

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ -ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

ФАЙЗУЛЛАЕВ ҚАҲРАМОН МАҲМУДЖАНОВИЧ

**3d-ЭЛЕМЕНТЛАР БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙДА
КИРИШМАЛАРНИНГ ЎЗARO ТАЪСИРЛАШУВ ЖАРАЁНЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

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

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

Файзуллаев Қахрамон Махмуджанович

3d-элементлар билан легирланган кремнийда киришмаларнинг
ўзаро таъсирлашув жараёнлари

3

Файзуллаев Қахрамон Махмуджанович

Процессы межпримесного взаимодействия в кремнии с
примесями 3d-элементов

21

Fayzullaev Kakhramon Makhmudjanovich

Processes of interimpurity interaction in silicon with impurities
of 3d-elements

39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works

43

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ -ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

ФАЙЗУЛЛАЕВ ҚАХРАМОН МАХМУДЖАНОВИЧ

**3d-ЭЛЕМЕНТЛАР БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙДА
КИРИШМАЛАРНИНГ ЎЗARO ТАЪСИРЛАШУВ ЖАРАЁНЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги. Жаҳонда сўнгги йилларда илмий - техник тараққиётнинг юқори суръатлари асосан яримўтказгичли электроника соҳасидаги тадқиқотлар ютуқлари билан таъминланди, бу эса тадқиқотларнинг кейинги йўналиши - яримўтказгич материаллари сифатини яхшилаш, назорат қилинадиган электрофизик хусусиятларга эга монокристалларни яратиш технологияларини ишлаб чиқиш ва улар асосида материалларнинг турли параметрларига ташқи омилларнинг таъсирини аниқлашни белгилайди.

Ўзбекистон Республикасининг 2021 йил 19 мартдаги "Таълим сифатини ошириш ва физика соҳасидаги илмий тадқиқотларни такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида"ги ПҚ-5032-сон Қарорида "физика соҳасидаги илмий тадқиқотларни ишлаб чиқариш билан узвий боғлиқлигини таъминлаш, иқтисодиёт тармоқларидаги муаммоларни ҳал етишга қаратилган илмий ишлар кўламини кенгайтириш; илмий тадқиқотлар ва инновацияларнинг самарадорлиги ва амалий аҳамиятини ошириш..."¹ каби вазифалар белгиланган. Бу соҳада микроэлектроникани ривожлантириш учун юқори сезгир ярим ўтказгичли материалларнинг янги турини яратиш катта илмий аҳамиятга эга.

Ҳозирги вақтда яримўтказгичли материаллар ва қурилмаларнинг муҳим хусусиятлари ундаги киришма атомларининг ҳосил қилган чуқур сатхлари орқали аниқланиши маълум. Замонавий яримўтказгичли электроникадаги асосий материал - монокристалл кремнийдаги бир қанча киришмавий элементларнинг хоссалари ўрганилган. Кремнийда ўтувчи элемент киришмаларининг хоссаларини ўрганиш бўйича экспериментал маълумотлар етарли ҳажмда тўпланганига қарамай, кремний кристалл панжарасидаги киришмавий атомлар ҳолатининг ягона модели яратиш бўйича уринишлар ўз самарасини бермади. Бундай ҳолатда кремнийдаги 3d-элементларининг хоссалари деярли тўлиқ ўрганилган, аммо хром (Cr) ва кобальт (Co) атомлари билан легирланган кремнийни хоссалари кам ўрганилган. Хром ва кобальт атомлари хоссаларини тадқиқ қилиш кристалл панжарадаги 3d-элемент киришмаларининг миграция механизмларини аниқлаш ҳамда улар асосидаги қурилмалар ва кристаллар параметрларини бошқариш имконини беради.

Ушбу диссертация тадқиқотлари Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2021 йил 19 мартдаги "Таълим сифатини ошириш ва физика соҳасида илмий тадқиқотларни такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида" ги ПҚ-5032-сон қарори ва Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2021 йил 12 октябрдаги "Муқобил энергетика, электротехника ва микроэлектроникани ривожлантириш, яримўтказгичлар физикаси соҳасидаги тадқиқотлар самарадорлигини оширишни давлат томонидан қўллаб-қувватлаш, шунингдек, Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университети хузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва

¹ Ўзбекистон Республикасининг сонли қарори. ПҚ-5032 йил 19 мартдаги 2021-сонли "Таълим сифатини ошириш ва физика соҳасида илмий тадқиқотларни такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида".

микроэлектроника илмий-тадқиқот институтини мустаҳкамлаш чора-тадбирлари тўғрисида" ги 639-сон қарорларида кўзда тутилган вазифаларни бажаришга маълум даражада хизмат қилади.

Тадқиқотларнинг республикада фан - техника тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг Ф2 "Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик" ва Ш.«Энергетика, энергоресурс тежамкор-лиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Чет эллик ва республикамиз олимлари томонидан кремний ва кремний асосида яратилган кўпгина асбобларнинг физика-кимёвий жараёнлар тадқиқ этилган. Жумладан: Яримўтказгичлар физикаси ва наноэлектроника соҳасида таниқли мутахассислар (А.А.Лебедев, В.И.Фистул, E.R. Weber, K. Graff, H. N. Woodbury, W. Ammon, C. Claeys, C.K. Estreicher, H. Pieper, H. Nakashima) томонидан ўтказилган тадқиқот натижаларини таҳлил қилиш ва умумлаштириш натижасида яримўтказгичлар физикаси бўйича кремний чуқур сатҳлар табиати ҳалигача мукамал ҳал этилмаганлиги кўрсатилган.

А.А.Лебедев, В.И.Фистул, Л.С.Берман, А.Т.Мамадалимов, Х.С.Далиев ва Ш.Б. Утамурадова ишларида кремнийда бир қатор чуқур сатҳлар аниқланиб, уларнинг энергетик параметрлари аниқланган. К.П.Абдурахмановнинг ишларида олинган натижалар асосида тайёр қурилмаларнинг таъсири характеристикаларининг тикланиш вақтини камайтириш мақсадида кремний диффузион диодларидаги нурланиш нуқсонлари спектрини бошқариш усули ишлаб чиқилган. М.К. Баҳадирханов, С.З.Зайнабидиновлар турли чуқур сатҳга эга бўлган киришмаларнинг электрик ва фотоэлектрик хоссаларини ўрганишди ва кремний асосида компенсирланган материалларни амалиётга тадбиқ этиш йўлларни кўрсатишган.

Тажриба ва назарий маълумотларнинг катта миқдорда бўлишига қарамай, ўтувчи элементлар киришмалари билан легирланган кремнийда содир бўлаётган физик ҳодисалар табиати ва уларнинг бошқариб бўлмайдиган технологик киришмалар билан ўзаро таъсирлашуви шу пайтгача ўрганилмаган бўлиб қолмоқда.

Яримўтказгичлар материаллар ва яримўтказгичли асбобларнинг хоссалари ҳақида кўплаб экспериментал маълумотлар бўлишига қарамадан, уларга турли ташқи омиллар: босим, нурланиш ва қуёш нури таъсирида кремний ва унга асосланган структураларда бўлаётган физик жараёнларни олдиндан айтиб беришга имкон берувчи маълумотлар мавжуд эмас.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ўзбекистон Миллий университети ва Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти тадқиқот лойиҳалари доирасида қуйидаги мавзуда амалга оширилди: ОТ-Ф2-11 рақамли “d-элементлар киришмалари билан легирланган кремнийнинг

сирт қатламларида ва ҳажмида наноўлчамли нуқсонларнинг шаклланиш қонуниятларини тадқиқ этиш” (2019-2020 йй.);

Тадқиқотнинг мақсади ностационар сиғимли, фотосиғимли ва инфрақизил спектроскопия усуллари ёрдамида 3d-элементлар билан легирланган кремнийда чуқур сатҳли ва технологик киришмаларнинг ўзаро таъсирлашув жараёнларини комплекс тадқиқ қилишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари: хром, кобальт ва марганец атомлари билан кремнийни легирлаш технологиясини оптималлаштириш ҳамда ҳар хил усулларда легирланган Si намуналарининг электрофизик хоссаларини ўрганиш;

хром, кобальт ва марганец киришмалари ҳосил қилган чуқур сатҳли марказларнинг энергетик спектрини ва уларнинг ҳосил бўлишининг самарадорлигини аниқлаш;

хром, кобальт ва марганец киришмалари билан легирланган кремнийнинг дастлабки нуқсонли тузилиши ҳолатининг чуқур сатҳли марказлар ҳосил бўлишига таъсирини тадқиқ қилиш;

кремнийда термик ва радиациявий нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларига 3d-элементлар киришмаларининг таъсирини аниқлаш;

хром, кобальт ва марганец киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларига электронейтрал киришмалар (нодир ер элементлари)нинг таъсирини ўрганиш.

3d-элементлар киришмалари билан технологик киришмаларнинг (темир, кислород, углерод) ўзаро таъсирлашувини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида Чохраль ва тигелсиз зонада эритиш усули билан ўстирилган монокристалли кремний ҳамда 3d-ўтувчи (хром, кобальт, марганец ва темир) ва нодир ер элементлари (гадолиний, гольмий) атомлари билан киритилган Si олинган.

Тадқиқотнинг предмети 3d-элементлар билан легирланган кремнийда чуқур сатҳли ва технологик киришмаларнинг ўзаро таъсирлашув жараёнларини ўрганишдан иборат.

Тадқиқот усуллари. Қўйилган вазифаларни ҳал қилишда чуқур сатҳлар ностационар сиғимли спектроскопия (DLTS), ёруғлик сиғими (ФС) ва инфрақизил ютилиш, нурнинг комбинацион сочилиши (Раман спектроскопияси) усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

3d-элементларининг (хром, кобальт ва марганец) киришмалари билан кремнийни легирлашнинг технологик режимлари оптималлаштирилган;

хром, кобальт ва марганец киришмалари чуқур сатҳларининг ҳосил бўлиш самарадорлиги кремний ҳажмидаги бошқариб бўлмайдиган киришмалар ва нуқсонлар ҳолатига боғлиқлиги аниқланган;

илк бор кремнийда кислород атомларининг мавжудлиги юқори ҳароратли диффузия усулида кремнийга киритилган хром, кобальт ва марганец киришмаларининг чуқур сатҳлари концентрациясини сезиларли даражада камайтириши ва оптик фаол тугунлараро кислород концентрацияси N_0^{opt} эса

3d-элементларининг концентрациясига боғлиқ ҳолда 10÷25% га камайиши аниқланган;

илк бор хром, кобальт ва марганец киришмалари билан легирланган кремнийда кислороднинг бирикма ҳолатлари - SiO_2 ва SiO_4 мавжудлиги чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиши самарадорлигини ўзгаришига ва DLTS спектрларининг трансформациясига олиб келиши аниқланган;

илк бор хром, кобальт ва марганец киришмалари билан легирланган кремнийда бошқариб бўлмайдиган киришма – темир билан таъсирлашуви натижасида $E_c - 0,30$ эВ ионлашиш энергиясига эга янги чуқур сатҳли марказ ҳосил бўлиши аниқланган;

$\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ намунаси юзасидаги марганец қатлами орқали легирлаш Ni нинг электрфаол атомларининг концентрацияси камайишига олиб келиши ҳамда Si юзасидаги марганец қатлами никель киришмалари учун геттер вазифасини бажариши аниқланган;

илк бор нодир ер элементлари кремний ҳажмида мавжудлиги хром, кобальт ва марганец киришмаларининг чуқур сатҳлари ҳосил бўлиш самарадорлигини ошишига (гадолий 2÷3 марта ва гольмий 3÷4 марта) ҳамда иссиқлик нуқсонлари концентрациясини 4÷5 марта ва ва радиациявий нуқсонлари концентрациясини 3÷4 марта камайишига олиб келиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

хром, кобальт ва марганец киришмалари билан легирланган кремнийнинг технологик режимлари ишлаб чиқилган бўлиб, бу иссиқлик нуқсонлари ҳосил бўлиш самарадорлигини 4÷5 марта ва радиациявий нуқсонларини 3÷4 марта камайтиришга ва кремнийнинг параметрларини барқарорлаштиришга олиб келган;

намуналар юзасига ўтқизилган ўтувчи элементлар киришмаларини металл қатламидан диффузия килиш йўли билан кремний ҳажмида тез диффузияланувчи бошқариб бўлмайдиган темир каби киришмаларни геттерлаш усуллари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги юқори сезгирлик ва катта ажратиш қобилиятига эга чуқур сатҳлар ностационар сифимли спектроскопия, ёруғлик сифими, инфрақизил ютилиш спектроскопия усулларида фойдаланиш орқали асосланган ва эксперимент тадқиқотлари орқали тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти 3d-элементлари билан легирланган кремнийда содир бўладиган физик жараёнлар тўғрисида тушунчаларни кенгайтиришдан ва яримўтказгичларда чуқур сатҳлар ҳосил бўлиш қонуниятларини аниқлашдан иборат.

Ўтувчи элементлар киришмалари билан легирланган кремнийнинг иссиқлик барқарорлигини ва радиацияга чидамлилигини ошириш бўйича олинган натижалар турли хил яримўтказгичли қурилмаларни ишлаб чиқаришда тавсиялар сифатида фойдаланиш мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши: 3d-элементлар билан легирланган кремнийда чуқур сатҳли ва технологик киришмаларнинг ўзаро таъсирлашув жараёнларини ҳамда уларга технологик омилларнинг таъсирини комплекс тадқиқ қилиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

диффузиядан олдин юқори ҳароратли термик ишлов берилган кремнийни легирлаш орқали нуқсонлар структурасини бошқариш имкониятлари, гадолий атомлари мавжуд кремнийга хром атомларини киритилиши натижасида иссиқлик нуқсонларини 4÷5 марта камайтирилиши ва кремнийни технологик, бошқариб бўлмайдиган киришмалардан тозалаш усуллари МДХ Нанотехнология ҳалқаро инновацион марказида Н.Магазов раҳбарлигида 2021 й. бажарилган “Кремнийли яримўтказгичларнинг хусусиятларига радиациянинг таъсири” мавзусидаги лойиҳада қўлланилган (МДХ Нанотехнология ҳалқаро инновацион марказидан 2021 йил 12 августда олинган 010/136-сон маълумотнома). Илмий натижалардан фойдаланиш легирланган кремнийнинг нуқсонли структурасини бошқариш ва кремний ҳажмини ҳар хил бошқариб бўлмайдиган киришмалардан тозалаш имконини берган.

Cr ва Co киришмалари билан кремнийни легирлашнинг оптимал технологик режимлари; Cr ва Co киришмалари кремнийга киритилганда ҳар хил ташқи омиллар таъсирида кремний ҳажмида ҳосил бўладиган термонуқсонлар концентрациясини 3÷4 баровар ва радиациявий нуқсонлари концентрациясини 2÷3 баровар камайтириш усуллари; ҳар хил ташқи омиллар таъсирида кремний ҳажмида ҳосил бўладиган бошқариб бўлмайдиган нуқсонларни (темир каби киришмаларни) 3d-элементлар киришмалари (Cr ва Co) ёрдамида геттерлаш технологияси Қорақалпоқ давлат университетидан 2017-2020 йилларда бажарилган ОТ-Ф-2-77 рақамли “Моделлаштириш асосида ички нуқсонларни ҳисобга олган ҳолда яримўтказгичли асбобларнинг ишончилигини башорат қилишнинг такомиллаштириш усули” мавзусидаги фундаментал лойиҳада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2021 йил 24 декабрдаги 3/19-24/12-314-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш яримўтказгичли асбобларнинг ишончилигини ошириш усулини ишлаб чиқишга ва моделлаштириш асосида ички нуқсонларни ҳисобга олган ҳолда яримўтказгичли асбобларнинг барқарорлигини 2-3 баровар оширишга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 6 та ҳалқаро ва 4 та республика илмий-амалий конференцияларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларини эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 18 та илмий иш, шу жумладан диссертацияларнинг асосий илмий натижаларини эълон қилиш учун Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия этилган журналларда 8 та мақола чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертация ҳажми 29 та расм ва 7 та жадвални ўз ичига олган ҳолда 136 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, диссертация мавзуси бўйича ҳалқаро илмий-тадқиқотларнинг шарҳи, муаммонинг ўрганилиш даражаси, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

“Кремнийда 3d-элементлар киришма атомларининг хусусиятлари ўрганилганлиги ҳолати” деб номланган биринчи бобда адабиётлар таҳлили келтирилган. Бу бобда кремнийдаги 3d-элементлари атомларининг ҳолати бўйича чоп этилган нашрлардаги асосий маълумотлар келтирилган. Кремнийдаги ушбу киришмалар ҳосил қиладиган чуқур сатҳларнинг ҳолатлари бўйича таҳлиллар келтирилган. Турли муаллифлар томонидан аниқланган хром, темир, кобальт ва марганец атомлари ҳосил қилган чуқур сатҳлар яхлит тизимга солинган. Асосий йўналиш сифатида, d-қобиғи тўлдирилмаган кремнийдаги киришмаларнинг ҳолати тўғрисида олиб борилган тадқиқотлар ёзилган, бундан ташқари уларнинг бошқа киришмалар билан ўзаро таъсирини ўрганиш бўйича маълумотлар келтирилган. Илмий ишлар таҳлилига кўра, турли элемент атомлари билан легирланган кремнийнинг хоссалари ва кремнийдаги технологик киришмаларнинг таъсири ва нуқсонлар, кислород ва углероднинг ўтувчи элементлари билан легирланган кремнийнинг электрофизик хоссаларига таъсири ҳақида маълумотлар келтирилган.

Хулосаларга асосан диссертация тадқиқотининг вазифалари ишлаб чиқилган.

“Тадқиқот усуллари ва намуналарни тайёрлаш технологияси” деб номланган иккинчи бобда диод структураларини тайёрлаш ва термик ишлов бериш технологияси тўлиқ ёритилган. Кремнийни ўтувчи элемент киришмалари билан легирлаш технологияси хусусиятлари батафсил тавсифланган.

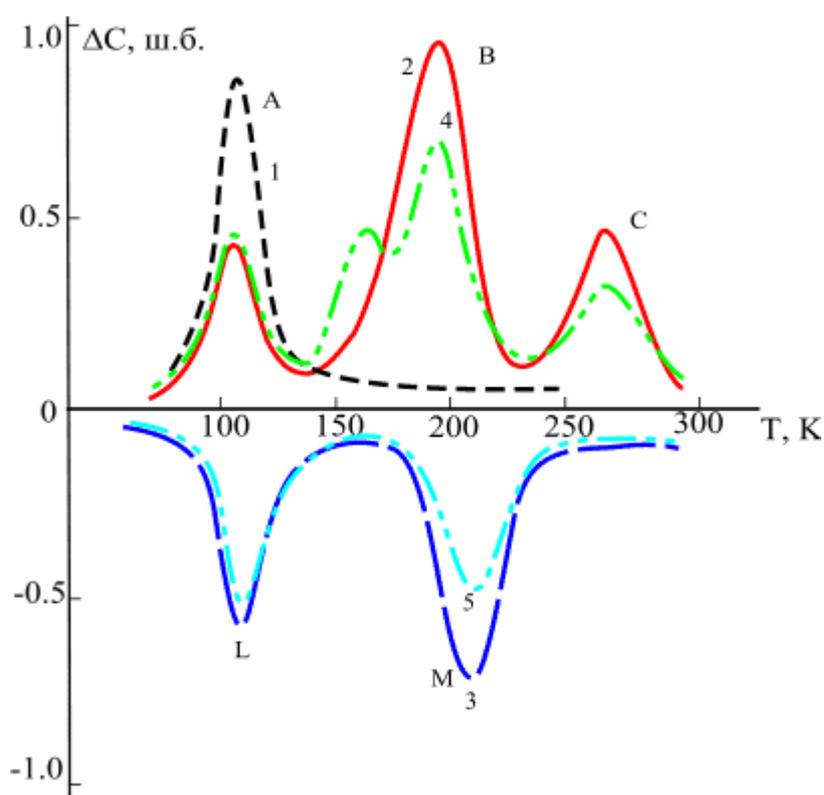
Ушбу бобда кремнийдаги чуқур сатҳларнинг сиғимли спектроскопияси асосий принциплари баён қилинган. t_1 ва t_2 вақт оралиғида сиғимли сигналлар фарқи ўзгаришига асосланган DLTS нинг классик услуби асослари тасвирланган. Бир марта сканерлаш йўли орқали олинган DLTS спектрларини ҳисоблаш ва ўлчаш усули баён қилинган. Ёруғлик сиғимининг назарий асослари келтирилган.

Кремнийдаги углерод ва кислород концентрациясини аниқлаш учун 1200 дан 400 см^{-1} гача ИҚ-спектри соҳасида икки нурли схемада ишловчи SPECORD-75-IR инфрақизил спектрофотометр ёрдамида ИҚ-ютилиш спектрини ўлчаш услуби баён қилинган.

Нурнинг комбинацион сочилиши асосидаги ўлчаш асослари берилган.

“Кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларига 3d-элементлар атомларининг таъсири” деб номланган учинчи бобда ўтувчи элементлар - хром, кобальт, темир ва марганец билан легирланган кремнийда нуқсонли марказларни ўрганиш натижалари келтирилган, кремнийнинг таъқиқланган зонасида ушбу киришмалар ҳосил қилган энергетик сатҳлар аниқланган ва кремнийда ўтувчи элементлар киришмалари ҳосил қилган чуқур сатҳлар энергетик спектрлари сиғимли спектроскопия (DLTS ва ЁС) усулида идентификация қилинган.

Кремнийга хром ва темир атомларини бир вақтнинг ўзида киритилиши Cr ва Fe атомларига тегишли $E_c - 0,41$ эВ, $E_c - 0,51$ эВ (Cr) ва $E_v + 0,41$ эВ (Fe) чуқур сатҳлар концентрацияларининг камайишига олиб келиши ва $E_c - 0,30$ эВ ли ионлашиш энегиясига эга бўлган янги сатҳ ҳосил бўлиши тадқиқ этилган (1-расм).



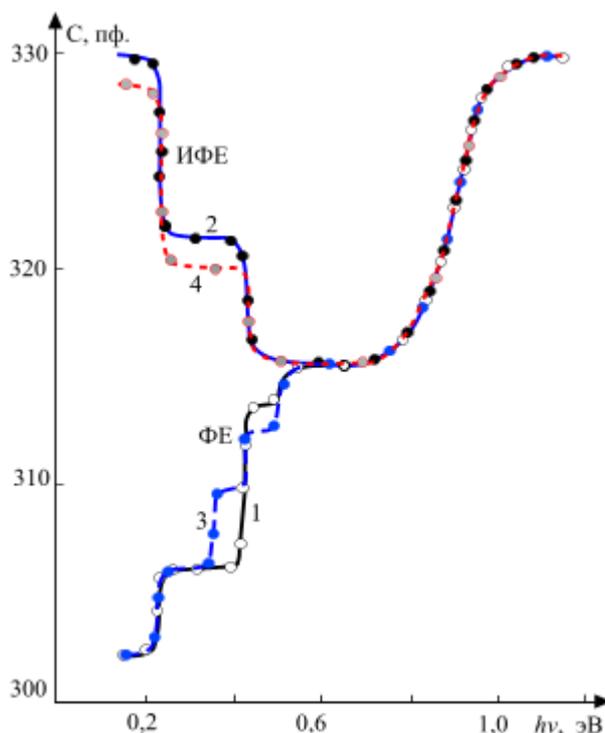
1-расм. Si (1), Si<Cr> (2), Si<Fe> (3) ва Si<Cr, Fe> (4, 5) намуналарининг DLTS спектрлари

n-Si<Cr> (1-расм, 2-чизик) спектрларини ҳисоблаш натижасида, хром атомларини кремнийга диффузия йўли билан киритилиши натижасида таъқиқланган зонанинг юқори қисмида $E_c - 0,20$ эВ, $E_c - 0,41$ эВ ва $E_c - 0,51$ эВ ионлашиш энергиясига эга бўлган учта чуқур сатҳ ҳосил қилиши ўрганилган. Бу сатҳлардан фақатгина иккита чуқур сатҳ хром атомларига тегишли ҳисобланади.

Cr ва Fe атомларини Si га бир вақтнинг ўзида ёки кетма-кет киритилиши хром ва темир атомлари билан боғлиқ чуқур сатҳлар концентрациясини сезиларли камайтиради (1-расм, 4- ва 5-чизиклар).

900÷1200 °C оралиғида юқори ҳароратли ишлов берилиб, тез совутилган Si<Cr> намуналарида $E_c - 0,30$ эВ ли ионлашиш энергиясига эга бўлган, термик ностабил чуқур сатҳ ҳосил бўлиши ва бунинг натижасида хром концентрациялари синхрон ўзгариши аниқланган.

Si<Cr> ва Si<Cr,Fe> намуналарининг фотосиғим спектрларида ҳам худди шундай жараён содир бўлган (2-расм).

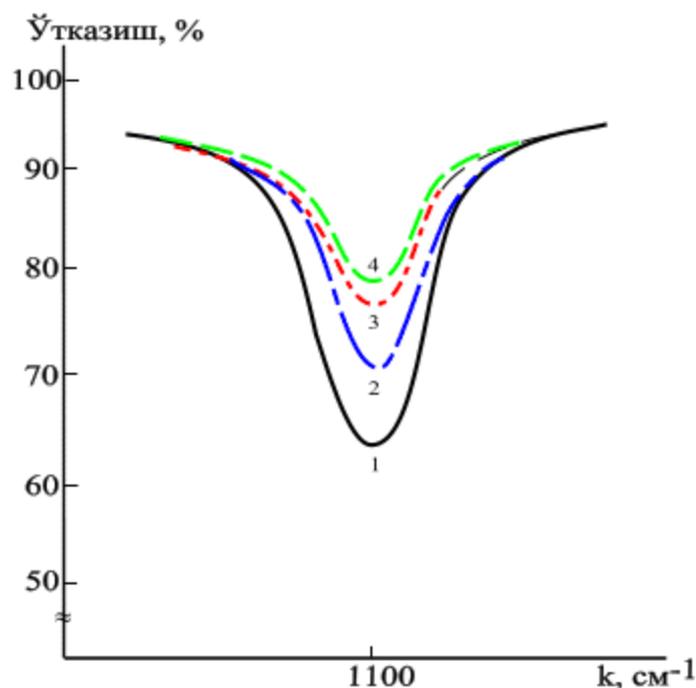


2-расм. Si<Cr>(1,2) ва Si<Cr,Fe> (3,4) намуналарининг фотосиғим ва индуцирланган фотосиғим спектрлари

Хром ва темир билан легирланган Si намуналарининг ИҚ-ютилиш спектрлари ҳам тадқиқ этилган.

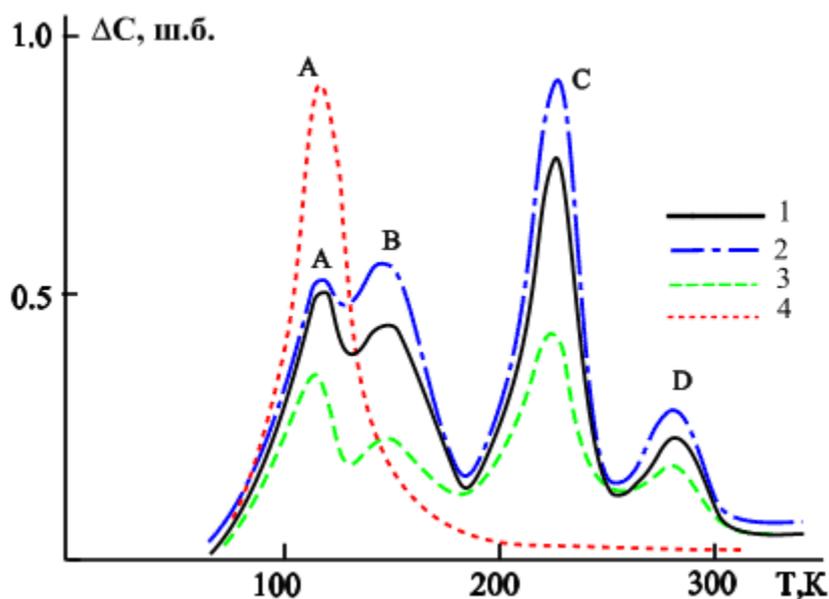
3-расмда Si (1), Si<Fe> (2), Si<Cr> (3) ва Si<Cr,Fe> (4) намуналарининг ИҚ-ютилиш спектрлари келтирилган. Кремнийдаги оптик фаол кислород нинг концентрацияси N_O^{opt} хром ва темир атомларининг кремнийга диффузия қилиш ҳароратига боғлиқ равишда 10–25 % камайганлигини кўришимиз мумкин.

ИҚ ютилиш спектрларини ўлчашдан кўринадики, Si панжарасига диффузия усулида киритилган Cr атомлари (3-расм, 2-чизик) темир атомларига нисбатан кучлироқ оптик фаол кислород миқдорини камайтириши аниқланган. Si даги ИҚ-ютилиш спектрларини таҳлили шуни кўрсатадики, бир вақтда легирланган хром ва темир атомлари янада кўпроқ оптик фаол кислород миқдорини N_O^{opt} камайтиради.



3-расм. Si (1), Si<Fe> (2), Si<Cr> (3), ва Si<Cr, Fe> (4) намуналарининг ИҚ-ютилиш спектрлари

n-Si намунасига Co атомларини диффузия йўли билан киритилгандан сўнг (4-расм, 1-чизик), $E_c - 0,20$ эВ (А чўққи), $E_c - 0,33$ эВ (В чўққи), $E_c - 0,45$ эВ (С чўққи) ва $E_c - 0,54$ эВ (D чўққи) га тенг ионлашиш энергияли ва мос равишда $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-17}$ см², $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_n = 1,1 \cdot 10^{-15}$ см² ва $\sigma_n = 1,5 \cdot 10^{-15}$ см² ли заряд ташувчиларни қамраб олиш юзасига эга бўлган чуқур сатхлар ҳосил қилиши аниқланган.

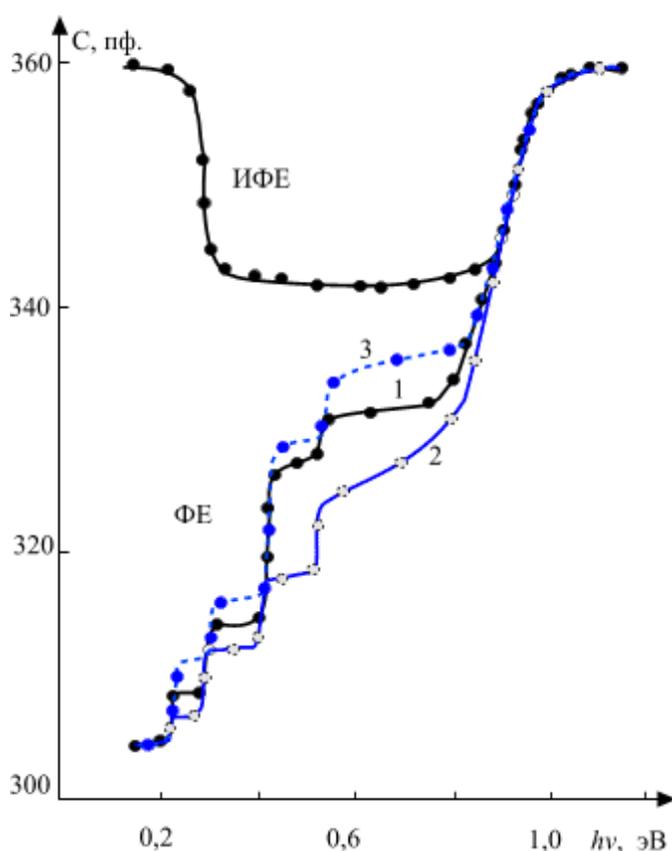


4-расм. ЮХИ берилган n-Si<Co> намуналарининг DLTS спектрлари. $T_{\text{юхи}}$, °C: 1-1100, 2-1200, 3- сирт юзаси яхши тозаланмаган, 4 – назорат остидаги n-Si

p-Si<Co> намуналарида таъқиқланган зонанинг пастки ярим соҳасида $E_v+0,32$ эВ ли ва $\sigma_p=2\cdot 10^{-16}$ см² га тенг заряд ташувчиларни қамраб олиш юзасига эга бўлган қўшимча чуқур сатҳ ҳосил бўлиши аниқланган.

Олинган натижалар таҳлили шуни кўрсатадики, n-Si<Co> намунасидаги $E_c-0,33$ эВ, $E_c-0,45$ эВ ва $E_c-0,54$ эВ ли ва p-Si<Co> намунасида $E_v+0,32$ эВ ли чуқур сатҳлар пайдо бўлиши самарадорлиги кислород билан боғлиқ бўлади. Тадқиқ этилаётган намуналарда SiO₂ зарраларининг мавжудлиги Co атомларига тегишли чуқур сатҳлар концентрациясининг ортишига (4-расм, 2-чизик) ва SiO₄ нинг мавжудлиги чуқур сатҳлар концентрациясини камайишига олиб келиши аниқланган (4-расм, 3-чизик).

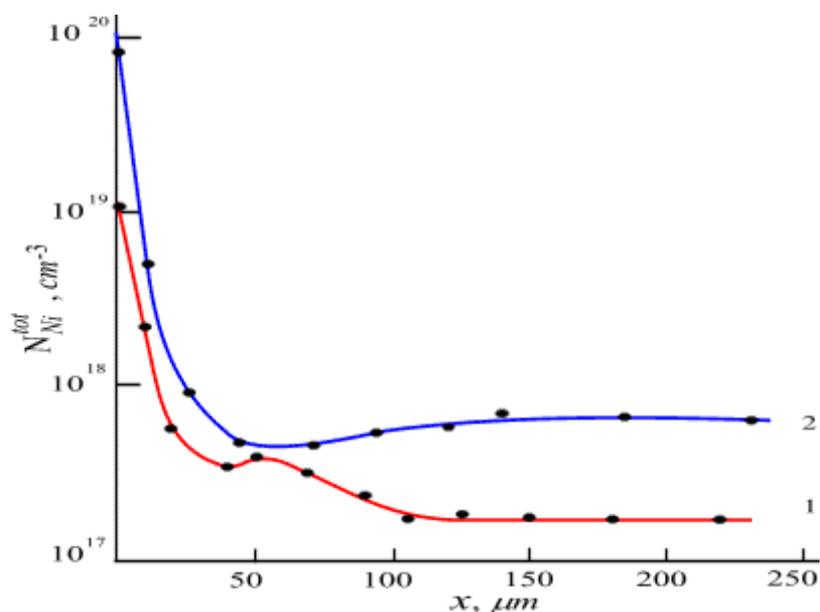
n-Si<Co> (5-расм, 1-чизик) ва диффузия олди иссиқлик ишлови берилган n-Si<Co> (5-расм, 2,3-чизик) намуналарининг фотосиғимли спектрларида ҳам шундай ҳолат содир бўлган.



5-расм. n-Si<Co> (1) ва диффузия олди иссиқлик ишлови берилган n-Si<Co> (1100⁰C-2-чизик, 1200⁰C-3-чизик) намуналарининг фотосиғим спектрлари

6-расмда Mn қатлами билан қайта иссиқлик ишлови берилган кремний намунасидаги Ni атомларининг тақсимооти келтирилган.

Mn қатламли иккинчи гуруҳ намуналарда иссиқлик ишловидан кейин Ni концентрацияси $2,5\cdot 10^{18}$ см⁻³ гача ортиб кетди, лекин ушбу гуруҳ назорат намуналарининг сиртида иссиқлик ишловидан кейин Ni концентрацияси унчалик кўп миқдорда ортмаганини кўришимиз мумкин.

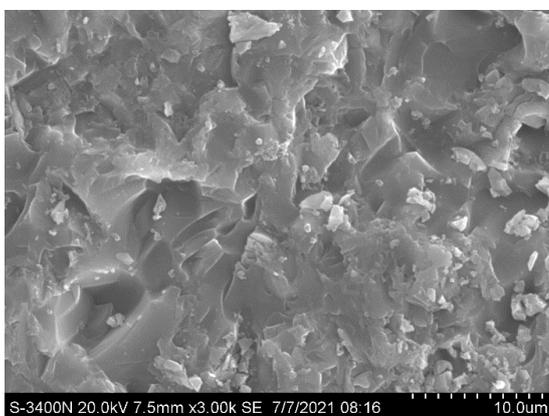


6-расм. 1200 °C да диффузиядан сўнг Ni нинг кремнийдаги концентрация тақсимооти (1) ва аввалдан Mn билан легирланган Si<Mn, Ni> намунаси (2)

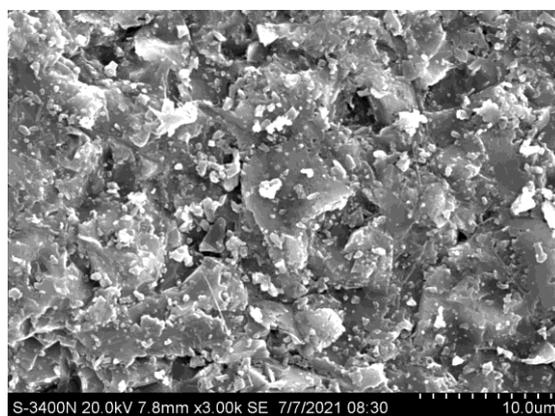
Mn қатламга эга иккала гуруҳ наъмуналарнинг хажмидаги умумий концентрация даражаси иссиқлик ишлови сабаб сезиларли ($2 \cdot 10^{17}$ дан $3 \cdot 10^{16}$ cm^{-3} гача) камайганини, назорат наъмуналарида эса Ni умумий концентрация даражаси 2 марта камайганини кўришимиз мумкин.

Бу бобда n-Si монокристалл кремний (назорат) ва хром билан легирланган кремнийнинг нурнинг комбинацион сочилиш механизмига асосланган спектрлари ва намуналар юзаларининг микрофотографиялари келтирилган.

Нурнинг комбинацион сочилиш механизми асосида олинган спектрлар чўққиларнинг шакли ва жойлашувига асосан нанокристалларнинг ўлчамлари, аморф ва кристалл фазалар билан таъсирлашуви ҳамда кристалл тузилишини белгилаб беради.



а

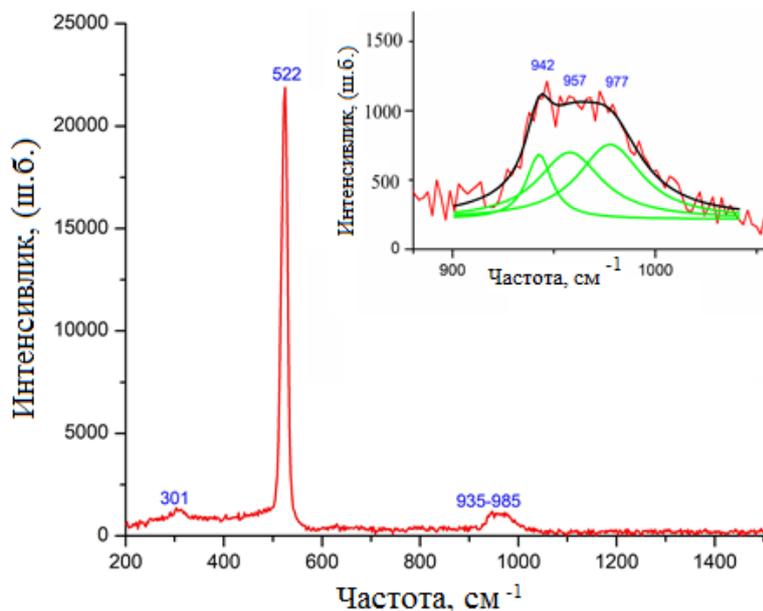


б)

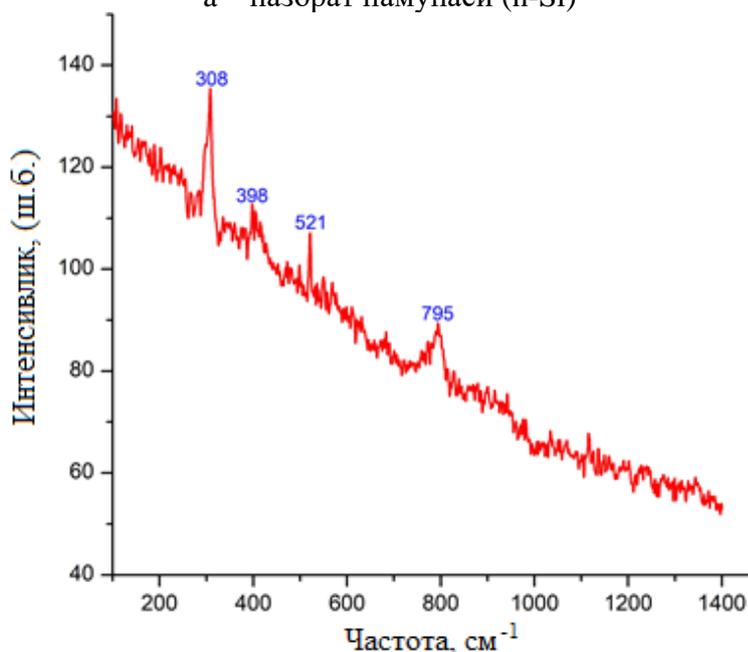
7-расм. Монокристалл кремний юзасининг микрофотографияси. а – назорат намунаси (n-Si), б – хром билан легирланган кремний (n-Si<Cr>)

7-расмда n-Si кремний монокристаллининг Cr билан легирлашдан олдинги ва кейинги микрофотографиялари келтирилган. Иккала ҳолатда ҳам намуна юзасининг морфологияси бир хил. Кремнийни хром билан легирланиши унинг юзасидаги нанозарралар миқдори ва зичлигининг ошганини кўриш мумкин.

8-расмда Si ва Cr билан легирланган Si намуналарининг CARS Raman Spectrometer қурилмаси ёрдамида олинган экспериментал спектрлари келтирилган. 8а-расмда келтирилган нурнинг комбинацион сочилиши спектрларида 522 см^{-1} да юқори интенсивликка эга бўлган кремнийни характерловчи чўққи ҳосил бўлган.



а – назорат намунаси (n-Si)



б – хром билан легирланган кремний (n-Si<Cr>)

8-расм. Монокристалл кремнийда нурнинг комбинацион сочилиш спектрлари

n-Si намунасининг олинган спектрларида (8-расм, а) 301 см^{-1} да тебраниш мавжуд. Бундан ташқари, ба-расмда $935\text{--}985\text{ см}^{-1}$ да кенгрок чўкқилар ҳосил бўлган. Бу тебранишлар бир нечта кўндаланг оптик фонларнинг (2ТО) сочилиши ва уларнинг обертон ҳолатда эканлиги билан изоҳланади.

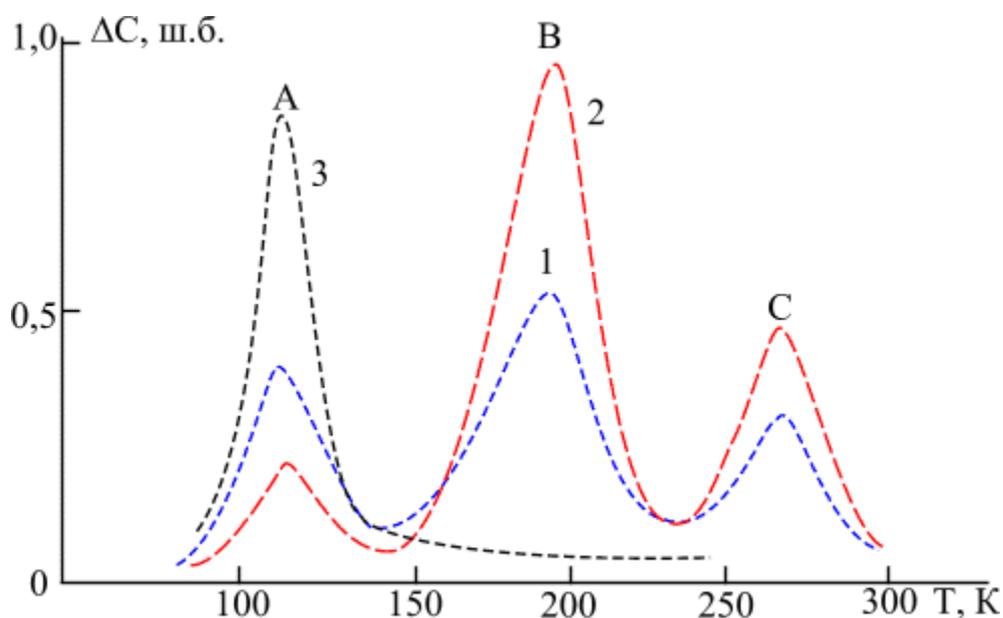
8б-расмдан маълумки, n-Si ни кейинчалик хром билан легирланиши унинг нурнинг комбинацион сочилиш спектрларини сезиларли ўзгартирди. Олинган спектрларда 308 , 398 , 521 и 795 см^{-1} да чўкқилар мавжудлиги аниқланди. 521 см^{-1} даги чўкқи Si билан боғлиқ.

301 см^{-1} даги кремнийга тегишли чўкқидан юқорирак 308 см^{-1} даги чўкқи кремнийнинг боғланишлари ҳисобланади. n-Si<Cr> намунасида аниқланган 308 и 398 см^{-1} тўлқин сонида ҳосил бўлган чўкқилар CrSi₂ га тегишли эканлиги аниқланди. 795 см^{-1} даги чўкқи SiO₂ билан боғлиқ эканлиги маълум бўлди.

Тадқиқот натижаларига кўра, хром атомлари билан легирланган монокристалл кремний намуналари Раман спектрлари уларнинг таркибий тузилишини ва нуқсонлар миқдорини, шунингдек кристаллардаги бошқарилиб бўлмайдиган технологик киришмалар ва кислород мавжудлигини баҳолаш учун бир восита сифатида фойдаланиш мумкин деган хулоса қилиш мумкин.

«Кремнийда 3d-элементларининг нодир ер элементлари билан ўзаро таъсирлашуви» деб номланган тўртинчи бобда 3d-элементларининг гольмий ва гадолий нодир ер элементлари билан ўзаро таъсирлашуви жараёнлари ўрганилган.

Si<Ho> намунасининг DLTS спектрлари кўрсатадики, нейтрон-активацион анализ усули орқали аниқланган Ho атомларининг концентрацияси $6 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ га тенг бўлишига қарамай, Si да ҳеч қандай сезиларли концентрацияга эга бўлган чуқур сатҳ ҳосил қилмайди.



9-расм. n-Si<Cr> (1), n-Si<Ho, Cr> (2) ва n-Si (3) намуналарининг DLTS спектрлари

Хром атомлари киритилган n-Si<Ho> намунасининг DLTS спектрларига кўра, кремний панжарасида Ho атомларининг мавжудлиги дефектлар ҳосил бўлиш жараёнига катта таъсир кўрсатади: Ho атомларининг мавжудлиги Cr атомлари билан боғлиқ чуқур сатҳлар концентрациясини ортишига сабаб бўлади (9-расм, 2-чизиқ, B ва C чўққилар).

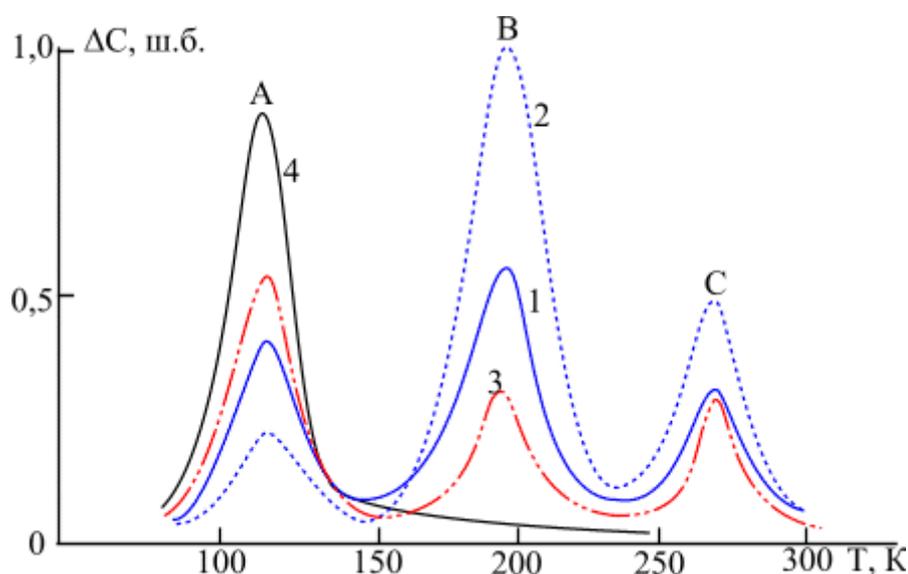
n-Si<Ho, Cr> намунасида гольмий киришмалари мавжудлиги n-Si<Cr> намунасига нисбатан иссиқлик нуқсонларининг ҳосил бўлиш эффективлигини янада камайтиради (9-расм, 2-чизиқ, A чўққи).

n-Si<Ho> ва n-Si<Ho, Cr> намуналарининг DLTS спектрларининг таҳлилига кўра, n-Si<Ho, Cr> намунасидаги Cr га тегишли $E_C - 0.41$ эВ ва $E_C - 0.51$ эВ ли чуқур сатҳлар концентрацияси n-Si<Ho> намунасидаги чуқур сатҳлар концентрациясига нисбатан 3-4 марта ортиқ эканлигини кўришимиз мумкин.

Кремнийдаги хром атомларига боғлиқ чуқур марказлар концентрациясининг ортиши аниқланганлиги, кремнийга юқори концентрацияли Ho атомларини киритилиши натижасида кремний панжарасидаги турли нуқсонлар ўрнини эгаллашлиги билан изоҳланади.

Кремний панжарасида гольмий атомларининг мавжудлиги иссиқлик нуқсонларининг ҳосил бўлишига тўсқинлик қилади. Иссиқлик ишлов берилиши натижасида ионлашиш энергияси $E_C - 0.20$ эВ га тенг бўлган чуқур марказ ҳосил бўлишининг самарадорлиги n-Si намунасига нисбатан n-Si<Ho> намуналарида анча паст эканлиги аниқланди.

Шундай қилиб, гольмий атомлари кремнийда электр активлигини намоён қилмасдан хром билан боғлиқ чуқур марказларни ҳосил бўлиш самарадорлигини ошириши ва бу марказларнинг хоссаларини барқарорлаштириши аниқланди.



10-расм. n-Si<Cr> (1), n-Si<Gd, Cr> (2, секин совитилган), n-Si<Gd, Cr> (3, тез совутилган) ва n-Si (4, назорат) намуналарининг DLTS спектрлари

Si<Gd,Cr> намунасида гадолиний атомларининг мавжудлиги, хром атомларини киритилгандан сўнг тез совитилганда Cr билан боғлиқ $E_C - 0.41$ эВ,

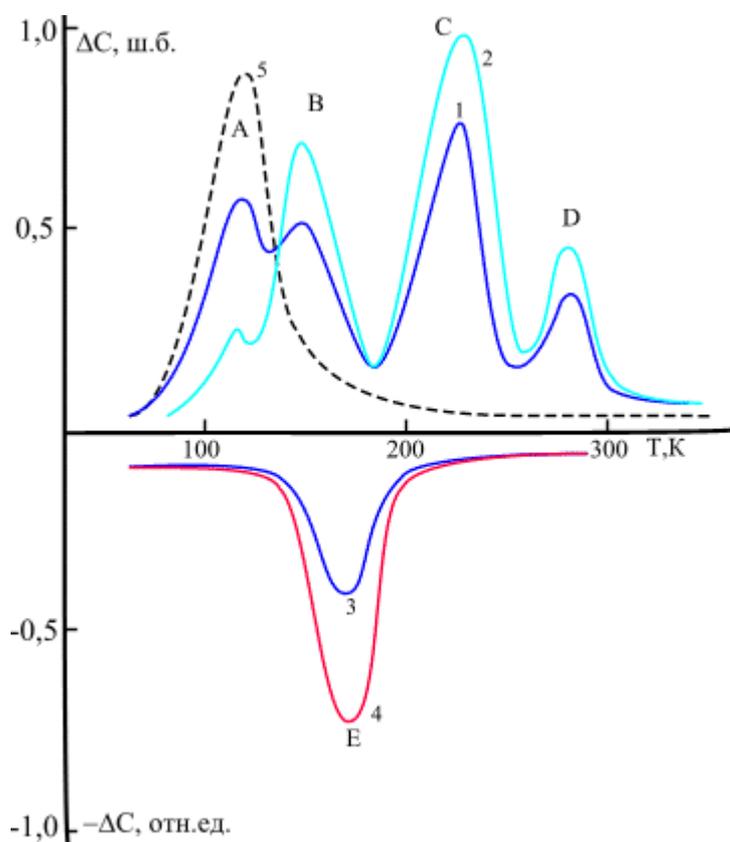
$E_c - 0.51$ эВ ли чуқур сатҳлар концентрациясининг Si<Cr> намунасига нисбатан 2-3 марта ортишига сабаб бўлиши аниқланган. (10-расм, 2-чизик).

n-Si<Gd, Cr> намунасида қолган сатҳлар концентрациясида сезиларли ўзгаришлар кузатилмаган.

Со билан легирланган Si намуналарида энергетик спектрлар ҳосил бўлишига Gd атомларининг таъсири DLTS усули ёрдамида тадқиқ этилган.

Кобальт билан легирланган n-типли кремнийнинг сиғимли спектроскопия усули ёрдамида олинган спектрларига кўра, кобальт атомлари кремнийда $E_c - 0.20$ эВ, $E_c - 0.33$ эВ, $E_c - 0.45$ эВ ва $E_c - 0.54$ эВ ионлашиш энергияси ва мос равишда $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-17}$ см², $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_n = 1.1 \cdot 10^{-15}$ см² ва $\sigma_n = 1.5 \cdot 10^{-15}$ см² га тенг заряд ташувчиларнинг қамраб олиш юзасига эга бўлган тўртта чуқур сатҳ ҳосил қилиши аниқланди. (11-расм, 1-чизик).

p-Si<Co> намунасида таъқиқланган зонанинг пастки ярим соҳасида $E_v + 0.32$ эВ ли $\sigma_p = 2 \cdot 10^{-16}$ см² га тенг заряд ташувчилар қамраб олиш юзасига эга бўлган яна бир сатҳ ҳосил қилди. (11-расм, 3-чизик).



11-расм. n-Si<Co>(1), n-Si<Gd,Co> (2), p-Si<Co> (3), p-Si< Gd,Co> (4) ва назорат (5) намуналарининг DLTS спектрлари

Ўстириш пайтида киритилган Gd атомлари Со атомлари диффузия йўли билан киритилган n- ва p-Si типли кремний DLTS спектрларининг трансформация бўлишига олиб келиши ўрганилди ва Со атомлари билан боғлиқ чуқур сатҳлар ҳосил бўлиш самарадорлигига сезиларли таъсир кўрсатиши аниқланди. (11-расм, 2,4-чизиклар).

Олинган натижаларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{Gd,Co}\rangle$ намуналарида кобальт ва гадолиний атомлари концентрацияларининг ортиши иссиқлик нуқсонлари сатҳи концентрацияси миқдорини кескин камайишига сабаб бўлади. Co ва Gd атомлари $n\text{-Si}\langle\text{Gd, Co}\rangle$ намунасида иссиқлик нуқсонларининг ҳосил бўлишига тўсқинлик қилишини хулоса қилиш мумкин.

ХУЛОСА

3d-элементлар билан легирланган кремнийда чуқур сатҳли ва технологик киришмаларнинг ўзаро таъсирлашув жараёнларини комплекс усуллар ёрдамида тадқиқ қилиш орқали қуйидаги хулосаларга келинди:

1. Хром, кобальт ва марганец киришмалари билан кремнийни легирлашнинг технологик режимлари оптималлаштирилган.
2. Илк бор хром, кобальт ва марганец киришмалари чуқур сатҳларининг ҳосил бўлиш самарадорлиги кремний ҳажмидаги бошқариб бўлмайдиган киришмалар ва нуқсонлар ҳолатига боғлиқлиги аниқланган.
3. Илк бор кремнийда кислород атомларининг мавжудлиги юқори ҳароратли диффузия усулида кремнийга киритилган хром, кобальт ва марганец киришмаларининг чуқур сатҳлари концентрациясини сезиларли даражада камайтириши ва оптик фаол тугунлараро кислород концентрацияси $N_0^{\text{опт}}$ эса 3d-элементларининг концентрациясига боғлиқ ҳолда 10÷25% га камайиши аниқланган.
4. Илк бор 1100°C ли юқори ҳароратли ишлов бериш натижасида оптик фаол кислород миқдори ($N_0^{\text{опт}}$) ни 45÷50% гача камайтирилишга эришилди. $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ да SiO_2 ҳосил бўлиши натижасида Co атомлари ҳосил қилган чуқур сатҳлар концентрациясининг ортиши ва SiO_4 зарралари эса чуқур сатҳлар концентрациясини камайишига сабаб бўлишлиги аниқланган.
5. Илк бор хром, кобальт ва марганец киришмалари билан легирланган кремнийда бошқариб бўлмайдиган киришма – темир билан таъсирлашуви натижасида $E_C - 0,30$ эВ ионлашиш энергиясига эга янги чуқур сатҳли марказ ҳосил бўлиши аниқланган.
6. $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ намунаси юзасидаги марганец қатлами орқали легирлаш Ni нинг электрфаол атомларининг концентрацияси камайишига олиб келиши ҳамда Si юзасидаги марганец қатлами никель киришмалари учун геттер вазифасини бажариши аниқланган.
7. Илк бор гадолиний ва гольмий (нодир ер элементлари) кремний ҳажмида мавжудлиги хром, кобальт ва марганец киришмаларини чуқур сатҳларининг ҳосил бўлиш самарадорлигини ошишига олиб келиши (гадолиний 2÷3 марта ва гольмий 3÷4 марта) ҳамда иссиқлик нуқсонларини концентрациясини 4÷5 марта ва ва радиациявий нуқсонлари концентрациясини 3÷4 марта камайиши аниқланган.

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

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

ФАЙЗУЛЛАЕВ КАХРАМОН МАХМУДЖАНОВИЧ

**ПРОЦЕССЫ МЕЖПРИМЕСНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В
КРЕМНИИ С ПРИМЕСЯМИ 3d-ЭЛЕМЕНТОВ**

01.04.10 – физика полупроводников

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

Ташкент–2022

Тема диссертации доктора философии наук (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2019.2.PhD/FM382.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана.

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

Научный руководитель: Утамурадова Шарифа Бекмурадовна
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломкодилович
доктор физико-математических наук, доцент
Камалов Амангельди Базарбаевич
доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: Ферганский государственный университет

Защита диссертации состоится «4» 03 2022 года в 10⁰⁰ 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 имени Мирзо Улугбека по адресу: 100057, г.Ташкент, ул. Янги Олмазор, дом 20. Тел: (+99895)146-77-44, факс: (99871) 246-19-76,, e-mail:info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения цифровых образовательных технологий института (зарегистрирована за №34), по адресу: 100057, г.Ташкент, ул. Янги Олмазор, дом 20. Тел: (+99895)146-77-44, факс: (99871) 246-19-76.

Автореферат диссертации разослан «22» 02 2022 года.
(реестр протокола рассылки 34 от «22» 02 2022 года).



З.Т.Азаматов
председатель Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

Ж.Ж.Хамдамов
заместитель секретаря Научного совета
по присуждению ученых степеней,
PhD

Х.К. Арипов
заместитель председателя научного семинара
при Научном совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Во всем мире высокие темпы развития научно-технического прогресса в последние годы в основном обеспечиваются достижениями исследований в области полупроводниковой электроники, что определяет дальнейшее направление исследований – повышение качества полупроводниковых материалов, разработка технологий создания монокристаллов с управляемыми электрофизическими свойствами и определение характера влияния различных внешних воздействий на эксплуатационные параметры этих материалов и изделий на их основе.

Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» гласит: обеспечение неразрывной связи научных исследований в области физики с производством, расширение масштаба научных работ, направленных на решение проблем в отраслях экономики; повышение результативности и практического значения научных исследований и инновационной деятельности...»¹. Создание нового типа высокочувствительных полупроводниковых материалов для развития микроэлектроники в этой области имеет большое научное значение.

В настоящее время установлено, что многие важнейшие свойства полупроводниковых материалов и приборов определяются присутствием в них примесных атомов с глубокими уровнями. Изучено поведение многих примесных элементов в монокристаллическом кремнии – основном материале современной полупроводниковой электроники. Однако, несмотря на то, что накоплен достаточно большой объём экспериментальных данных по исследованию поведения примесей переходных металлов в кремнии, попытки создания единой модели состояния примесных атомов в кристаллической решётке кремния не имели успеха, хотя имеются отдельные фрагменты такой модели, которые качественно правильно описывают экспериментальные результаты. В этом отношении наиболее полно изученным является поведение 3d-переходных металлов в кремнии, за исключением, малоизученных атомов хрома (Cr) и кобальта (Co) в кремнии. Исследование поведения Cr и Co дает возможность определения механизмов миграции примесей 3d-переходных металлов в кристаллической решётке и управления параметрами кристаллов и приборов на их основе.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в постановлении Президента Республики Узбекистан «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года № ПП-5032 и Постановлении Кабинета Министров Республики Узбекистан «О мерах по развитию альтернативной энергетики,

¹ Постановление Республики Узбекистан № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики».

электротехники и микроэлектроники, государственной поддержке повышения эффективности исследований в области физики полупроводников, а также о мерах по укреплению Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека» от 12 октября 2021 года № 639, Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах, утвержденной Указом Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП-4947, а также в других нормативно-правовых актах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Настоящая работа выполнена в соответствии с Приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: Ф2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и ППИ-3 «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Анализ результатов исследований, проводимых за рубежом известными учёными в области физики полупроводников и полупроводниковой нано- и микроэлектроники (А.А.Лебедев, В.И.Фистул, E.R. Weber, K. Graff, H. H. Woodbury, W. Ammon, C. Claeys, C.K. Estreicher, H. Pieper, H. Nakashima) показывают, что экспериментальные исследования электрофизических, оптических, люминесцентных и других свойств полупроводников с различными глубокими уровнями, среди которых особое место занимают примеси 3d-элементов в Si, сегодня позволяют строить определенные общие модели глубоких центров, но эти модели еще не совершенны.

В работах А.А.Лебедева, В.И.Фистуля, Л.С.Бермана, А.Т.Мамадалимова, Х.С.Далиева и Ш.Б. Утамурадовой проведена идентификация целого ряда глубоких уровней в кремнии и определены их энергетические параметры. В работах К.П. Абдурахманова на основе полученных результатов разработан способ управления спектром радиационных дефектов в кремниевых диффузионных диодах с целью понижения времени восстановления обратных характеристик готовых приборов. М. К. Бахадырхановым, С.З. Зайнабидиновым была показана возможность улучшения параметров полупроводниковых структур на основе компенсированного кремния путем введения различных глубоководуровневых примесей.

Несмотря на огромное количество экспериментальных и теоретических данных, природа физических явлений, происходящих в кремнии, специально легированном примесями переходных элементов и их взаимодействие с неконтролируемыми технологическими примесями остаются до сих пор неизученными.

Несмотря на большое число экспериментальных данных по изучению свойств полупроводников и полупроводниковых структур до настоящего времени отсутствует картина, позволяющая прогнозировать поведение

кремния и структур на его основе при воздействии различных внешних факторов: давления, радиации и солнечного света.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Национального университета Узбекистана и Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана по темам: ОТ-Ф2-11 «Исследование закономерностей формирования наноразмерных дефектов в приповерхностных слоях и объеме кремния с примесями d-элементов» (01.07.07–31.12.20 гг.).

Целью исследования является комплексное исследование процессов взаимодействия примесей, создающих глубокие уровни с технологическими примесями в кремнии, легированном 3d-элементами с помощью нестационарной емкостной спектроскопии, фотоемкостной и инфракрасной спектроскопии.

Задачи исследования: оптимизировать технологию легирования кремния примесями хрома, кобальта и марганца и изучить электрофизические свойства образцов Si, легированных разными методами этими примесями;

определить энергетический спектр центров с глубокими уровнями, создаваемых примесями хрома, кобальта и марганца и изучить эффективность их образования;

исследовать влияние исходной дефектности структуры кремния на процессы образования дефектных центров в кремнии, легированном примесями хрома, кобальта и марганца;

изучить влияние примесей 3d-элементов на процессы термического и радиационного дефектообразования в кремнии;

исследовать влияние электронейтральных примесей (редкоземельные элементы) на процессы дефектообразования в кремнии, легированном примесями хрома, кобальта и марганца;

исследовать взаимодействие атомов 3d-элементов с технологическими примесями (железом, кислородом, углеродом) в кремнии.

Объектом исследования является монокристаллический кремний, выращенный методом Чохральского и бестигельной зонной плавки, а также Si, легированный примесями 3d-переходных (хром, кобальт, марганец) и редкоземельных элементов (гадолиний, гольмий).

Предметом исследования является изучение взаимодействия примесей, создающих глубокие уровни с технологическими примесями в кремнии, легированном 3d-элементами.

Методы исследований. Для проведения исследований использовались методы нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), фотоемкости (ФЕ), ИК-спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света (Рамановская спектроскопия).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

оптимизированы технологические режимы легирования кремния примесями 3d-элементов (хрома, кобальта и марганца);

установлено, что эффективность образования глубоких уровней, создаваемых примесями хрома, кобальта и марганца в кремнии зависит от состояния неконтролируемых примесей и дефектов в объеме кремния;

впервые установлено, что присутствие атомов кислорода в кремнии значительно снижает концентрацию глубоких центров хрома, кобальта и марганца, введенных в кремний методом высокотемпературной диффузии, а концентрация оптически активного междузельного кислорода N_O^{opt} снижается на 10÷25% в зависимости от концентрации 3d-элементов;

впервые установлено, что присутствие связанных состояний кислорода - SiO_2 и SiO_4 в кремнии, легированном примесями хрома, кобальта и марганца, приводит к изменению эффективности образования глубоких уровней и трансформации спектров DLTS;

впервые обнаружено, что взаимодействие примесей хрома, кобальта и марганца с неконтролируемой примесью - железом в кремнии приводит к образованию нового глубокого центра с энергией ионизации $E_C - 0,30$ эВ;

установлено, что легирование образцов $Si\langle Ni \rangle$ слоем марганца на поверхности кремния приводит к уменьшению концентрации электроактивных атомов никеля и слой марганца на поверхности Si играет роль геттера для примеси никеля;

впервые установлено, что присутствие в объеме кремния редкоземельных элементов - гадолиния и гольмия в кремнии, легированном примесями хрома, кобальта и марганца приводят к увеличению эффективности образования глубоких уровней (Gd в 2÷3 раза и Ho в 3÷4 раза) и снижению концентрации термических дефектов в 4÷5 раз и радиационных дефектов в 3÷4 раза.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: Разработаны технологические режимы легирования кремния примесями Cr, Co, и Mn, приводящие к снижению эффективности образования термических дефектов в 4÷5 раз и радиационных дефектов в 3÷4 раза и стабилизации параметров Si ;

Разработаны способы геттерирования быстро диффундирующих неконтролируемых примесей типа железа в объеме кремния путем легирования примесями переходных элементов из металлического слоя, нанесенного на поверхность образцов.

Достоверность результатов исследований основывается и подтверждается применением DLTS, фотоемкости, сканирующей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света, обладающих высокой чувствительностью и разрешающей способностью.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в расширении представлений о физических процессах, происходящих в монокристаллическом кремнии при межпримесном взаимодействии в кремнии, легированном 3d-переходными элементами и установлении закономерностей образования глубоких уровней в полупроводниках.

Полученные результаты по повышению термической стабильности, и радиационной стойкости параметров кремния путем введения переходных элементов могут быть использованы в качестве рекомендаций при изготовлении различных полупроводниковых приборов.

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных научных результатов исследования взаимодействия примесей с глубокими уровнями и технологическими примесями в кремнии, легированном 3d-элементами, а также влияния на них внешних факторов:

данные о возможности управления дефектной структурой легированного кремния путем проведения цикла пред диффузионных высокотемпературных обработок; данные, свидетельствующие о том, что диффузионное введение атомов Cr и Gd в кремний приводит к снижению эффективности образования в кремнии термических дефектов в 4-5 раз, радиационных дефектов в 3-4 раза и стабилизации его параметров; способ очистки объема кремния от технологических, неконтролируемых примесей были использованы в Международном инновационном центре нанотехнологий СНГ в проекте на тему "Влияние излучения на свойства кремниевых полупроводников", выполненном под руководством Магазова Н. в 2021 году (Справка Международного центра инноваций в области нанотехнологий СНГ № 010/136 от 12 августа 2021 г.). Использование научных результатов позволило управлять дефектной структурой легированного кремния и очистить объем кремния от неконтролируемых примесей.

Оптимальные технологические режимы легирования кремния примесями Cr и Co; методы снижения концентрации термодиффектов, образующихся в объеме кремния под воздействием различных внешних факторов в 3-4 раза путем введения в кремний примесей Cr и Co, а радиационных дефектов в 2-3 раза; технология геттерирования с использованием примесей 3d-элементов (Cr и Co) неконтролируемых дефектов (типа железа), образуемых в объеме кремния под воздействием различных внешних факторов, были применены при выполнении фундаментального проекта Каракалпакского государственного университета на тему ОТ-Ф-2-77 "Способ повышения надежности полупроводниковых приборов с учетом внутренних дефектов на основе моделирования" (Справка Министерства высшего и среднего специального образования № 3/19-24/12-314 от 24 декабря 2021 г.). Использование научных результатов позволило разработать метод повышения надежности полупроводниковых приборов и на основе моделирования дало возможность увеличить стабильность полупроводниковых приборов в 2-3 раза с учетом внутренних дефектов.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 6 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 18 научных трудов, из них 8 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики

Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 136 страницах, включая 29 рисунков, 7 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи.

Первая глава «**Состояние исследований поведения примесных атомов 3d-элементов в кремнии**» посвящена литературному обзору. В этой главе изложены опубликованные данные о поведении хрома, кобальта и железа в кремнии. Приведен обзор сведений о глубоких уровнях, образующихся при введении этих примесей в кремний. Систематизированы параметры глубоких уровней (ГУ) хрома, кобальта и железа в кремнии, наблюдавшиеся различными авторами. Отмечены основные направления, по которым проводились исследования этих примесей в кремнии, а также приведены данные об их взаимодействиях с другими примесями в кремнии. Проведен анализ некоторых работ, посвященных изучению свойств кремния, легированного различными элементами и данных по влиянию технологических примесей в кремнии и дефекты, обусловленные кислородом и углеродом на электрофизические свойства кремния с примесями ПЭ.

На основании полученных данных были разработаны задачи диссертационного исследования.

Во второй главе «**Методы исследования и технология изготовления образцов**» подробно описываются технологии проведения термических обработок и изготовления диодных структур. Детально изложены особенности технологии легирования кремния примесями 3d-элементов.

Описаны основные положения емкостной спектроскопии глубоких уровней в кремнии. Изложены основы классического метода DLTS, основанного на измерении разности релаксационного сигнала в моменты времени t_1 и t_2 . Описана методика измерения спектров DLTS и расчета спектров DLTS, полученных путем однократного сканирования. Описаны основы метода фотоемкости.

Изложены основы исследования структуры образцов методом сканирующей электронной микроскопии.

Описана методика измерения спектров ИК-поглощения для определения концентрации кислорода и углерода в кремнии с помощью инфракрасного спектрофотометра SPECORD – 75-IR, работающего в двухлучевой схеме в ИК-области спектра от 1200 до 400 см^{-1} .

Приведены основы измерения спектров комбинационного рассеяния света.

В третьей главе «Влияние атомов 3d-элементов на процессы дефектообразования в кремнии» приведены результаты исследования процессов образования глубоких уровней в кремнии, с примесями 3d-элементами – хромом, кобальтом, железом и определены энергетические уровни, создаваемые в запрещенной зоне кремния этими примесями и проведена идентификация энергетического спектра глубоких уровней, создаваемых примесями этих ПЭ в Si с помощью методов емкостной спектроскопии (DLTS и ФЭ);

Установлено, что при совместном введении хрома и железа в кремний одновременно с уменьшением концентрации уровней $E_C - 0,41$ эВ и $E_C - 0,51$ эВ (Cr) и $E_V + 0,41$ эВ (Fe), наблюдается образование нового уровня в верхней половине запрещенной зоны с энергией ионизации $E_C - 0,30$ эВ, который, вероятно, связан с примесной парой Cr с Fe в Si. (рис.1).

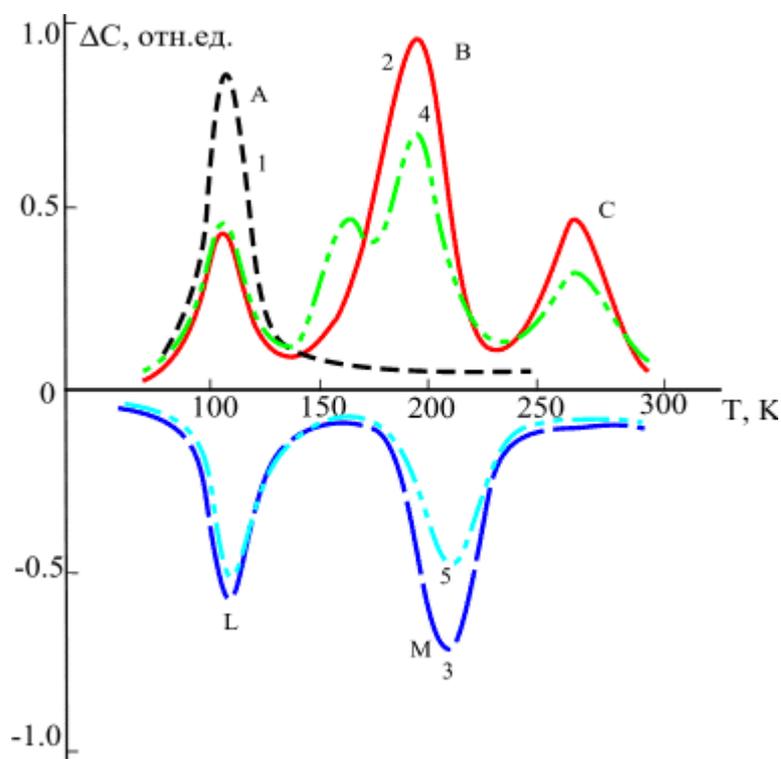


Рис.1. Спектры DLTS в образцах исходного Si (1), Si<Cr> (2), Si<Fe> (3) и Si<Cr,Fe> (4, 5)

Расчеты спектров в образцах n-Si<Cr> (рис. 1, кривая 2), показали, что диффузионное введение атомов хрома приводит к образованию трех глубоких уровней в верхней половине запрещенной зоны с фиксированным значением энергии ионизации $E_C - 0,20$ эВ, $E_C - 0,41$ эВ и $E_C - 0,51$ эВ, причем, только два последних уровня связаны с атомами хрома.

Обнаружено, что при одновременном или последовательном введении Cr и Fe в Si, концентрации глубоких уровней, связанных с электрически

активными атомами хрома и железа, значительно снижаются. (рис. 1, кривые 4 и 5).

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что при ВТО в интервале $900 \div 1200$ °С с последующей резкой закалкой образцов Si<Cr> наблюдается также новый ГУ $E_C - 0,30$ эВ, который отличается термической нестабильностью и образование или отжиг его сопровождаются синхронными изменениями концентрации уровня хрома.

Аналогичная картина наблюдалась и на спектрах фотоемкости образцов Si<Cr> и Si<Cr,Fe> (рис. 2).

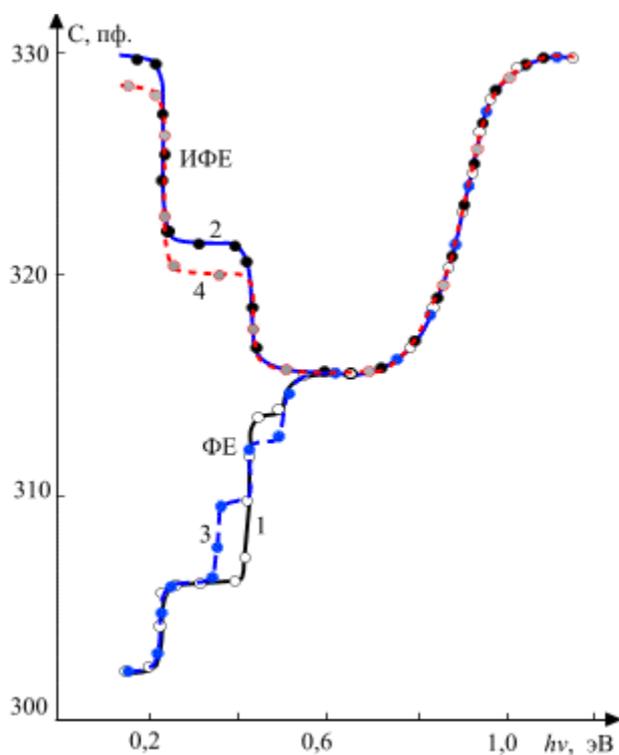


Рис.2. Спектры фотоемкости и индуцированной фотоемкости образцов Si<Cr>(1,2) и Si<Cr,Fe> (3,4)

Исследованы также особенности ИК-поглощения в образцах Si, легированных хромом и железом.

На рис. 3 приведены типичные спектры ИК-поглощения в образцах Si (1), Si<Fe> (2), Si<Cr> (3) и Si<Cr,Fe> (4), из которых видно, что уменьшение концентрации оптически активного кислорода N_O^{opt} составляет 10–25 % в зависимости от температуры диффузии Cr и Fe в кремнии.

Как следует из измерений спектров ИК-поглощения, диффузионное введение Cr (рис. 3, кривая 3) в решетку Si приводит к более сильному уменьшению концентрации оптически активного кислорода, чем в случае железа (рис. 3, кривая 2) в кремнии.

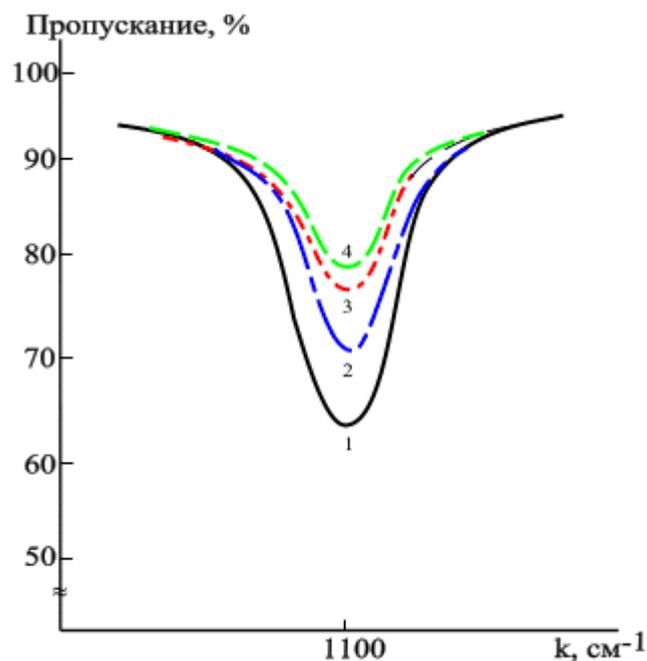


Рис.3. Спектры ИК-поглощения в образцах исходного Si (1), Si<Fe> (2), Si<Cr> (3) и Si<Cr,Fe> (4)

Изучение особенностей спектров ИК-поглощения в Si, одновременно легированном хромом и железом показало, что в таких образцах наблюдается еще большее уменьшение концентрации оптически активного междоузельного кислорода N_{O}^{opt} (рис. 3, кривая 4).

Установлено, что после диффузионного введения Co в образцах n-Si<Co> (рис.4, кривая 1) образуются глубокие уровни с фиксированными энергиями ионизации: $E_C - 0,20$ эВ (пик А), $E_C - 0,33$ эВ (пик В), $E_C - 0,45$ эВ (С) и $E_C - 0,54$ эВ (пик D) с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_n = 1,1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и $\sigma_n = 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ соответственно.

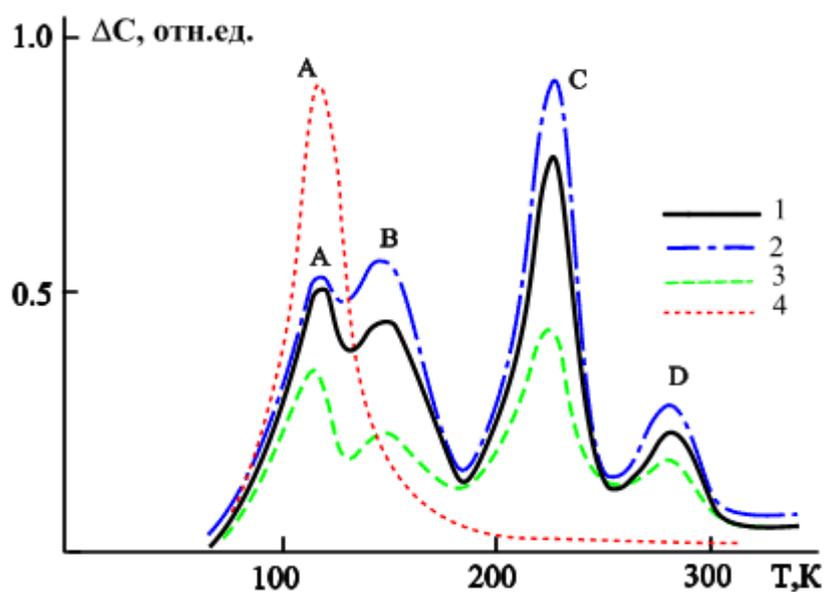


Рис.4. Спектры DLTS образцов n-Si<Co> (кривая 1) с предварительной термообработкой при: 2-1100°C, 3-1200°C. 4-контрольный образец

Показано, что в образцах $p\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ наблюдается лишь один уровень в нижней половине запрещенной зоны $E_V+0,32$ эВ с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_p=2\cdot 10^{-16}$ см², соответственно.

Анализ полученных результатов показал, что от наличия связанных состояний кислорода зависит эффективность образования только уровней $E_C-0,33$ эВ, $E_C-0,45$ эВ и $E_C-0,54$ эВ в $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ и уровня $E_V+0,32$ эВ в $p\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$.

Установлено, что присутствие частиц SiO_2 увеличивает концентрации уровней, обусловленных атомами Co (рис.4, кривая 2, а присутствие частиц SiO_4 , наоборот, снижает их концентрацию (рис. 4, кривая 3).

На спектрах фотоемкости образцов $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ (рис. 5, кривая 1) и $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ с предварительной термообработкой (рис.5, кривые 2 и 3) наблюдалась такая же картина.

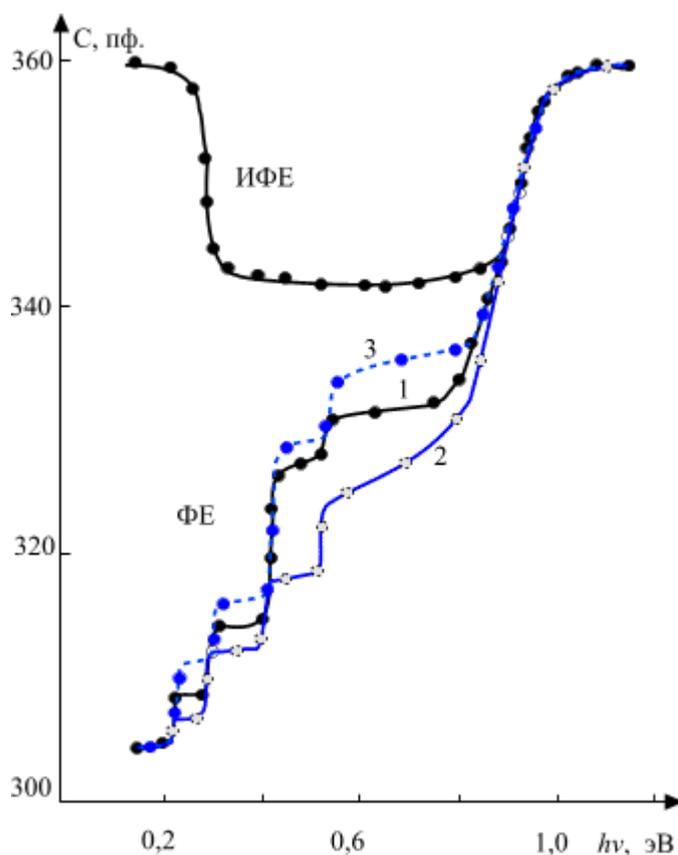


Рис.5. Спектры ФЕ и ИФЕ образцов $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ (1) и $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ с предварительной термообработкой (1100 °C-2, 1200°C-3)

На рис. 6, наряду с исходным распределением радиоактивного Ni , приведены концентрационные распределения этой примеси в образцах обеих групп после повторного отжига со слоями Mn .

Анализ показал, что в образцах второй группы со слоем Mn концентрация Ni у поверхности после отжига возросла на порядок до значения $2.5\cdot 10^{18}$ см⁻³, а в контрольных образцах этой группы отжиг приводил лишь к небольшому подъему концентрации Ni у поверхности. В объеме же образцов обеих групп со слоем марганца на поверхности отжиг приводил к существенному (от $2\cdot 10^{17}$ до $3\cdot 10^{16}$ см⁻³) уменьшению уровня полной концентрации, тогда как в

контрольных образцах уровень полной концентрации Ni уменьшался лишь в 2 раза.

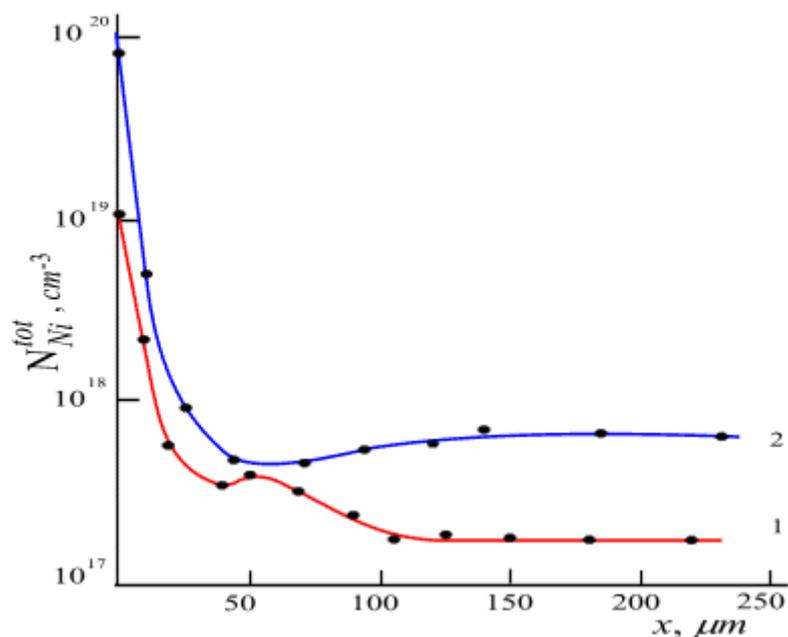
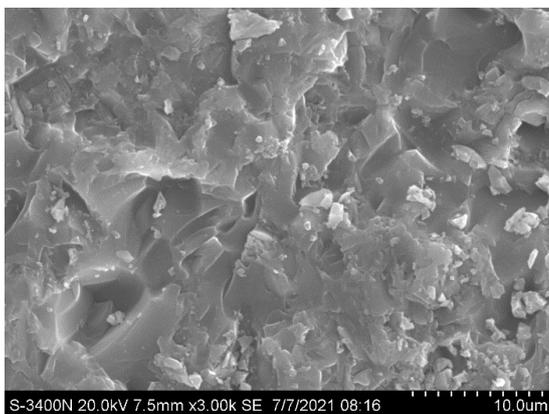


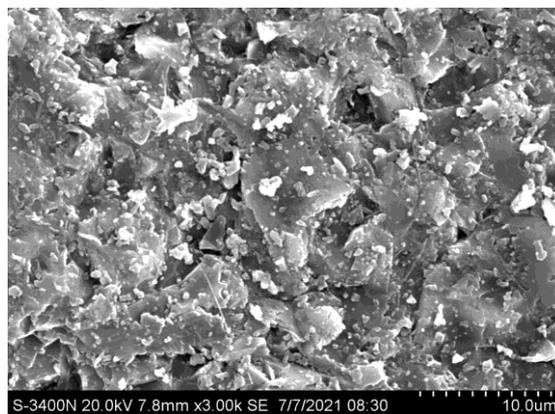
Рис.6. Концентрационное распределение Ni в кремнии в после диффузии при 1200 °С (1) и образцы Si<Mn, Ni>, предварительно легированные Mn (2)

В этой главе также изучаются спектры комбинационного рассеяния света (КРС) монокристаллов кремния, легированных атомами хрома и приведены типичные микрофотографии поверхности монокристаллов n-Si до и после легирования Cr. Полученные спектры КРС позволяют по форме и положению пиков оценить размер нанокристаллов, соотношение аморфной и кристаллической фаз, деформацию и напряжения в кристаллах, а также проанализировать состав кристаллов.

На рисунке 7 представлены типичные микрофотографии поверхности монокристаллов n-Si до и после легирования Cr. В обоих случаях морфология поверхности монокристаллов схожа. Однако видно, что легирование хромом приводит к увеличению плотности наночастиц на их поверхности.



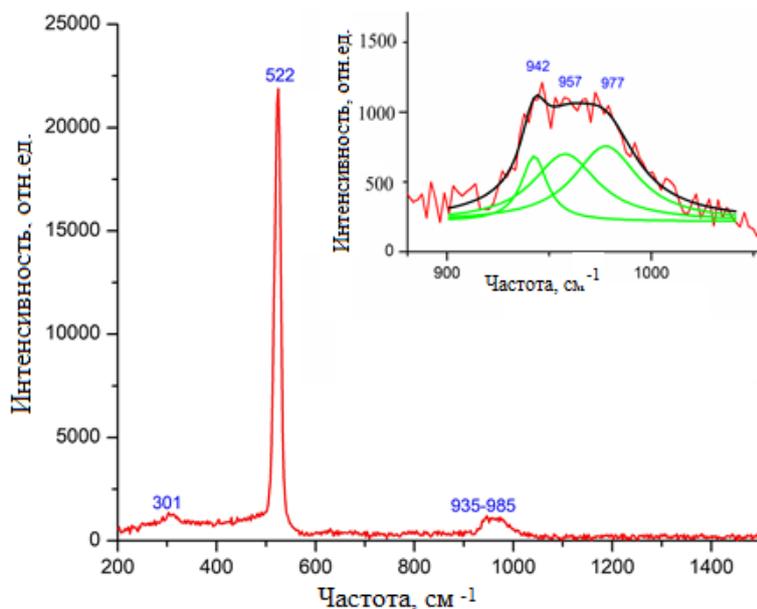
а



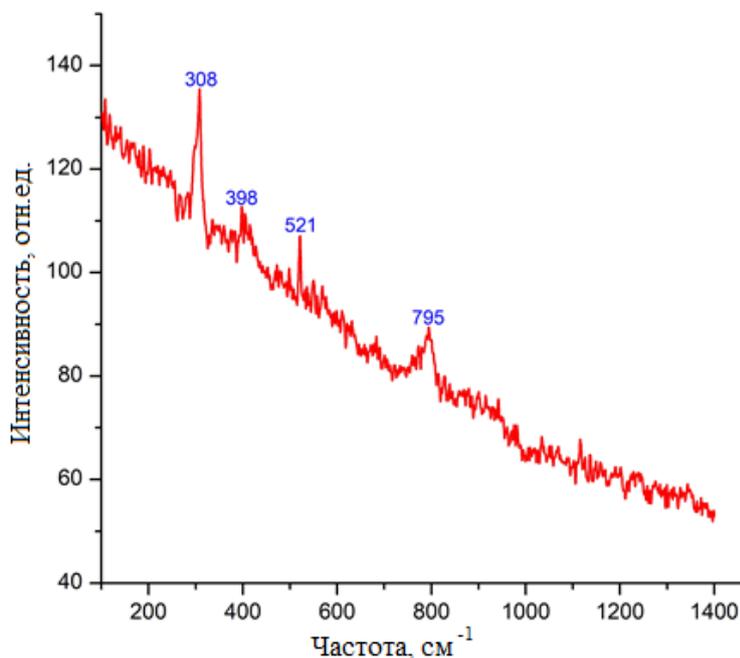
б)

Рис. 7. Микрофотографии поверхности монокристаллического кремния. а – контрольный образец (n-Si), б – кремний, легированный хромом (n-Si<Cr>)

На рисунке 8 представлены экспериментальные спектры комбинационного рассеяния света монокристаллического Si и Si легированного Cr, снятые при одинаковых условиях на CARS Raman Spectrometer.



а – контрольный образец (n-Si),



б – кремний, легированный хромом (n-Si<Cr>)

Рис. 8. Спектры комбинационного рассеяния света монокристаллического кремния

На КРС-спектре, представленном на рисунке 8а, присутствует характерный для кремния интенсивный пик при 522 см^{-1} с полной шириной на полувысоте (FWHM) 14 см^{-1} .

На полученном спектре образца n-Si (рисунок 8а) также присутствует колебание при 301 см^{-1} . Кроме того, на этом спектре присутствует широкий

пик при 935–985 см^{-1} . Данное колебание обусловлено рассеянием нескольких поперечных оптических фононов (2ТО) и их обертоном состоянием.

Как видно из рисунка 8б, дальнейшее легирование монокристаллов n-Si хромом приводит к значительному изменению их КРС-спектров. На полученном спектре присутствуют пики при 308, 398, 521 и 795 см^{-1} . Колебание при 521 см^{-1} можно приписать кремнию.

Наиболее интенсивный пик при 308 см^{-1} на КРС-спектре монокристалла n-Si<Cr> из-за большого сдвига (7 см^{-1}) в область высоких энергий сложно приписать колебанию, связанному с кремнием (301 см^{-1}). Учитывая выше сказанное, можно с уверенностью приписать рамановские пики при 308 и 398 см^{-1} , обнаруженные на спектре образцов n-Si<Cr>, колебаниям, обусловленным соединением CrSi_2 . Пик при 795 см^{-1} обусловлен, по-видимому, колебанием, связанным с SiO_2 .

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что спектры комбинационного рассеяния образцов монокристаллического кремния, легированного атомами хрома, могут быть использованы в качестве инструмента для проведения оценки их структурного совершенства и содержания собственных и примесных дефектов, а также присутствия в кристаллах неконтролируемых примесей и кислорода.

В четвертой главе **«Межпримесное взаимодействие в кремнии примесей 3d-элементов с редкоземельными элементами»** приведены результаты изучения процессов взаимодействия редкоземельных элементов гольмия и гадолиния с 3d-элементами в кремнии.

Измерения спектров DLTS в образцах Si<Ho> показали, что в них не наблюдаются какие-либо глубокие центры в заметной концентрации, хотя данные нейтронно-активационного анализа свидетельствуют о наличии атомов Ho в решетке Si в довольно высоких концентрациях до $6 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$. Эти данные показывают, что атомы Ho не проявляют электрической активности в кремнии.

Измерения спектров DLTS в образцах n-Si<Ho>, дополнительно легированных хромом показали, что присутствие атомов гольмия в решетке Si оказывает существенное влияние на процессы дефектообразования: в присутствии атомов Ho увеличивается эффективность образования глубоких центров, связанных с атомами хрома в Si (рис. 9, кривая 2, пики В и С).

Отметим, что наличие примеси гольмия в образцах n-Si<Ho, Cr> приводит к еще большему снижению эффективности образования термических дефектов (рис.9, кривая 2, пик А) по сравнению с n-Si<Cr>.

Анализ и сопоставление результатов измерений спектров DLTS в образцах n-Si<Ho> и n-Si<Ho, Cr> показывают, что концентрации глубоких центров, связанных с атомами хрома в кремнии ($E_C - 0.41 \text{ эВ}$, $E_C - 0.51 \text{ эВ}$) в образцах n-Si<Ho, Cr> в 3-4 раза выше, чем в образцах n-Si<Cr>. Обнаруженное увеличение концентрации глубоких центров, связанных с хромом в кремнии, можно вероятно, объяснить тем, что атомы Ho, введенные в Si в довольно высокой концентрации, занимают все стоки и другие несовершенства решетки кремния.

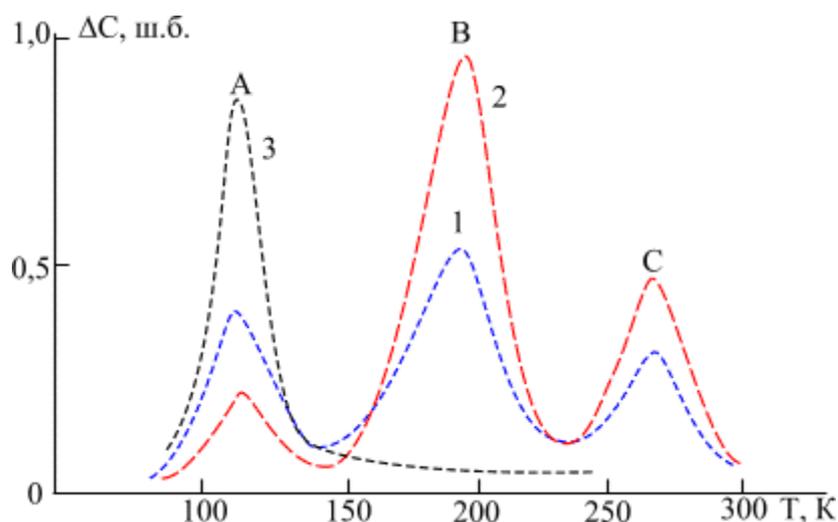


Рис. 9. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<Cr> (1), n-Si<Ho, Cr> (2) и контрольного n-Si (3)

Отметим, что наличие атомов Ho в решетке Si препятствует образованию термических дефектов. Обнаружено, что эффективность образования центра с энергией ионизации $E_C = 0.20$ эВ, обусловленного термообработкой, гораздо ниже в образцах n-Si<Ho> по сравнению с контрольными n-Si.

Таким образом, установлено, атомы гольмия, не проявляя электрической активности в кремнии, повышают эффективность образования глубоких центров, связанных с хромом в Si и стабилизируют свойства этих центров.

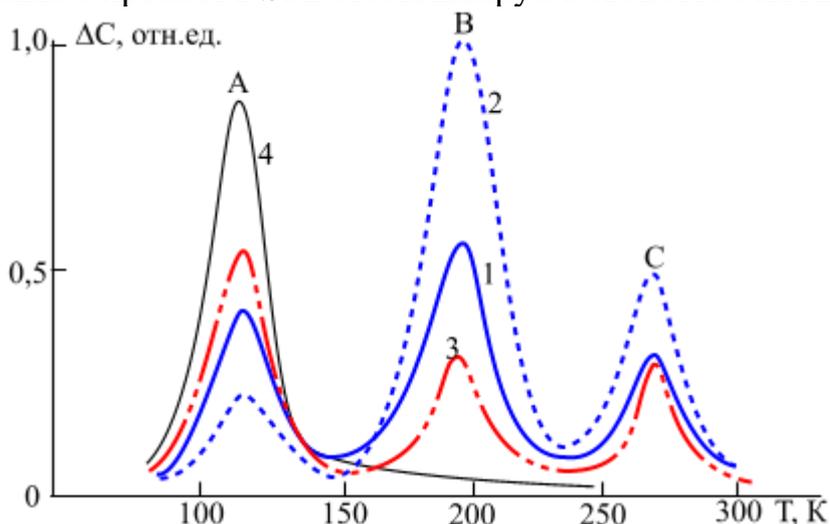


Рис. 10. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<Cr> (1), n-Si<Gd, Cr> (2, медленное охлаждение), n-Si<Gd, Cr> (3 быстрое охлаждение) и контрольного n-Si (4)

Было обнаружено, что наличие атомов гадолиния в образцах Si<Gd,Cr> после введения примеси хрома с последующим медленным охлаждением, приводит к увеличению концентрации глубоких центров $E_C = 0.41$ эВ, $E_C = 0.51$ эВ, связанных с примесью Cr в 2-3 раза по сравнению с Si<Cr> (рис. 10, кривая 2). При этом существенных изменений концентрации остальных

уровней в образцах n-Si<Gd, Cr> не наблюдалось.

Исследовано влияние атомов Gd на формирование энергетического спектра дефектов в Si, легированном Co методом DLTS.

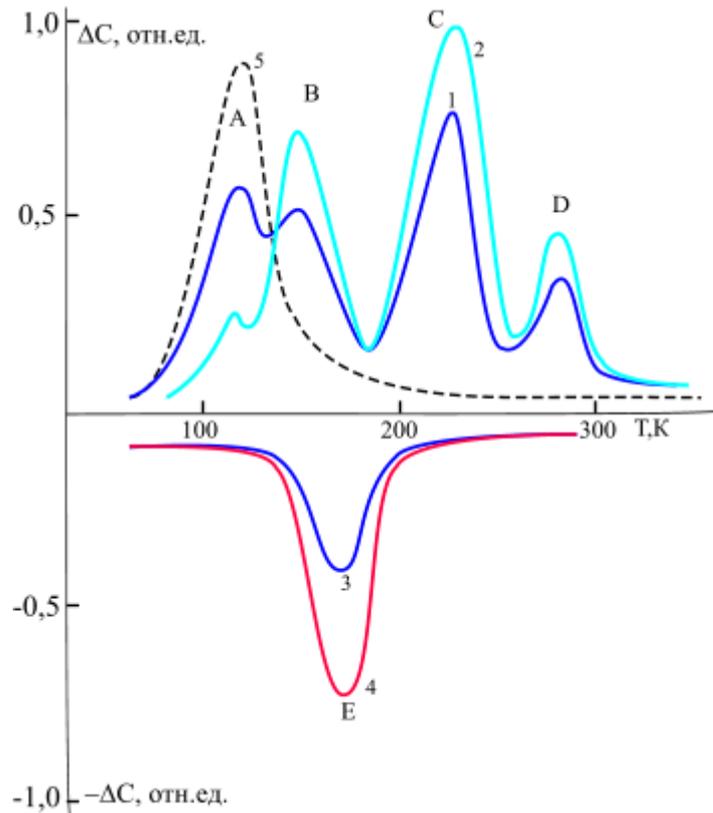


Рис.11. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<Co>(1), n-Si<Gd,Co> (2), p-Si<Co> (3), p-Si< Gd,Co> (4) и контрольного образца (5)

Измерения с помощью емкостной спектроскопии показали, что в кремнии, легированном кобальтом образуются четыре глубоких центра с фиксированными энергиями ионизации $E_C - 0.20$ эВ, $E_C - 0.33$ эВ, $E_C - 0.45$ эВ и $E_C - 0.54$ эВ с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-17}$ см², $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_n = 1,1 \cdot 10^{-15}$ см² и $\sigma_n = 1,5 \cdot 10^{-15}$ см², соответственно (рис.11, кривая 1).

В образцах p-Si<Co> наблюдается лишь один уровень в нижней половине запрещенной зоны $E_V + 0.32$ эВ с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_p = 2 \cdot 10^{-16}$ см², соответственно (рис.11, кривая 3). Показано, что диффузионное введение атомов Co как в n-Si, так и в p-Si, предварительно легированный Gd при выращивании, приводит к трансформации спектров DLTS и оказывает заметное влияние на эффективность образования глубоких центров, связанных с примесью Co (рис.11, кривые 2 и 4).

Детальный анализ полученных результатов показывает, что с ростом концентрации уровней кобальта и гадолиния в n-Si<Co> и n-Si<Gd, Co> резко уменьшается концентрация уровней термодфектов, причем, этот эффект сильнее в образцах с наличием Gd. Отсюда следует, что атомы Co и Gd препятствуют образованию термических дефектов, то есть они также как в случае с n-Si<Gd, Co>, являются геттерами для них. Аналогичный эффект

уменьшения концентрации радиационных дефектов наблюдался и при гамма-облучении исследуемых образцов.

Таким образом, присутствие в объеме Si гадолиния и гольмия в кремнии, легированном примесями хрома, кобальта и марганца приводят к увеличению эффективности образования глубоких уровней (Gd в 2÷3 раза и Но в 3÷4 раза) и снижению концентрации термических дефектов в 4÷5 раз и радиационных дефектов в 3÷4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы состоят в следующем:

1. Оптимизированы технологические режимы легирования кремния примесями 3d-элементов (хрома, кобальта и марганца);
2. Установлено, что эффективность образования глубоких уровней, создаваемых примесями хрома, кобальта и марганца в кремнии зависит от состояния неконтролируемых примесей и дефектов в объеме кремния;
3. Впервые установлено, что присутствие атомов кислорода в кремнии значительно снижает концентрацию глубоких центров хрома, кобальта и марганца, введенных в кремний методом высокотемпературной диффузии, а концентрация оптически активного междузельного кислорода N_O^{opt} снижается на 10÷25% в зависимости от концентрации 3d-элементов;
4. Впервые установлено, что присутствие связанных состояний кислорода - SiO_2 и SiO_4 в кремнии, легированном примесями хрома, кобальта и марганца, приводит к изменению эффективности образования глубоких уровней и трансформации спектров DLTS;
5. Впервые обнаружено, что взаимодействие примесей хрома, кобальта и марганца с неконтролируемой примесью - железом в кремнии приводит к образованию нового глубокого центра с энергией ионизации $E_C - 0,30$ эВ;
6. Установлено, что легирование образцов Si<Ni> слоем марганца на поверхности кремния приводит к уменьшению концентрации электроактивных атомов никеля и слой марганца на поверхности Si играет роль геттера для примеси никеля;
7. Впервые установлено, что присутствие в объеме кремния редкоземельных элементов (гадолиний и гольмий) в кремнии, легированном примесями хрома, кобальта и марганца приводят к увеличению эффективности образования глубоких уровней (Gd в 2÷3 раза и Но в 3÷4 раза) и снижению концентрации термических дефектов в 4÷5 раз и радиационных дефектов в 3÷4 раза.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE
AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF
SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELECTRONICS AT THE
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

FAYZULLAEV KAKHRAMON MAKHMUDJANOVICH

**THE PROCESSES OF INTERIMPURITY INTERACTION IN SILICON
WITH IMPURITIES OF 3d-ELEMENTS**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent - 2022

The theme of the dissertation of 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 B2019.2.PhD/FM382.

The dissertation was carried out at the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council at www.ispm.uz and on the website "Ziyonet" Information and Educational Portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor: **Utamuradova Sharifa Bekmuradovna**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Official opponents: **Dadamirzaev Mukhammadjon Gulomkodirovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ass.Professor

Kamalov Amangeldi Bazarbaevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ass.Professor

Leading organization: **Ferghana State University**

The defense of the doctoral dissertation will be held on «4» 03 2022, at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 on awarding scientific degrees of under Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 248-79-94, fax: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

The doctoral dissertation can be looked through in the Department of Implementation of Digital Educational Technologies at the Institute (registered under No 34). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on «22» 02 2022.
(Registry record No. 34 dated «22» 02 2022).



Z.T. Azamatov
Vice-Chairman of Scientific Council
for award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

J.J. Khamdamov
Vice-Secretary of the Scientific Council for
the award of Scientific Degrees, PhD

Kh.K. Aripov
Chairman of the Scientific Seminar at the
Scientific Council for the Awarding of Scientific Degree,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the study is a complex study of the processes of interaction of impurities that create deep levels with technological impurities in silicon doped with 3d-elements using non-stationary capacitance spectroscopy, photocapacitive and infrared spectroscopy.

The object of investigation is monocrystalline silicon grown by the Czochralski method and crucible-free zone melting, as well as Si doped with impurities of 3d transition (chromium, cobalt, manganese and iron) and rare earth elements (gadolinium, holmium).

The scientific novelty of the research work consists of the following:

technological modes of silicon doping with 3d-element impurities (chromium, cobalt and manganese) are optimized;

it has been found that the efficiency of formation of deep levels created by chromium, cobalt, and manganese impurities in silicon depends on the state of uncontrolled impurities and defects in the bulk of silicon;

it was found for the first time that the presence of oxygen atoms in silicon significantly reduces the concentration of deep centers of chromium, cobalt, and manganese introduced into silicon by high-temperature diffusion, and the concentration of optically active intergranular oxygen N_O^{OIT} decreases by 10–25%, depending on the concentration of 3d-elements;

it has been established for the first time that the presence of bound oxygen states - SiO_2 and SiO_4 in silicon doped with chromium, cobalt and manganese impurities leads to a change in the efficiency of formation of deep levels and transformation of DLTS spectra;

it was found for the first time that the interaction of chromium, cobalt and manganese impurities with an uncontrolled impurity - iron in silicon leads to the formation of a new deep center with an ionization energy $E_C - 0.30$ eV;

it was found that alloying $Si\langle Ni \rangle$ samples with a manganese layer on the silicon surface leads to a decrease in the concentration of electroactive nickel atoms, and the manganese layer on the Si surface plays the role of a getter for the nickel impurity;

it was established for the first time that the presence of rare-earth elements (gadolinium and holmium) in the volume of silicon in silicon doped with chromium, cobalt and manganese impurities leads to an increase in the efficiency of formation of deep levels (Gd by 2–3 times and Ho by 3–4 times) and a decrease in the concentration thermal defects by 4÷5 times and radiation defects by 3÷4 times.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results of the study of the interaction of impurities with deep levels and technological impurities in silicon doped with 3d elements, as well as the influence of external factors on them:

data on the possibility of controlling the defective structure of doped silicon by conducting a cycle of pre-diffusion high-temperature treatments; data indicating that the diffusion introduction of Cr and Gd atoms into silicon leads to a decrease in the efficiency of the formation of thermal defects in silicon by 4-5 times, radiation

defects by 3-4 times and stabilization of its parameters; method of purification of the volume of silicon from technological, uncontrolled impurities were used at the International Innovation Center for Nanotechnology of the CIS in the project on the topic "Effect of radiation on the properties of silicon semiconductors", carried out under the leadership of Magazov N. in 2021 (Certificate of the International Center for Innovation in Nanotechnology of the CIS No. 010/136 dated August 12, 2021). The use of scientific results made it possible to control the defective structure of doped silicon and purify the volume of silicon from uncontrolled impurities.

Optimal technological regimes of silicon doping with Cr and Co impurities; methods for reducing the concentration of thermal defects formed in the volume of silicon under the influence of various external factors by 3-4 times by introducing Cr and Co impurities into silicon, and radiation defects by 2-3 times; gettering technology using impurities of 3d-elements (Cr and Co) of uncontrolled defects (such as iron) formed in the volume of silicon under the influence of various external factors was applied in the implementation of the fundamental project of the Karakalpak State University on the topic OT-F-2-77 "A method for improving the reliability of semiconductor devices, taking into account internal defects based on modeling" (Reference of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education No. 3/19-24/12-314 of December 24, 2021). The use of scientific results made it possible to develop a method for improving the reliability of semiconductor devices and, on the basis of modeling, made it possible to increase the stability of semiconductor devices by 2-3 times, taking into account internal defects.

Approbation of research results. The main results of the dissertation were presented and discussed at 6 international and 4 republican scientific conferences.

Publication of research results. On the subject of the dissertation, 18 scientific papers were published, 8 articles of them published in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of dissertation works.

The structure and scope of the dissertation. The research work consists of introduction, four chapters, a conclusion. It is presented on 136 pages, including 29 figures and 7 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I бўлим (I часть, part I)

1. Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Далиев Ш.Х., Файзуллаев К.М. Влияние атомов хрома и железа на процессы дефектообразования в кремнии. // Прикладная физика, (Россия), 2019, №6, С.90-95 (№3 Scopus).
2. Утамурадова Ш.Б., Файзуллаев К.М. Роль термообработки в формировании дефектов в кремнии с примесью кобальта. // Физика полупроводников и микроэлектроника, 2019, №3, С.9-15 (01.00.00; №16).
3. Utamuradova Sh.B., Yusupova Sh.A., Fayzullaev K.M. Impurity-impurity interaction in silicon doped with manganese and nickel. // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2020, №6, pp.11-15. (01.00.00; №16).
4. Утамурадова Ш.Б., Утениязова А.Б., Файзуллаев К.М., Наурзалиева Э.М. Дефектообразование при низкотемпературном отжиге кремния, легированного примесями Т-ионов. // «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы» халқаро онлайн конференция, 2020 йил 28 май, ЯФ ва М ИТИ, С.31-36.
5. Утамурадова Ш.Б., Юсупова Ш.А., Файзуллаев К.М. Межпримесное взаимодействие в кремнии, легированном марганцем и никелем. // «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы» халқаро онлайн конференция, 2020 йил 28 май, ЯФ ва М ИТИ, С.290-296.
6. Утамурадова Ш.Б., Файзуллаев К.М. О влиянии атомов гольмия на эффективность образования глубоких центров хрома в кремнии. // Science and world, International scientific journal, №8(96), 2021, стр.23-25. (GIF: 0.325).
7. Утамурадова Ш.Б., Хамдамов Ж.Ж., Файзуллаев К.М. Роль примеси гадолия в формировании энергетического спектра дефектов в Si<Co>. // Science and world, International scientific journal, №9(97), 2021, стр.11-13 (GIF: 0.325).
8. Утамурадова Ш.Б., Хамдамов Ж.Ж., Файзуллаев К.М., Йўлдошев У.М. Процессы дефектообразования в кремнии с примесями гадолия и хрома. // Science and world, International scientific journal, №10(98), 2021, стр. 24-26. (GIF: 0.325).

II бўлим (II часть, part II)

9. Набиев М.Я. Файзуллаев К.М. Состояние атомов легирующих элементов в решетке кремния. // “Қайта тикланувчи энергия манбалари ва барқарор атроф муҳит физикаси” мавзусида ўтказилган Республика илмий-техник анжумани материаллари. 2019 йил, 24-25 апрель, Қарши, С.54-55.
10. Утамурадова Ш.Б., Равшанов Й.Р., Файзуллаев К.М., Эргашев Ж.А. Межпримесное взаимодействие атомов хрома и железа в кремнии. // “Қурилиш материаллари, кимё саноати ва унга алоқадор тармоқлар ишлаб чиқариш корхоналарида инновацион ускуналар ва технологияларни жорий этишнинг долзарб муаммолари” мавзусидаги I халқаро илмий амалий конференцияси. Фарғона, 2019 йил, 24-25 май, С.506-507.
11. Утамурадова Ш.Б., Далиев Х.С., Файзуллаев К.М., Норкулов Ш.Б. Influence of atoms of transition elements on the kinetics of the formation of radiation defects in silicon. // “Ядро физикаси ва Ядро технологияларининг ҳозирги замон муаммолари” номли IX халқаро анжумани, 2019 йил, 24-27 сентябр. С.268-270
12. Утамурадова Ш.Б., Файзуллаев К.М. Влияние предварительной термообработки на дефектообразование в кремнии с примесями 3d-элементов. // “Современные проблемы физики полупроводников” Республиканской конференции. Нукус, 2019, 20 ноябрь, С.25-27.
13. Утамурадова Ш.Б., Утениязова А.Б., Файзуллаев К.М., Рахманов Д.А. О влиянии ростовых примесей на процессы образования радиационных дефектов в кремнии с примесями переходных элементов. // "Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни" мавзусидаги РИАК, Тошкент, 2020 йил 17-18 апрел, ЎзМУ. С.316-318.
14. Утамурадова Ш.Б., Равшанов Й.Р., Файзуллаев К.М., Наурзалиева Э.М. Закономерности формирования наноразмерных дефектов в кремния с примесями переходных элементов. // “Фотоэнергетикада наноструктураларни яратиб олиш материаллари” мавзусидаги халқаро илмий анжумани, 2020 йил 9-10 октябрь, Тошкент ТДТУ. С.432-435.
15. Utamuradova Sh.B. Fayzullaev K.M. Influence of chromium and iron atoms on defect. // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг I Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-I). 21 апрель, 2021 йил. 29-31 б.
16. Utamuradova Sh.B. Fayzullaev K.M., Yuldoshev U.M. The processes of interimpurity interaction in silicon doped with chromium and holmium. // 7th International Conference Structural Relaxation in Solids (ICSRS-7), Vinnytsia, Ukraine. May 25-27, 2021. pp.94-95.
17. Утамурадова Ш.Б., Файзуллаев К.М., Юлдашев У.М. Энергетический спектр дефектов в Si <Cr> в присутствии гадолиния в объеме кремния. // Материалы международной научной конференции Тенденции развития физики конденсированных сред. Ферғана, 25 май, 2021. С.249-251.

18. Утамурадова Ш.Б., Хамдамов Ж.Ж., Файзуллаев К.М., Рахманов Д.А., Матчонов Х. Межпримесное взаимодействие в кремнии с примесями гадолиния и кобальта. // The 2021 International Workshop “Functional materials for energy applications” (FUNMAT), 15-17 September, 2021, UrSU, С.11.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида
тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини
мослиги текширилди (21.02.2022 йил)

Бичим 60x841/16.Рақамли босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи:3. Адади 60. Буюртма №30.

Гувоҳнома реестр № 10-4434

Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот
институтини босмаҳонасида чоп этилган.

Босмаҳона манзили: 100057, Тошкент ш., Янги Олмазор кўчаси, 20-уй.

