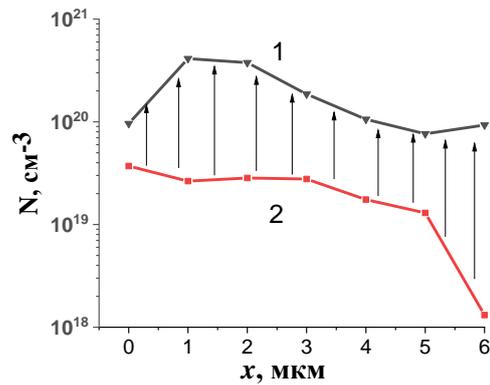


Рис. 3. Концентрационное распределение носителей заряда в образцах после одновременной диффузии атомов галлия и фосфора (1) и диффузии атомов галлия (2)

На основе полученных результатов (рис. 3, кривые 1 и 2) вычислялась концентрация примесных атомов галлия по глубине при наличии фосфора на основе решения уравнения нейтральности $N_{Ga} = n_0 - n_1$, в интервале глубины $x=0\div 6$ мкм, где: n_0 – концентрация электронов в образцах, легированных только фосфором при $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=2$ часа, n_1 – концентрация электронов в образцах, легированных одновременно атомами галлия и фосфора.

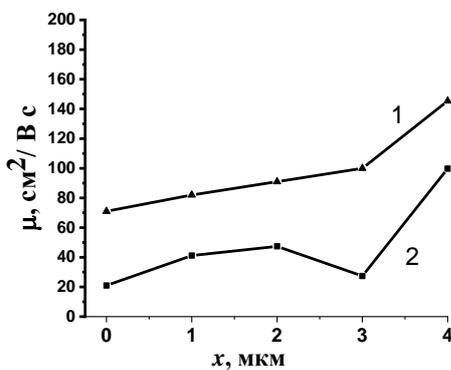


Рис. 4. Зависимость подвижности электронов от глубины залегания атомов примесей в кремнии, легированном атомами фосфора (1) и одновременно атомами галлия и фосфора (2)

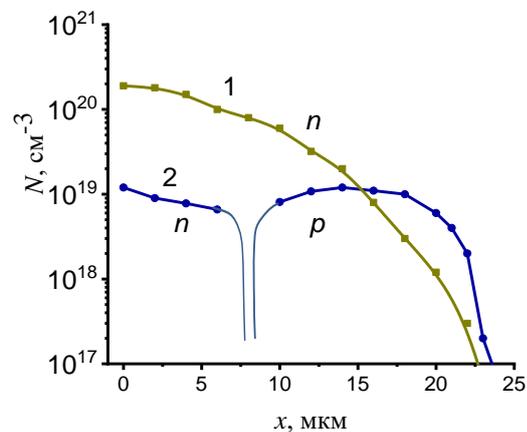


Рис. 5. Концентрационное распределение атомов P (1) в образцах кремния, отожжённых при $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=4$ ч, носителей заряда (2) атомов Ga в кремнии предварительно легированном атомами P в зависимости от глубины залегания для n и p - типа образцов

Результаты исследования подвижности носителей заряда в кремнии, легированном одновременно галлием и фосфором и легированном только фосфором, показанные на рис. 4, получены методом Ван дер Пау.

На рис.5 представлены экспериментальные результаты после последовательной диффузии примесей атомов фосфора и галлия. Концентрационное распределение атомов фосфора в контрольных образцах кремния, которые подвергались дополнительному термоотжигу при $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=4$ часам (кривая 1), а также концентрационное распределение носителей заряда в образцах кремния, легированного атомами галлия при $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=4$ часа, которые были предварительно легированы атомами фосфора при $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=2$ часа (кривая 2).

Из анализа полученных результатов исследования было установлено, что заметное повышение концентрации атомов галлия в кремнии происходит при значениях концентрации атомов фосфора, больших или равных концентрации атомов галлия ($N_p \geq N_{Ga}$) (рис.6). Таким образом, можно утверждать, что повышение концентрации атомов галлия в кремнии с повышенной концентрацией фосфора связано с образованием бинарных соединений в виде электронейтральных молекул в решётке кремния (рис.7).

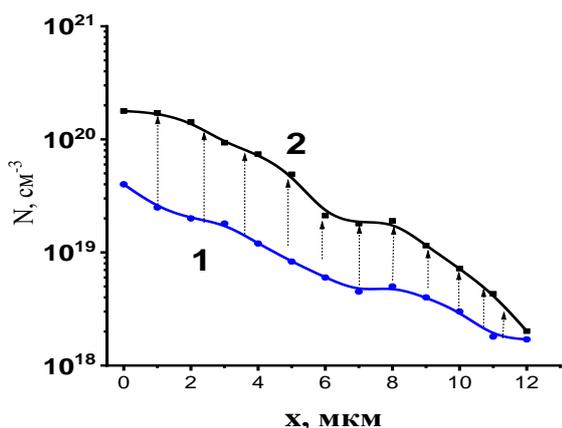


Рис. 6. Концентрационное распределение атомов галлия (1), и атомов галлия при наличии фосфора (2) в контрольных образцах

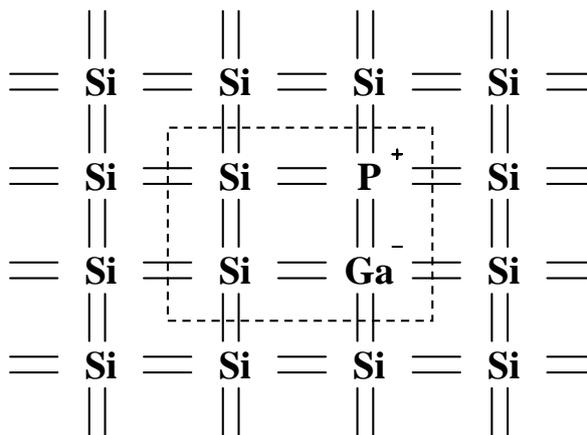


Рис.7. Электронейтральные бинарные соединения типа $\text{Si}_2\text{Ga}\cdot\text{P}^+$ в кремнии

Подтверждением этого могут служить результаты исследований подвижности носителей заряда по толщине полученных кремниевых образцов методом Ван-дер-Пау. Как видно из рис. 8, до глубины 8 мкм образцы кремния (предварительно легированные атомами фосфора) легированные галлием, имеют n-тип проводимости, но подвижность электронов в кремнии с бинарными соединениями фосфора и галлия в 2÷3 раза меньше, чем подвижность электронов в образцах, легированных только атомами фосфора.

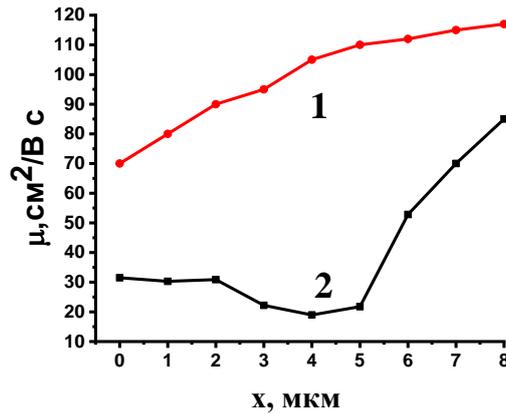


Рис.8. Кривые зависимости подвижности носителей заряда от глубины в образцах Si, легированных только атомами P (1) и образцах Si легированных атомами Ga после предварительного легирования атомов P (2)

Также следует отметить, что концентрация электронов в образцах, легированных только фосфором, почти на порядок больше концентрации электронов в образцах, легированных фосфором и галлием.

Для диффузии использовался вакуумно напыленный на поверхность кремния слой фосфида галлия в виде порошка зернистостью 200-300 мкм, полученного дроблением монокристаллического фосфида галлия марки ФГЭЧ-1-17. Слой GaP толщиной ~1 мкм напылялся на кремний методом вакуумно-термического испарения на вакуумной установке марки DILB832.

Образцы кремния, с напыленным слоем GaP, исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) марки JSM-IT200 для определения морфологии и состава пленки на поверхности кремния (рис. 9 и табл. 1).

В табл.1 и рис.9 приведены состав тонкого слоя GaP на поверхности кремния, определенного с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Таблица 1.

Element	Mass %	Atom %
Si	90,62±0,23	94,12±0,24
P	3,74±0,08	3,52±0,07
Ga	5,65±0,18	2,36±0,08

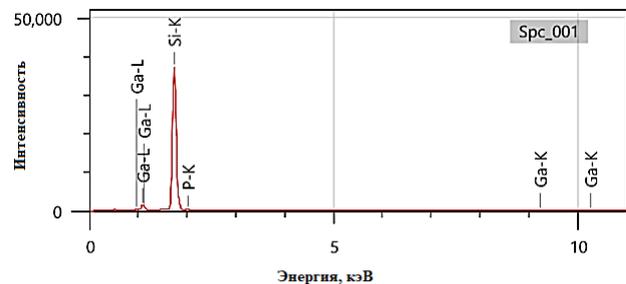


Рис. 9. Элементный состав тонкого слоя фосфида галлия образованного на поверхности кремния

Состав поверхностного слоя после диффузии с тонкого слоя GaP также исследовался с помощью растрового электронного микроскопа марки JSM-IT200 (рис. 10 и табл. 2)

Таблица 2.

Element	Mass %	Atom %
Si	97,52±0,32	98,29±0,33
P	1,39±0,08	1,27±0,07
Ga	1,10±0,14	0,45±0,06

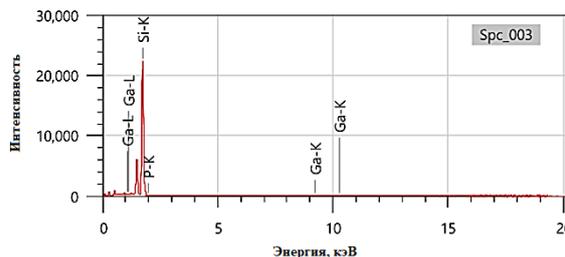


Рис. 10. Элементный состав поверхностного слоя Si после диффузии атомов Ga и P из напыленного слоя GaP

На рис.11 приведены кривые концентрационного распределения примесных атомов галлия и фосфора, построенные по результатам измерений на РЭМ JSM-IT200 на сколе кремния.

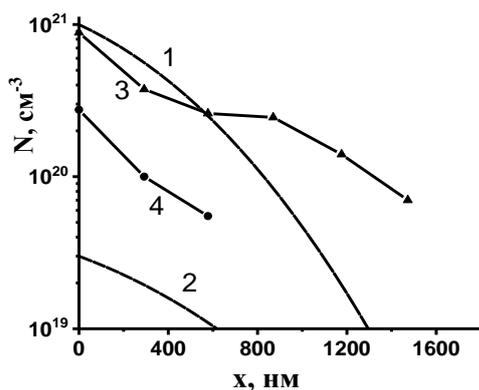


Рис. 11. Концентрационное распределение атомов примесей Ga и P, введенных в образцы Si из слоя GaP, измеренные на РЭМ на сколе образцов. По данным теоретических расчётов процесса диффузии 1 – для атомов P, 2 – для атомов Ga, по результатам экспериментов 3 – для атомов P, 4 – для атомов Ga

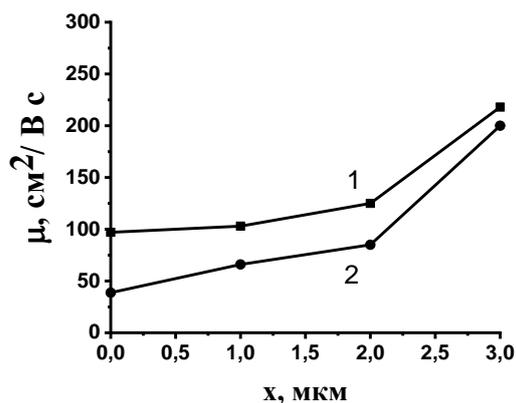


Рис.12. Кривые зависимости подвижности носителей заряда от глубины залегания атомов примесей в образцах кремния, легированных атомами P (1) и, легированных из напыленного слоя GaP (2)

На рис.12 приведены профили подвижности носителей заряда по глубине для полученных образцов кремния, определенные методом Ван-дер-Пау. Можно предположить, что такое сильное уменьшение подвижности связано наличием электроактивной части атомов галлия, сравнимой (порядка половины электроактивной концентрации фосфора) с величиной

концентрации ионизированного фосфора, а также увеличением рассеивания электронов за счет влияния образованных соединений.

Кроме того, уменьшение подвижности может быть связано с изменением рассеивания носителей заряда на решеточных неоднородностях (мультикомплексах типа $(\text{GaP})_n$ в решетке кремния), концентрация которых вблизи поверхности достаточно велика.

Теоретические расчеты значения кулоновской энергии взаимосвязи атомов галлия и фосфора в решетке кремния показали, что это величина равна $\sim 0,5$ эВ. В условиях равновесия по соотношению Аррениуса это может привести к росту концентрации атомов галлия до ~ 10 раз, что соответствует полученным экспериментальным результатам.

В четвёртой главе под названием «**Фотоэлектрические и оптические свойств кремния с бинарными соединениями примесных атомов фосфора и галлия**» исследованы фотоэлектрические и оптические свойства кремния, легированного примесными атомами фосфора и галлия диффузионным методом из газовой фазы. Приведены результаты фотоэлектрических и оптических исследований, спектры комбинационного рассеяния света, рентгенограмма элементного состава образованных соединений. Предложен механизм образования бинарных соединений в кремнии, представлены основные выводы по результатам проведенных экспериментальных исследований.

На рис.13 представлен спектр комбинационного рассеяния света образца фосфида галлия. Анализ спектров, полученных при температуре $T=300$ К позволяет предположить, что в спектре наблюдаются пики ~ 363 см^{-1} и ~ 403 см^{-1} , соответствующие пикам атомов фосфида галлия.

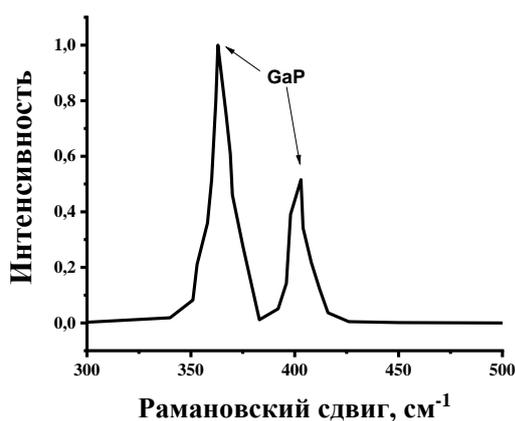


Рис.13. Спектр комбинационного рассеяния в чистом промышленном монокристаллическом фосфиде галлия марки ФГЭЧ-1-17

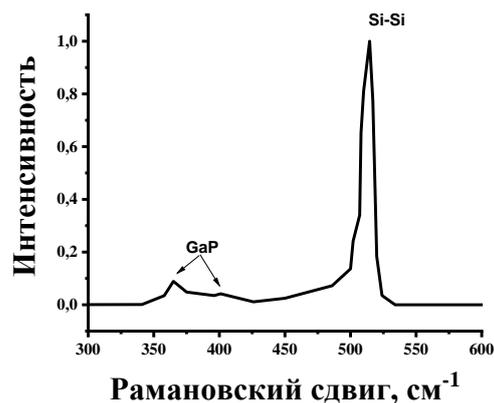


Рис.14. Спектр комбинационного рассеяния, образца монокристаллического кремния, легированного атомами фосфора и галлия

В спектре комбинационного рассеяния света кремния, легированного примесными атомами галлия и фосфора, наблюдаются пики 365 см^{-1} , 404 см^{-1} и 514 см^{-1} при исследуемой температуре $T=300\text{ К}$ (рис.14). Это позволяет предположить, что на поверхности кремния образуются соединения примесных атомов фосфора и галлия.

На рис. 15 представлена рентгенограмма кремния, легированного примесными атомами фосфора и галлия.

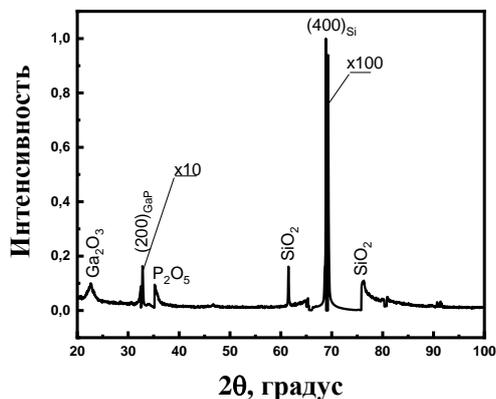


Рис.15. Рентгенограмма образцов кремния, легированных примесями атомов Ga и P

Как видно из дифракционной картины, присутствуют несколько рефлексов различной интенсивности. На рентгенограмме наблюдается серия рефлексов типа $h00$ ($h=1,2,3,\dots$) с большой интенсивностью 200_{GaP} с $d/n=0,546\text{ нм}$ и 400_{Si} с $d/n=0,27\text{ нм}$. Сравнительно узкая, но большая интенсивность рефлекса 400_{Si} ($4 \cdot 10^5$ импульс/с) соответствует атомам кремния основной матрицы.

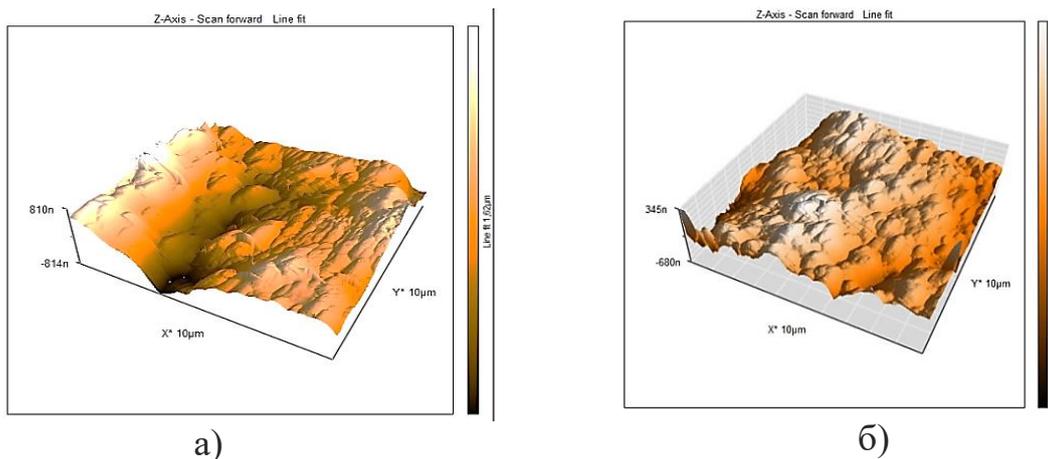


Рис.16. АСМ-изображения поверхности кремния, легированного одновременно атомами примесей фосфора и галлия (а) и кремния, легированного только примесями атомами фосфора (б)

На рис.16 представлены фотографии поверхности образцов кремния, легированного атомами фосфора и галлия полученный с помощью АСМ. Как видно из изображений, неровности рельефа поверхности образцов кремния сильно зависят от концентрации и заряда соединений, образованных примесных атомов фосфора и галлия.

Из изображений видно, что формирование островков и пиков на поверхности кремния, легированного одновременно атомами фосфора и галлия, увеличивает средний размер шероховатости в 1,6 раза по сравнению с кремнием, легированным атомами только фосфора.

Известно, что атомы фосфора в решетке кремния находятся в узлах кристаллической решетки в виде положительно заряженного иона – P^+ и создают дополнительные электроны в зоне проводимости значение, которых равны $N_{p+}=n$. Наличие достаточно большой концентрации положительно заряженных атомов фосфора (P^+) практически создает электрические потенциалы, распределенные от поверхности кристалла по глубине в кремнии, что стимулирует повышение концентрации примесных атомов галлия в процессе диффузии, которые в кремнии действуют как акцепторные примеси в виде отрицательных ионов галлия (Ga^-). Поэтому можно предполагать, что в результате таких взаимодействий в решетке кремния появляются донорно-акцепторные бинарные соединения, т.е. нейтральные квазимолекулы в виде $[GaP^+]$.

На рис.17, показана спектральная чувствительность тока короткого замыкания полученных структур с р-п переходом на основе кремния, легированного только атомами фосфора (кривая 1) и легированных одновременно атомами фосфора и галлия (кривая 2).

Исследования фотоэлектрических свойств кремния, легированного примесными атомами фосфора и галлия, показали, что спектр чувствительности этих образцов существенно расширяется в диапазоне видимой области. Это позволяет предположить, что такие существенные отличия связаны с формированием бинарных соединений типа Si_2GaP в кремнии.

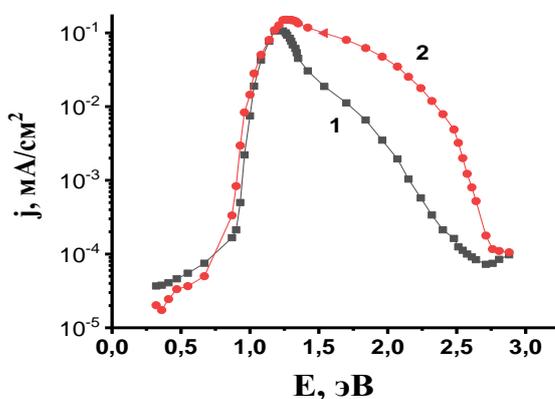


Рис.17. Фотоэлектрические свойства Si, легированного атомами примеси P (1) и атомами примесей Ga и P (2)

Механизмы образования бинарных соединений атомами примесей галлия и фосфора в решетке кремния

Полученные экспериментальные результаты невозможно объяснить взаимной компенсацией донорных (P), и акцепторных (Ga) примесных атомов. Атомы Ga и P в решётке Si распределены хаотично, а в Si эти атомы пространственно разделены. Это не должно влиять на увеличение концентрации атомов Ga в присутствии атомов P. Поэтому полученные результаты исследования можно объяснить взаимодействием атомов Ga и P в кремнии, после образования соединений.

Анализ полученных результатов показывает, что такие бинарные соединения могут существовать только в случае, если атомы Ga и P находятся рядом, т.е. когда они занимают соседние два узла в решетке Si.

Все эти факторы стимулируют образование бинарных соединений фосфора и галлия. Это объясняется тем, что достаточно высокая концентрация P в Si создает более удобные условия для концентрации вновь диффундирующих атомов Ga. Поэтому можно утверждать, что количество примесных атомов Ga в Si увеличивается с ростом концентрацией P, вследствие образования бинарных соединений в виде электроотрицательных молекул в решётке Si.

Здесь также следует отметить следующие очень интересные факты, связанные с образованием бинарных соединения Ga и P, которые находятся в соседних узлах решетки Si. При образовании таких бинарных соединений в решётке Si образуются новые электрически нейтральные бинарные соединения, такие как Si_2GaP^+ .

Такие бинарные элементарные ячейки, в отличие от элементарных ячеек Si, обладают частично ионными и ковалентными связями с соответствующей энергетической структурой. Если такие бинарные элементарные ячейки присутствуют в достаточно высоких концентрациях, они должны иметь важные электрофизические особенностями фотоэлектрические и оптические свойства Si, т.е. привести к значительным изменениям фундаментальных электрофизических параметров Si и созданию новых материалов на основе Si.

В заключение хочу выразить свою глубокую благодарность моему научному консультанту покойному академику М.К.Бахадирханову помогли мне своими ценными советами, моему научному руководителю профессору Н.Ф.Зикриллаеву и всему коллективу кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТГТУ за помощь и поддержку, оказанные при выполнении моей диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые определены термодинамические условия формирования новых бинарных соединений с участием примесных атомов фосфора и галлия типа Si_2GaP в решетке кремния. Установлены оптимальные технологические режимы формирования таких бинарных элементарных ячеек в решетке кремния, легированного атомами примесей фосфора и галлия в интервале температур $T=1000 \div 1250$ °С.

2. Установлено, что в кремнии, предварительно легированном высокой концентрацией атомов фосфора ($N_p \geq N_{\text{Ga}}$), при диффузии примесей атомов галлия происходит существенное увеличение концентрации примесных атомов галлия.

Впервые показано, что в образцах, кремния, легированного атомами примесей галлия и фосфора, подвижность электронов в $2 \div 3$ раза меньше, чем в образцах кремния, с примесными атомами фосфора.

4. Установлено, что значение кулоновской энергии связи бинарных соединений атомов фосфора и галлия в решетке кремния составляет $\sim 0,5$ эВ.

5. Обнаружено, что при образовании бинарных соединений фосфора и галлия в решетке кремния формируются новые электронейтральные бинарные соединения типа Si_2GaP , которые обладают частично ионной и частично ковалентной связью и соответствующими энергетическими структурами.

6. Обнаружено, что наличие бинарных соединений в кремнии приводит к расширению спектрального диапазона чувствительности фотоэлементов ($\lambda=380 \div 760$ нм), созданных на основе кремния с Si_2GaP .

7. Впервые разработаны рекомендации по получению высокоэффективных фотоэлементов с гетероваризонной структурой на основе бинарных соединений атомов фосфора и галлия, обладающих стабильными параметрами.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 FOR THE AWARD
OF ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

TUREKEEV XOJAAXMETJAN SABI'RBAEVICH

**CONTROL OF THE FORMATION OF BINARY COMPOUNDS OF
PHOSPHORUS AND GALLIUM IN SILICON**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Tashkent - 2023

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy(PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2022.3.PhD/FM488.

The dissertation has been prepared at the Tashkent state technical university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council (ispm.uz) and on Information and educational portal «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Scientific supervisor:

Zikrillaev Nurullo Fatxullaevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents:

Egamberdiev Bakhrom Egamberdievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Mamadaliyeva Lola Kamiljanovna

Doctor of Technical Sciences, Professor

Leading organization:

Physical-technical institute ASUz

The dissertation will be defended on 18 10 2023 at 12⁰⁰ hours at the meeting of the Scientific Council DSc.03/12.30.2019.FM/T.01.12 at the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of the National University of Uzbekistan at the address: 100057, Tashkent, st. Yangi Almazar, house 20. Tel./Fax: (+99871) 248-79-91 / (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

The dissertation can be found in the Department of Implementation of Digital Educational Technologies of the Institute (registered under No. 56) at the address: 100057, Uzbekistan, Tashkent, st. Yangi Almazar, house 20. Tel: (+99871) 248-79-59.

The abstract of the dissertation was sent out "03" 10 2023
(distribution protocol No. 56 dated "03" 10 2023)



Sh.B.Utamuradova

Chairwoman of the Scientific Council for the award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

J.J.Khamdamov

Scientific Secretary of the Scientific Council for the Award of Academic Degrees, Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

N.A. Turgunov

Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific Council for Award of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the study is to study the electrophysical, photoelectric and optical properties of silicon-based binary compounds of impurity phosphorus and gallium

The object of the study is industrial single-crystal silicon of the KDB and KEF with various concentrations of initial boron and phosphorus, diffusion-doped with phosphorus and gallium atoms.

The subject of the study is the determination of thermodynamic conditions and technological regimes for controlling the parameters and behavior of Ga and P impurity atoms in the silicon lattice, and the study of the electrical, photoelectric and optical properties of silicon with binary compounds of phosphorus and gallium impurity atoms.

The scientific novelty of the research is as follows:

for the first time, a technology has been developed for producing binary compounds Si_2GaP in single-crystalline silicon containing impurity phosphorus and gallium atoms in the crystal lattice;

it was discovered for the first time that during the diffusion of gallium impurities in n-Si, additionally doped with phosphorus in the temperature range $T=1000\div 1250^\circ\text{C}$, the concentration of gallium atoms is 6-10 times higher compared to samples without an additional layer of phosphorus;

it has been established that in silicon doped with gallium and phosphorus impurity atoms, the electron mobility is 2–3 times less than in silicon samples doped only with phosphorus atoms;

it was found that the presence of binary compounds in silicon leads to an expansion of the spectral range of sensitivity of photocells ($\lambda=380\div 760\text{ nm}$) created on the basis of silicon with Si_2GaP ;

for the first time, recommendations have been developed for the production of highly efficient solar cells with a heterovaristic structure based on binary compounds of phosphorus and gallium atoms with stable parameters.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results on expanding the spectral sensitivity range of photodiodes based on silicon doped with atoms of phosphorus and gallium impurities:

the developed technology for obtaining new binary compounds of the Si_2GaP type in the silicon lattice was used by the FOTON joint-stock company (Reference No. 04–3/2744 of the Uzeltekhsanoat Association dated December 28, 2022). The use of scientific results in JSC "PHOTON" has expanded the range of spectral sensitivity of photodiodes created on the basis of single-crystal silicon containing binary compounds of phosphorus and gallium atoms. The use of the developed diffusion technology made it possible to save energy and reduce the diffusion time of impurity atoms;

the scientific results obtained in the process of working on the dissertation were used in the implementation of the fundamental project at the Department of Solid State Physics of Samarkand State University No. OT-F2-37 “Melting of metals

using a supersonic flow of a gas mixture, obtaining alkali metals and studying their physical properties”, in 2017-2021 (Certificate of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan dated February 22, 2023 No. 89- 02-86). The use of scientific results made it possible to obtain highly efficient photocells with a heterovarizon structure based on binary compounds of phosphorus and gallium atoms, which have stable parameters.

Approbation of the research results. The results of the dissertation work were reported and discussed at 8 international and 2 republican scientific and practical conferences.

Publications of research results. The main results on the topic of the dissertation were published in 17 scientific papers, including 7 articles in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations, including 3 articles in foreign international refereed journals.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The text of the dissertation is presented on 110 pages, including 48 figures and 11 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part1)

1. N.F. Zikrillaev, S.V. Koveshnikov, Kh.S. Turekeev, N. Norqulov, S.A. Tachilin. Diffusion of Phosphorus and Gallium from a Deposited Layer of Gallium Phosphide into Silicon. // *Physics of the Solid State*, 2022, Vol. 64, No. 11, pp. 587-594. [№3, Scopus, IF: 0,84].
2. N. F. Zikrillaev, S. B. Isamov, S. V. Koveshnikov, Z. T. Kenzhaev, Kh. S. Turekeev. Codiffusion of Gallium and Phosphorus Atoms in Silicon. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2023, Vol. 59, No. 2, pp. 210–215. [№3, Scopus, IF: 0,87].
3. M.K.Bakhadirخانov, N.F.Zikrillaev, S.B.Isamov, X.S.Turekeev, S.A.Valiev. Effect of the presence of a sufficiently high phosphorus concentration on the concentration distribution of gallium in silicon. // *Semiconductors*, 2022, vol. 56. No. 2. pp. 156-159. [№11, Springer, IF: 0,66].
4. Н.Ф.Зикриллаев, Х.С.Турекеев. Исследование фотоэлектрических и оптических свойств кремния легированного фосфидом галлия. // Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ДАН). 2022. №4. С. 31-36. [01.00.00. № 7].
5. Н.Ф.Зикриллаев, С.Б.Исамов, Х.С.Турекеев, А.Б.Камалов, Ж.О.Акимова. Кремнийга фосфор ва галлийнинг кетма-кет диффузияси натижасида галлий концентрациясининг ошиши. // *Ilm hám jamiyet*. 2021. №3. С. 21-23. [01.00.00. № 15].
6. Н.Ф.Зикриллаев, А.Б.Камалов, Х.С.Турекеев. Оптические исследования кремния легированного фосфидом галлия. // *Ilm hám jamiyet*. 2022. №2. С. 32-34. [01.00.00. № 15].
7. Н.Ф. Зикриллаев, Х.С. Турекеев. Состав кремния одновременно легированного примесными атомами галлия и фосфора. // *Илм сарчашмалари*. 2022. № 9. С. 180-183. [01.00.00. № 12].

II бўлим (2 часть; part 2)

8. Н.Ф.Зикриллаев, Х.С.Турекеев, Б.У.Алиев. Новый способ технологии получения бинарных элементарных ячеек Si_2GaP в кремний и их электрофизические параметры. // Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро-и наноструктурах. Международная конференция. Фергана. 13-14 ноября. 2020 г. С. 277-279.
9. Ғ.Х.Мавлонов, А.А.Усмонов, Х.С.Турекеев. Ж.А.Рахматов. Технология формирования бинарных элементарных ячеек Si_2GaP в решетке Si. // Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике. Международная научная конференция. 9-10 октябрь. 2020. Ташкент. С. 198-200.

10. С.Б.Исамов, Х.С.Турекеев, Н.Т.Мавлонов. Кремнийга фосфор ва галлийнинг кетма-кет диффузияси натижасида галлий концентрациясининг ошиши. //Тенденции развития физики конденсированных сред. Международная научная конференция. 25-май. 2021. Фергана. С. 227-229.

11. Х.С.Турекеев. Кремний панжарасида Si_2GaP бинар элементар ячейкасининг шаклланиш технологияси. //Яримўтказгичлар физикаси, микро ва наноэлектроника: фан, таълим ва ишлаб интеграцияси истиқболлари. Республика илмий анжуман материаллари. 21-22 май, 2021. Ташкент. С. 58-60.

12. N.F.Zikrillaev, N.Norqulov, M.D.Genjemuratov. Kremniyda Ga va P elementlarining diffusion usulda birikma hosil qilishi. // «Яримўтказгичлар физикаси, микро-ва наноэлектрониканинг фундаментал ва амалий муаммолари» I-ҳалқаро анжуман материаллари. 28-29 октябрь, 2021. Тошкент. С. 34-35.

13. Н.Ф.Зикриллаев, А.Б.Камалов, Х.С.Турекеев, М.Д.Генжемуратов. Одновременная диффузия атомов галлия и фосфора в кремнии. // Фотоэнергетикада наноструктурали яримўтказгич материаллар. II ҳалқаро илмий анжумани. 19-20 ноябрь. 2021-йил. Тошкент. С. 214-216.

14. Н.Ф.Зикриллаев, Х.С.Турекеев. Функциональные возможности кремния с новыми бинарными элементарными ячейками с участием атомов галлия и фосфора. // Яримўтказгичлар ва полимерлар физикасининг долзарб муаммолари. Республика илмий амалий анжумани. 1-февраль. 2022. Ташкент. С. 30-31.

15. Н.Ф.Зикриллаев, Х.С.Турекеев, Ж.А.Хидиров. Формирования бинарных элементарных Si_2GaP в решетке кремния. // Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации. I-международная научная конференция. 25-26 апреля 2022. Ташкент. С. 308-310.

16. Н.Ф.Зикриллаев, С.В.Ковешников, Н.Норкулов, Х.С.Турекеев, Г.А.Кушиев. Формирования бинарные соединения фосфора и галлия в решетке кремния. // Физика 2022. Международный форум. Наманган. 4-5 октябрь. 2022. С. 99-100.

17. Н.Ф.Зикриллаев, С.В.Ковешников, М.У.Хажиев, Х.С.Турекеев, С.А.Абдурахмонов, Ж.А.Хидиров, А.Ахроров. Особенности диффузии фосфора и галлия из напыленного слоя фосфида галлия в кремний. // Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике. Сборник докладов III международной научной конференции. 24-25 ноября. С. 90-92. Ташкент-2022.

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali taxririya-tadqiqotida taxrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (03.10.2023).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturasida.

Shartli bosma tabog'i: 3. Adadi 60. Buyurtma № 52.

Guvohnoma reestr № 10-4434

Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti
bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy.

