

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

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

ПАЛУАНОВА АНИФА ДАРИБАЕВНА

**ВОЛЬФРАМ ВА МОЛИБДЕН БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН
КРЕМНИЙНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК ХУСУСИЯТЛАРИ**

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**

Палуанова Анифа Дарибаевна

Вольфрам ва молибден билан легирланган кремнийнинг
электрофизик хусусиятлари..... 3

Палуанова Анифа Дарибаевна

Электрофизические свойства кремния, легированного вольфрамом и
молибденом..... 19

Paluanova Anifa Daribaevna

Electrophysical properties of silicon doped with tungsten and
molybdenum..... 33

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 38

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

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

ПАЛУАНОВА АНИФА ДАРИБАЕВНА

**ВОЛЬФРАМ ВА МОЛИБДЕН БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН
КРЕМНИЙНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК ХУСУСИЯТЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2022

**Физика-математика фаилари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси
Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация комиссиясида
B2019.2.PhD/FM.380 рақам билан рўйхатга олинган**

Диссертация Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (<http://ispm.uz>) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyo.net) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: Далиев Шахрух Хожакбарович
физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим

Расмий оппонентлар: Азаматов Закиржон Тахирович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Отажонов Салим Мадрахимович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: Тошкент давлат техника университети

Диссертация химояси Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «20» 01 соат 15⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (99871) 248-79-94, факс: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

Диссертация билан Рақамли технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (32 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

Диссертация автореферати 2022 йил «08» 01 куни тарқатилди.
(2022 йил «08» 01 даги 32 рақамли реестр баённомаси).



Ш.Б. Утамурадова
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Ж.Ж. Хамдамов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби,
PhD

Х.К. Арипов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
кошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги. Жаҳонда фан ва техниканинг жадал суръатлар билан ривожланиши даврида қаттиқ жисмли электроника, опто ва наноэлектроника қурилмаларидан фойдаланишга бўлган талаб тез суръатлар билан ўсиб бормоқда. Уларнинг ривожланиши замонавий алоқа ва телевидение тизимларини яратиш, электр энергиясини самарали узатиш ва конвертация қилиш, турли маиший, тиббий ва махсус электрон ускуналарни яратиш муаммоларини муваффақиятли ҳал этиш билан боғлиқ. Қаттиқ жисмли қурилмаларни қўллаш соҳаси доимий равишда кенгайиб бормоқда, бу саноатнинг янги йўналишларни ривожланишига имкон берадиган мутлақо янги турдаги қурилмаларни яратмоқда, бу эса, ўз навбатида, замонавий яримўтказгичли қаттиқ жисмларнинг асосий материали бўлган Si тузулишини такомиллаштиришни талаб қилади. Шу муносабат билан Si да нуқсонларни ҳосил бўлиш жараёнларини турли киришмалар билан легирлаш орқали ўрганиш ва яримўтказгичли асбоблар параметрларини барқарорлаштиришнинг бошқариладиган усулларини яратиш муҳим муаммолардан бири ҳисобланади.

Ҳозирги кунда дунёда монокристалли кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларини ўрганиш, хусусан, қуйидаги йўналишлар бўйича илмий тадқиқотларни амалга ошириш муҳим вазифалардан бири сифатида қаралмоқда: вольфрам ва молибден киришмалари киритилган кремнийда нуқсон марказларининг ҳосил бўлиш жараёнларини турли омиллар таъсирида ўрганиш; вольфрам ва молибден киришмалари кремнийда чуқур марказлар ҳосил бўлиш механизмларига технологик киришмаларнинг таъсирини ўрганиш; вольфрам ва молибден киришмаларининг ҳосил қиладиган чуқур энергетик сатҳлар спектрининг пайдо бўлиш қонуниятларини ўрнатиш, уларнинг бошқа киришмалар ҳамда панжарадаги структуравий нуқсонлар билан таъсири, вольфрам ва молибден атомлари мавжуд киришмалари кремнийда структуравий нуқсонларни ҳосил бўлишида иссиқлик ва радиацион нуқсонларнинг таъсирини ўрганиш. Ушбу соҳаларда олиб борилган илмий-тадқиқот ишлари ушбу диссертация мавзусининг долзарблигини кўрсатади.

Мустақиллик йилларида Ўзбекистон олимлари томонидан яримўтказгичли материаллар ва кўп қатламли структураларни чуқур сатҳ ҳосил қилувчи киришмалар билан легирлаш жараёнларини ўрганишга катта эътибор берилмоқда. Қийин эрувчи элементларни кремнийга киритиш орқали кремнийли структураларнинг фотосезгирлигини оширишда юқори ютуқларга эришилган. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига мувофиқ, инновацион технологияларни жорий этиш орқали яримўтказгичлар физикаси соҳасидаги назарий ва амалий тадқиқотлар асосида микроэлектроника саноатининг самарадорлигини ошириш муҳим аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017-йил 7-февралдаги “2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг

бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” ПФ-4947-сон Фармони ҳамда 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар Академиясининг фаолияти ва илмий-тадқиқот ишларини такомиллаштиришни ташкил қилиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш бўйича чора-тадбирлари тўғрисида” ги, 2018- йил 14-июлдаги ПФ-3855-сон “Илмий ва илмий техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида” ги, 2021-йил 19-мартдаги ПҚ-5032-сонли “Физика соҳасида таълим сифатини ошириш ва илмий тадқиқотларни такомиллаштириш чора тадбирлари тўғрисида”ги қарорлари ва мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга мазкур диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияни ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг Ф2 "Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик" ва III “Энергия, энергия ресурсларини тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Яримўтказгичлар физикаси ва яримўтказгичлар материалшунослиги соҳасидаги тадқиқотлар илғор давлатларнинг илмий марказлари, институтлари ва университетлари: жумладан, Chent и ва Калифорния (АҚШ) университетлари, Hemlock Semiconductor Corporation, Sony Corporation, Philips Semiconductors, STMicroelectronics (Италия), Lucent Technologies (США) ва Мадрид (Испания) ва Берлин техника университетида (Германия) эса турли киришмалар билан легирланган кремний асосида оптоэлектрон асбоблар яратиш бўйича тадқиқотлар олиб борилмоқда. Bell лабораторияси тадқиқот маркази (США)ларида тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Ҳозирги вақтда қийин эрувчи элементлар устида олиб борилаётган тадқиқотлар кремний асосида яримўтказгичли материаллар асосида температура датчикларини яратиш ва уларнинг бошқа функционал параметрларни яхшилаш бўйича; легирланган Si асосида температура ва намлик датчикларни ишлаб чиқиш; ўтувчи элементлари мавжуд киришмали кремнийда иссиқлик ва радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнларини ўрганиш; икки ўлчамли қатламлар фазолар чегарасида юзага келадиган наноўлчамли нуқсонларни ўрганиш.

Ҳозирги вақтга қадар олимлар ва ишлаб чиқарувчиларнинг эътибори кремнийда ва кремний структураларида кечувчи физик жараёнлар, шунингдек уларнинг параметрлари барқарорлигини муқобиллаштириш усулларини ишлаб чиқишга қаратилган.

АҚШ, Италия ва Япония олимлари Lauwaert J, Koichiro S, Simoen E, Vrielinck. H, M.L.Poligano, A. Gaibiati, S.Grasso, D.Magni (W ва Mo)

атомлари билан легирланган кремнийнинг тақиқланган зонасида ҳосил бўлган чуқур сатҳларининг энергетик спектрлари, киришма атомларининг технгологик киришмаларга таъсирлари бўйича изланишлар олиб борган.

Россиялик олимлар С. И. Расмагин, И. К. Новиков, Д.П.Родионов, Н.Н.Степанова, Ю.И.Филиппов, В.А. Казанцев томонидан кремнийда ҳар хил чуқур сатҳли киришмаларнинг ҳолати ўрганилган ва ушбу сатҳларнинг энергетик спектрлари ва парамагнит марказлари аниқланган. Улар томонидан бир қатор пассив, электр нофаол бўлган киришмалар хоссалари кремний ва бошқа яримўтказгичларда ҳам ўрганилган.

Академиклар Муминов Р.А., Бахадирханов М.К., Зайнабидинов С.З., Мамадалимов А.Т, Далиев Х.С, Утамурадова Ш.Б, Далиев Ш.Х ва бошқа Ўзбекистонлик олимлар ҳам яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структуралардаги локал марказлар физикасини ривожлантиришга қаратилган илмий изланишларда ўзларининг муносиб ҳиссаларини қўшганлар.

Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структураларнинг хоссаларини ўрганиш бўйича экспериментал маълумотларнинг кўплигига қарамасдан, турли ташқи омиллар: босим, температура ва ҳар хил нурланишлар таъсирида унга асосланган кремний ва кўп қатламли структураларнинг ҳаракатини олдиндан айтиб беришга имкон берувчи маълумотлар мавжуд эмас.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган илмий-тадқиқот муассасаси илмий тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.

Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Миллий университети ва Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институтининг илмий-тадқиқот лойиҳалари, Ўзбекистон Республикаси фан ва технология агентлиги томонидан грантлар тематик режаларига мувофиқ амалга оширилган: ЁФ-2-08 рақамли “Ноёб ер элементлар кириндилари билан легирланган кремний ва кремнийли кўпқатламли структуралардаги нуқсон ҳосил бўлишига ва термик ишловига радиациянинг таъсирини ўрганиш” (2010-2011 йй.), ЁФ-2-13 рақамли “Кремний структураларининг электрофизик хоссаларига титан кичик гуруҳи кириндиларининг таъсирини ўрганиш” (2016-2017 йй.) ОТ-Ф2-11 рақамли “d-элементлар кириндилари билан легирланган кремнийнинг сирт қатламларида ва ҳажмида наноўлчамли нуқсонларнинг шаклланиш қонуниятларини тадқиқ этиш” (2019-2020 йй.); МУ-Ф3-20171025461-рақамли “Диэлектрик сифатида лантан, гадолиний ва европий оксидлари ишлатилган кремнийли МДЯ структураларни электрофизик хусусиятлари” (2018-2019 йй.) мавзусидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади: сиғимли ва инфрақизил спектроскопия усуллари ёрдамида вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонли марказларининг шаклланиш хусусиятларини, шунингдек, технологик омилларнинг кремнийдаги бу киришмаларнинг хусусиятларига таъсирини тадқиқ қилишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари: вольфрам ва молибден киришмалари билан кремнийни легирлаш технологиясини оптималлаштириш;

хар хил усулларда вольфрам ва молибден билан легирланган кремний намуналарининг электрофизик хоссаларининг хусусиятларини тадқиқ этиш;

кремнийнинг дастлабки нуқсонли тузилиши ҳолатининг вольфрам ва молибденнинг чуқур марказлари ҳосил бўлишига таъсирини ўрганиш;

вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонли марказларининг ҳосил бўлишининг айрим хусусиятларини тадқиқ қилиш;

кремнийда вольфрам ва молибден киришмаларининг чуқур марказларини ҳосил бўлиш самарадорлигига турли легирлаш режимларининг ва ташқи омилларнинг таъсирини ўрганиш;

молибден ва вольфрам билан легирланган кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёналарида электронейтрал киришмаларнинг ролини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида вольфрам ва молибден элементлари билан легирланган Чохраль ва зонали тигелсиз эритиш усули билан ўстирилган монокристалли кремний олинган.

Тадқиқотнинг предметини вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонларнинг ҳосил бўлишнинг айрим хусусиятларини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда қуйилган вазифаларни ҳал қилишда чуқур сатҳлар сиғимли спектроскопия, ёруғлик ўтказувчанлик ва инфракизил спектроскопия усуллари қўлланилди.

Тадқиқотининг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

вольфрам ва молибден киришмалари билан кремнийни легирлашнинг технологик режимлари оптималлаштирилган;

вольфрам ва молибден киришмаларини кремнийда тўлиқ эрувчанлиги ва электроактив атомлар концентрацияси легирлашнинг технологик режимларига боғлиқ эканлиги аниқланган;

вольфрам ва молибден киришмаларининг кремний таркибига ўстириш жараёнида киритилишида киришмаларнинг электронейтрал ҳолатида бўлиши ва уларни узоқ муддатли юқори ҳароратли ишлов бериш йўли билан фаоллаштириш мумкинлиги аниқланган;

вольфрам ва молибден билан легирланган кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёналарининг самарадорлиги легирлаш усулига, нуқсонли структуранинг мукамаллигига, дастлабки термик ҳолатига ва кремнийни бу киришмалар билан легирлашнинг технологик режимларига боғлиқ эканлиги илк бор аниқланган;

вольфрам ва молибден киришмаларини юқори ҳароратли диффузия усулида кремнийга киритишда оптик фаол кислород концентрациясини вольфрам ва молибден киришмаларининг концентрациясига қараб 25-30% га камайтиришига олиб келиши аниқланган, бу эса вольфрам ва молибден киришмаларининг кислород билан нейтрал комплексларини ҳосил қилиши билан боғлиқлиги аниқланган;

вольфрам ва молибден киришмаларининг кремнийнинг таркибида мавжудлиги радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини

назорат намуналарига нисбатан 5÷6 мартага, термик нуқсонлар концентрациясини эса 2÷3 марта камайитириши кўрсатилган;

электронейтрал киришма - гадолинийни кремнийга олдиндан киритиш вольфрам ва молибден киришмаларининг эрувчанлигини ва чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини 2 марта оширишига олиб келиши аниқланган;

Тадқиқотнинг амалий натижалари. Кремний таркибида W ва Mo киришмаларининг ҳосил қилган чуқур сатҳларни шакллантириш самарадорлигини ошириш усуллари ишлаб чиқилган;

вольфрам ва молибден киришмаларини кремнийга киритиш орқали ва радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини камайитириши ва иссиқликка барқарорлигини оширишнинг технологик режимлари ишлаб чиқилган;

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги:

юқори сезгирлик ва катта ажратиш қобилиятига эга чуқур сатҳлар параметрларини алоҳида аниқлаш имкониятига эга бўлган ностационар сифимли спектроскопия, ёруғлик сифими, ёруғлик ўтказувчанлик, инфрақизил спектроскопия усулларида фойдаланиш орқали асосланган ва турли усуллар билан олинган натижалар орқали тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган монокристалл кремний ва кремний структураларида содир бўладиган физик жараёнлар тушунчасини кенгайтиришдан иборат.

Вольфрам ва молибден киришмаларини киритиш орқали кремний параметрларини иссиқликка барқарорлиги ва радиацияга чидамлилигини ошириш учун турли яримўтказгичли асбобларни ишлаб чиқаришдан иборатдир.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонли марказларининг шаклланиш хусусиятларини ҳамда уларга технологик омилларнинг таъсирини тадқиқ қилиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

кремний кристаллини вольфрам ва молибден киришмалари билан легирлаш технологияси ва бу киришмалар асосида кремний структураларида термик нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнларини батафсил ўрганишга имкон яратилганлиги Тошкент давлат техника университетида Давлат илмий-техника дастури доирасида 2017-2018 йилларда бажарилган ОТ-А3-57-“Наноструктурали кремний датчик асосида турли хил объектларда ҳарорат ва намликни назорат қилувчи микропроцессорли асбобни ишлаб чиқиш” мавзусидаги лойиҳада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2021-йил 4-ноябрдаги №89-03-2337 сон маълумотномаси).

Илмий натижалардан фойдаланиш кремний структураларида турли хил термик нуқсонларни батафсил ўрганиш имконини берган ва наноструктурали кремний датчикларининг иссиқликка чидамлилигини 2÷3 баробар ошириш имконини берган;

олинган илмий натижалар экспериментал намуналарда синовдан ўтказилди ва улардан фойдаланиш яримўтказгичли қурилмаларнинг (ишлаб чиқилган диодлар) ишчи параметрларини 10÷15% га яхшилаш имконини берган. (“Ўзэлтехсаноат” акциядорлик компаниясининг 2021-йил 22 ноябрдаги №04-3/2494-сон маълумотномаси) Илмий натижалардан фойдаланиш вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда ҳосил бўлган чуқур сатҳларнинг энергетик спектрларини назорат қилиш имконини берган;

кремний таркибига вольфрам ва молибден киришмаларининг киритилиши, унинг таркибидаги бошқариб бўлмайдиган технологик киришмалар (O, C) концентрациясини 20÷25% га камайтириши аниқланган; вольфрам ва молибден киришмалари кремний ҳажмида мавжудлиги иссиқлик таъсирида ҳосил бўладиган термик нуқсонларни концентрациясини 2÷3 марта камайтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 7 та халқаро ва 7 та Республика илмий-амалий конференцияларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 23 та илмий илмий иш, шу жумладан Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясининг физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий журналларда 9 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхати 140 та номдан иборат бўлиб, 21 та расм, 4 та жадвални ўз ичига олган ҳолда 130 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯ ИШИНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи ва муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган. Тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Кремнийдаги вольфрам ва молибден атомларининг хусусиятлари”** деб номланган биринчи бобида адабиётларда келтирилган натижалар таҳлил қилинган. Ушбу бобда кремний монокристаллига киритилган қийин эрувчи элементларга кирувчи вольфрам ва молибден атомларининг ҳар хил методларда киритилиши ва улар асосида тайёрланган қурилмалар натижалари ўрганилган. Вольфрам ва молибден билан легирланган кремнийнинг электрофизик хусусиятларига ҳар хил

температураларда термик ишлов бериш, ташки нурлантиришнинг таъсири, ундан ташқари кремний таркибида бўлган технологик киришмаларнинг структурадаги нуқсонларга таъсирини тадқиқ этиш бўйича маълумотлар таҳлил этилган.

Кремний ва кремнийли структураларда турли нуқсонларнинг ҳолати, хусусияти ва турли ташқи факторларга таъсирининг таҳлили баён этилган. Келтирилган таҳлиллардан келиб чиққан ҳолда диссертация ишининг мақсад ва вазифалари белгиланган.

Диссертациянинг **“Тадқиқот усуллари ва намуналарни тайёрлаш технологияси”** деб номланган иккинчи бобида Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли структураларда чуқур сатҳлар сифимли спектроскопиясининг асосий қонуниятлари ўлчаш усуллари кенг баён этилган. DLTS нинг классик услубининг моҳияти баён қилинган. Ундан ташқари DLTS спектрларини турли режимларда ва бир қарралик ва кўпқарралик сканерлаш йўли билан олинган DLTS спектрларини ҳисоблаш усули баён этилган.

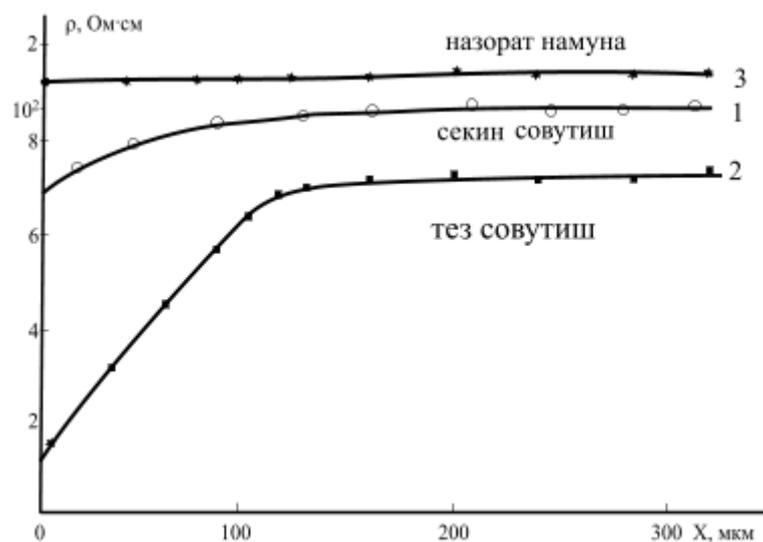
Кремнийдаги технологик киришмалар бўлган кислород ва углероднинг концентрациясини аниқлаш учун икки нурли схемада спектри 1200 дан 400см^{-1} инфрақизил (ИҚ) соҳасида ишлайдиган SPECORD-72-IR инфрақизил спектрофотометр ёрдамида ИҚ-ютилиш спектрларини ўлчаш усули баён этилган.

Ундан ташқари кремнийни вольфрам ва молибден киришмалари билан легирлаш технологияси тўлиқ келтирилиб ўтилган.

Диссертациянинг **“Вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонли марказларнинг ҳосил бўлиш хусусиятларини ўрганиш”** деб номланган учинчи бобида вольфрам ва молибден атомалари билан легирланган кремнийдаги нуқсонли марказларнинг энергетик спектрини ўрганишга бағишланган. Вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларини, сифимли спектроскопия (DLTS ва ЁС) усуллари ёрдамида тадқиқ этиш натижалари баён этилган, кремнийнинг тақиқланган зонасида вольфрам ва молибден киришмаларининг ҳосил қиладиган чуқур сатҳларнинг ўзига хос хусусиятлари аниқланди.

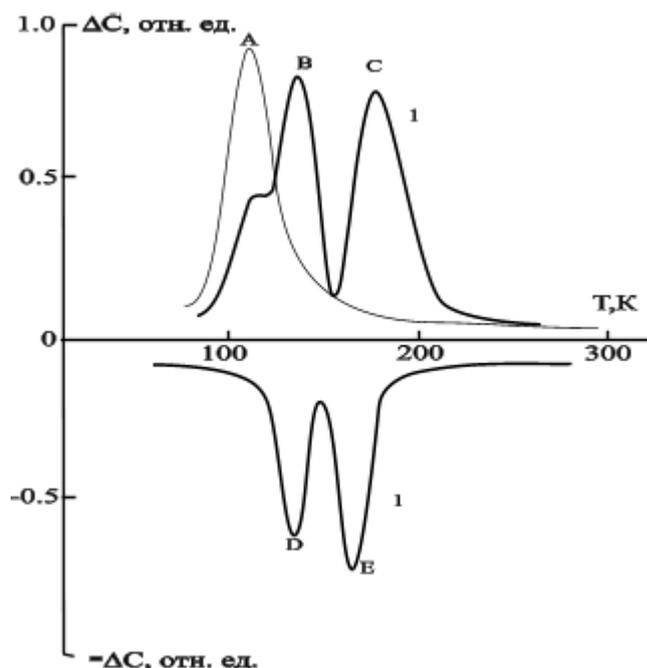
W ва Mo киришмалари билан легирланган кремнийни 1-50 соат мобайнида 1200°C да диффузия усулида олинган барча диодларда тадқиқ қилинган вольт-фарад характеристикалари (ВФХ) чизиқли боғланган. Бу W ва Mo киришмаларининг кремний ҳажмида текис тақсимланганлигини кўрсатади.

$\text{Si}\langle\text{Mo}\rangle$ ва $\text{Si}\langle\text{W}\rangle$ намуналарининг солиштирма қаршилик тақсимоти профилини ўлчаш натижалари шуни кўрсатадики, вольфрам ва молибден киришмаларининг киритилиши намуналар солиштирмали қаршилигини сезиларли ўзгаришига олиб келади ва диффузиядан кейинги совиши тезлигига боғлиқ (1-расм).



1-расм. Si<Mo> намунанинг солиштирма каршилик таксимот профили (1) секин совутиш, (2) тез совутиш ва назорат намунаси Si (3)

Кремнийдаги нуқсонларнинг энергетик спектри вольфрам мисолида кўриб чиқилган. Улчаш натижалари шуни курсатдики, DLTS спектри n-Si<W> намуналарида $T_M=125$ К, $T_M=145$ К ва $T_M=160$ К да максимумларга эга учта чўққи (2-расм, 1- эгри чизик, А, В ва С пиклар) кузатилади. DLTS спектрларини Аррениус боғланишида қайта ҳисоб-китоб қилиш чуқур сатҳларнинг бу чўққиларнинг $E_c-0.22$ эВ, $E_c-0.30$ эВ ва $E_c-0.39$ эВ га тенг ионизация энергияси билан қайта зарядланиши билан боғлиқлигини кўрсатади. p-Si<W> намуналарида $E_v+0.31$ эВ, $E_v+0.35$ эВ га тенг ионизация энергиясига чуқур сатҳ аниқланди (2-расм, D ва E пиклар).



2

-расм. n-Si<W> ва p-Si<W> намуналарининг DLTS спектрлари

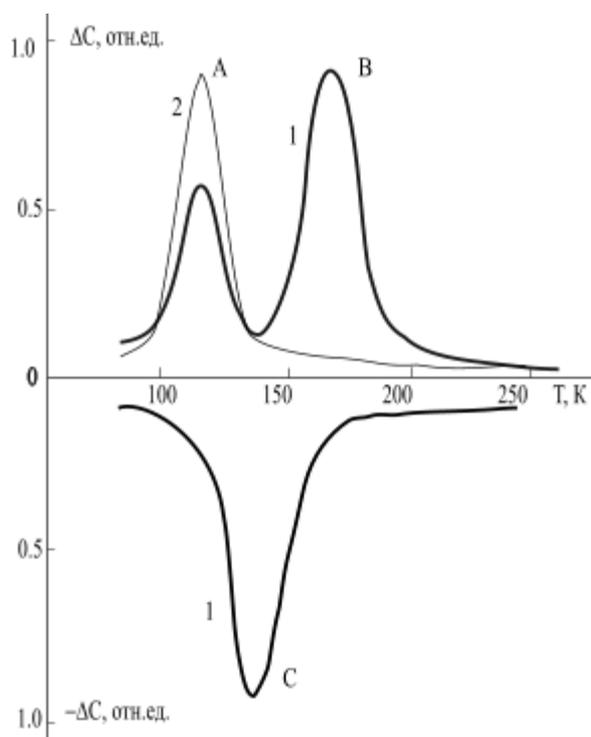
Олинган маълумотларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, $E_c-0.22$ эВ ионланиш энергиясига эга бўлган сатҳ термоишлов берилган назорат намуналарида ҳам ва унинг концентрацияси $Si\langle W \rangle$ намунасига нисбатан етарли даражада катта.

Кузатилган сатҳлар концентрацияси вольфрам киришмасининг киритиш технологиясига боғлиқлиги кўрсатилди.

$n-Si\langle Mo \rangle$ ва $p-Si\langle Mo \rangle$ намуналарининг DLTS спектрларини ўлчаш натижалари шуни кўрсатдики, Mo киришмаларининг Si таркибига $1200^\circ C$ ҳароратда диффузион киритилиши ва тез совутилиши ионизацион энергияси $E_c-0.20$ эВ ва $E_c - 0.29$ эВ бўлган иккита чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиши аниқланди. $n-Si\langle Mo \rangle$ намунада тақиқланган зонанинг пастки яримида $E_v+0.36$ эВ энергияли чуқур сатҳ аниқланди.

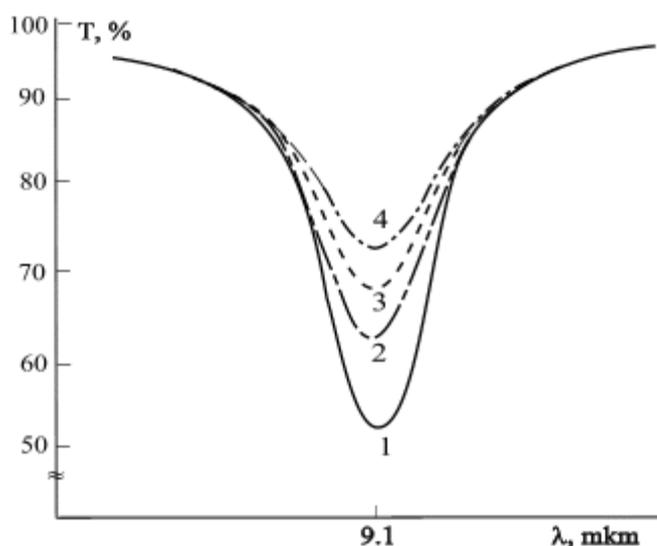
Турли ҳароратда молибден билан легирланган $n-Si\langle Mo \rangle$ ва $p-Si\langle Mo \rangle$ намуналарининг DLTS спектри натижаларини таққослаш, молибден билан боғлиқ чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги, вольфрам билан бўлган ҳолатдаги каби диффузия температурасига $T_{диф}$. Диффузия температурасининг ошиши билан чуқур сатҳ концентрацияси ошиб бориши аниқланган (3-расм).

Маълумотлар таҳлили шуни кўрсатадики, Si таркибида Mo атомларининг мавжудлиги термикишлов билан боғлиқ бўлган $E_c-0.20$ эВ чуқур сатҳнинг концентрациясини камайишига олиб келади.



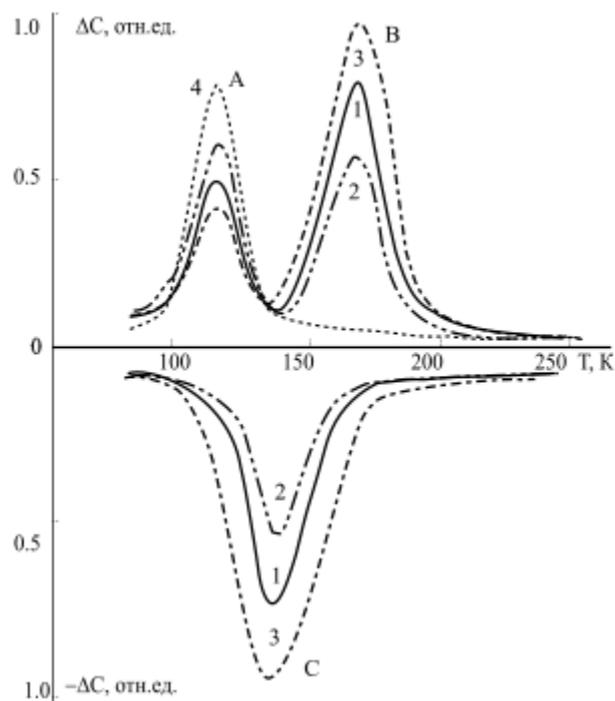
3-расм. $n-Si\langle Mo \rangle$ ва $p-Si\langle Mo \rangle$ намуналарининг DLTS спектрлари, $T_{диф}^0 C$: 1- $1200^\circ C$, 2- назорат $n-Si$

Вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнлари инфрақизил спектроскопия ёрдамида ўрганилган. Вольфрам ва молибден киришмаларининг нуқсонли марказларини ҳосил бўлишига технологик киришмалар ҳолатининг таъсири тадқиқ қилинди. Si га вольфрам ёки молибден киришмаларинг, шунингдек бошқа қийин эрувчи элементларнинг диффузион усулда киритилиши диффузия ҳароратига ва ундан кейинги совиштиш тезлигига қараб оптик фаол кислород концентрациясини 20-30% га пасайишига олиб келиши аниқланди (4-расм, 2-эгрилик). Бир хил шароитларда термик ишлов берилган, вольфрам ва молибден киритилмаган назорат намуналарида бу ҳодиса кузатилмайди (4-расм, 1-эгрилик).



4-расм. n-Si(1)-назорат, n-Si<W> (2), n-Si+ЮҲИБ (3), 1100⁰С да дастлабки ЮҲИБ орқали олинган n-Si<W> намуналарининг ИҚ-ютилиш спектрлари (4-эгрилик).

Вольфрам ёки молибден киришмасини олдиндан термик ишлов берилган кремний намунасига киритиш вольфрам ва молибденнинг нуқсонли марказларини шакллантириш самарадорлигининг пасайишига олиб келиши кўрсатилди. Термик ишлов берилган кремний намуналарида ИҚ ютилиш спектрларини ўлчаш шуни кўрсатдики, 1100⁰С да ЮҲИБ кислород атомларининг чўкишига олиб келади, натижада N_{O}^{opt} нинг 40-50% гача камайиши кузатилади (4-расм,3-эгрилик). Олдиндан ЮҲ ишлов бериш, кейин вольфрам ёки молибден киришмаларини киритиш N_{O}^{opt} концентрациясини термоишлов берилган намунага нисбатан 10÷15 % камайитириши аниқланди (4-расм, 4-эгрилик). Бу, эҳтимол, вольфрам ёки молибден атомларининг кислород атомлари билан ўзаро таъсирининг ўзига хос хусусиятлари билан боғлиқ.



5-расм. 1200°С да легирланган n-Si<Mo> ва p-Si<Mo> (1), кислород концентрацияси оширилган намуна (2) ва углерод концентрацияси оширилган намуна (3) ва назорат намунаси n-Si (4).

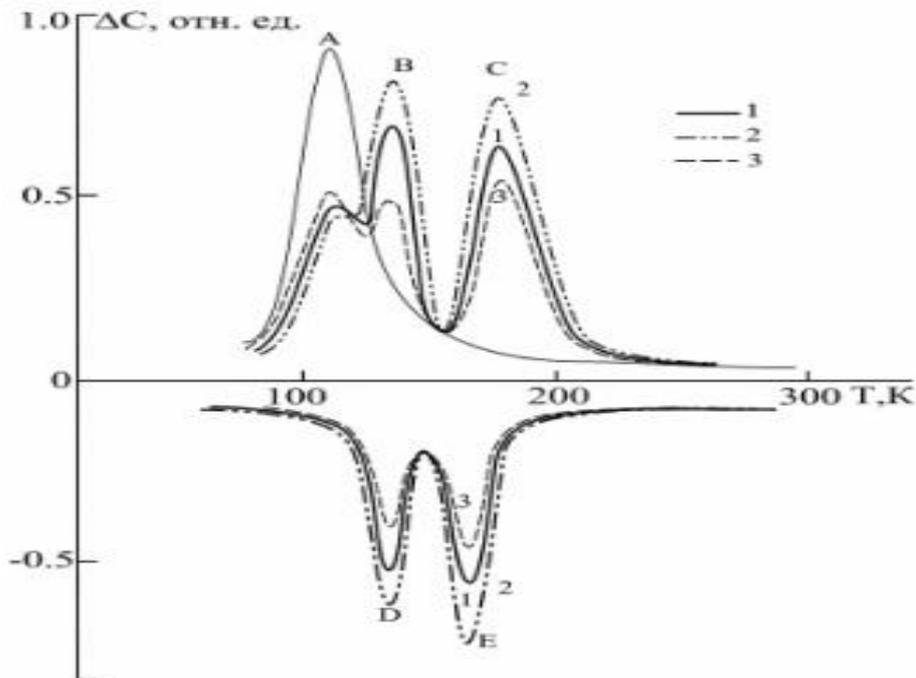
Ўлчаш натижалари шуни кўрсатдики, вольфрам ва молибден киришмаларининг нуқсонли марказларининг шаклланиш самарадорлиги технологик киришмалар- кислород ва углероднинг концентрацияларига боғлиқ эканлигини кўрсатди (5-расм, 1-3-эгрилик). Кремний таркибида кислород атомларининг концентрацияси қанчалик катта бўлса, вольфрам ва молибден билан боғлиқ чуқур сатҳларнинг концентрацияси шунчалик паст бўлади, углерод атомларининг оширилиши, аксинча, W ва Mo сатҳларининг концентрациясини ортишига олиб келади.

“Вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда чуқур марказларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигига ташқи омилларнинг таъсирини ўрганиш” деб номланган тўртинчи бобда, вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларига қўшимча нейтрал (пассив) киришмалар таъсирини термо ишлов бериш ва радиацион нурлантириш орқали тадқиқ қилиш натижалари келтирилган.

Кремнийда вольфрам ва молибден билан боғлиқ нуқсон марказларининг хусусиятларига паст ҳароратли кўйдириш таъсирини ўрганилган ва Si<W> ва Si<Mo> намуналарга 150÷400°С ҳароратда изохрон ва изотермик термоишлов берилганда W ва Mo атомлари кремнийга диффузион киритилиши натижасида сатҳларнинг кўйишига олиб келиши аниқланган.

Қийин эрувчи элементларнинг чуқур сатҳларини кўйиш кинетикасини Si<W> намуналари мисолида кўриб чиқамиз. Бу изотермик кўйдиришда чуқур сатҳларнинг $E_s=0.30$ эВ ва $E_s=0.39$ эВ Nt концентрациялари

кўйдириш вақтида монотон бўлмаган ҳолда ўзгаради. 6-расмдан кўринадикки, 1-3 эгриликлар қисқа вақтлар оралиғида иккала сатҳнинг концентрацияларининг ўсишини кўрсатади, сўнгра $E_c-0.30$ эВ сатҳининг концентрацияси кескин пасаяди, лекин $E_c-0.39$ эВ чуқур сатҳининг концентрацияси камайиши анча секин содир бўлади (7-расм, 1 ва 2 эгриликлар). $E_c-0.22$ эВ сатҳида ҳамда назорат намуналарида (вольфрам киришмасиз) кузатиладиган концентрациянинг ўзгариши кремнийда вольфрам сатҳларининг концентрациясининг ўзгаришига тескари фазада содир бўлади.



6-расм. n-Si<W> ва p-Si<W> намуналарини 300°C ҳароратда изотермик кўйдиришданги DLTS спектрлари

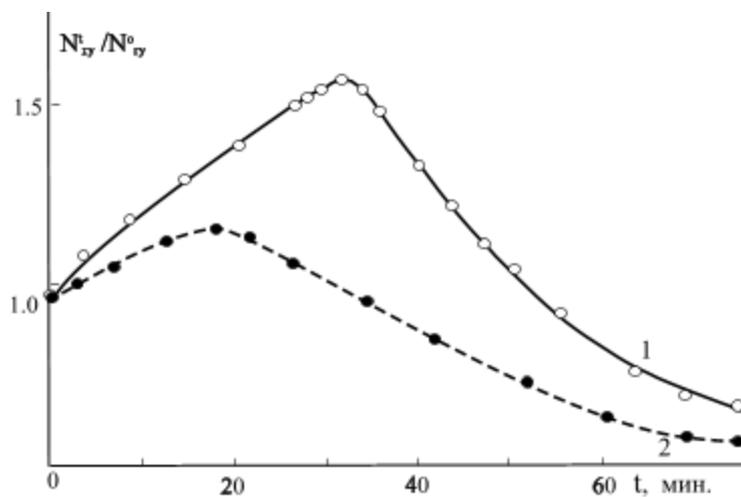
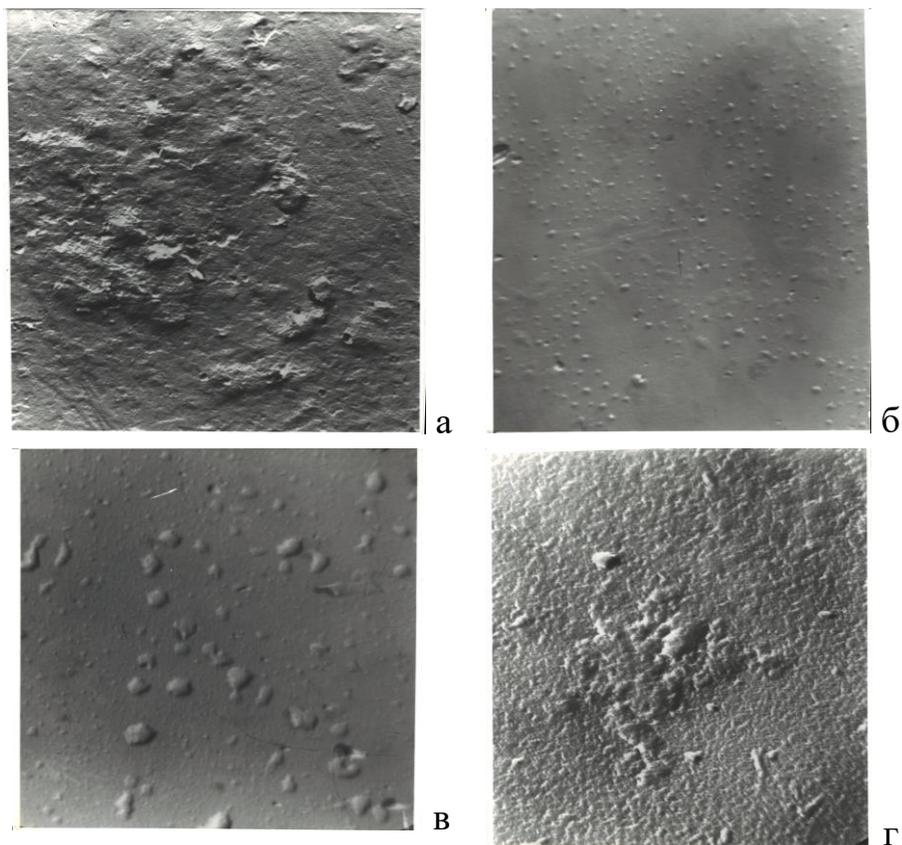


Рис.7. Кинетика изохронного отжига образцов n-Si<W> при 300°C

Si<W> намуналарининг структуравий тадқиқотлари шуни кўрсатдики, қийин эрувчи киришмалар диффузиясидан кейин микрографларда турли шакллардаги катта жамланмалар кузатилади (расм.8, а).



8-расм. Si<W> намуналарининг 300°C изотермик кўйдиришдан сўнг нуқсонлар структурасининг микрофотографияси

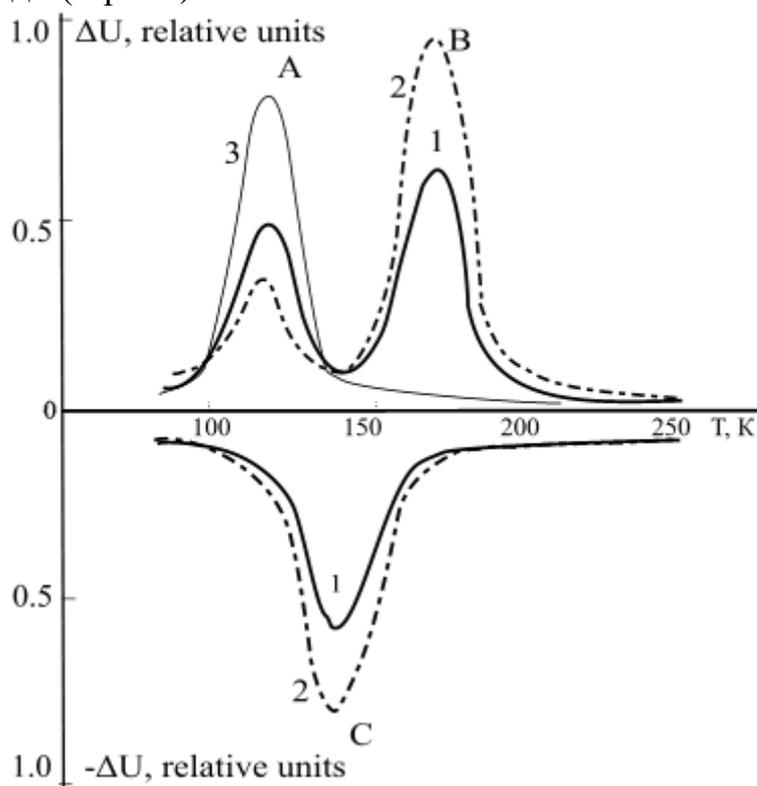
300°C ҳароратда 10 дақиқа изотермик кўйдиришдан сўнг, катта жамланмаларнинг кичик жамланмаларга парчаланиши кузатилади (2-расм, б). Кейинчалик намуналарни 30-40 дақиқа давомида кўйдириш натижасида кичик жамланмалар катта шаклларга айланади (2-расм, в).

Вольфрам атомлари мавжуд бўлган намуналарни тўла кўйдириш натижасида катта ҳажмдаги жамланмаларнинг хосил бўлиши аниқланди (2-расм, г). Шу билан бирга тугунлараро оптик фаол кислород концентрациясининг дастлабки қийматига қайтиши аниқланди (вольфрам киришмаси билан легирлангангача ҳолат).

Si<W> намунани кўйдириш давомида вольфрам атомлари билан боғлиқ турли шакллардаги жамланмаларнинг ўзгариши нуқсон заррачалар катта гуруҳлар ҳажми ўзгариши билан боғлиқ тугунлар аро оптик фаол кислород ва чуқур сатҳ концентрацияси камайиши ўртасидаги боғлиқлик кремний таркибида назоратиз технологик аралашмаларнинг ва нуқсонлари билан қийин эрийдиган элементлар атомлари ўзаро мураккаб табиатини кўрсатиши аниқланган.

Молибден киришмаси билан легирланган n- тип кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнларини ва бу жараёнларга нодир ер элементлари киришмаларидан бири – гадолийнинг таъсирини текширилди.

Олинган натижаларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, кремний панжарасида Gd киришмасининг мавжудлиги DLTS спектрларининг ўзгаришига олиб келади: молибден атомлари билан боғлиқ сатҳларнинг концентрациялари n-Si<Gd,Mo> га нисбатан n-Si<Mo> да 2 марта ортади. Шунинг таъкидлаш керакки, $E_c-0.20$ эВ энергияли чуқур сатҳ термонуқсонлар концентрацияси гадолий атомлари туфайли сезиларли даражада камайди, яъни нодир ер элементлар атомлари термонуқсонлар ҳосил бўлишига тўсқинлик қилади (9-расм).



9-расм. n-Si<Mo> (1), n-Si<Gd, Mo> (2), n-Si (3) намуналарининг DLTS спектрлари, $T_{\text{диф.}}, 1200$ °C.

Кремний ҳажмида гадолий атомларининг мавжудлиги молибден атомларининг эрувчанлигини оширади, шунинг билан бирга термик нуқсонлар билан боғлиқ $E_c-0.20$ эВ сатҳларининг концентрацияси камайиши аниқланди.

Бундан шундай хулоса қилиш мумкинки, кремний ҳажмида нодир ер элементлари киришмаларининг мавжудлиги қийин эрувчи элемент киришмаларининг эрувчанлигини оширади, бу ҳолда Mo кремнийда ва бир вақтнинг ўзида термик нуқсонларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини камайтиради. Бу Si нодир ер элементлар киришмаларининг кремний ҳажмидаги турли нуқсонлар ва назорат қилинмайдиган технологик киришмалар учун ички геттер вазифасини бажаради.

ХУЛОСАЛАР

Ишнинг асосий натижалари қўйидагилардан иборат:

1. Биринчи марта вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда чуқур марказларни ҳар томонлама ўрганиш DLTS ва ФЕ усуллари билан амалга оширилди ва киришмаларнинг электроактив атомларининг тўлиқ эрувчанлиги ва концентрацияси W ва Mo ни Si га киритишнинг технологик шароитларига боғлиқ эканлигини кўрсатилди.

2. Кремнийни вольфрам ва молибден киришмалари билан легирлашнинг технологик режимлари ишлаб чиқилди ва n-Si ва p-Si намуналарига вольфрам киришмаларини диффузия йўли билан, ҳам эритмадан ўстириш йўли билан легирлаш натижасида тақиқланган зонанинг юқори қисмида учта чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиши аниқланган бўлиб, уларнинг ионизация энергия қийматлари $E_c-0.22$ эВ, $E_c-0.30$ эВ ва $E_c-0.39$ эВ, шунингдек тақиқланган зонанинг пастки қисмида ионланиш энергиялари $E_v+0.31$ эВ, $E_v+0.35$ эВ билан икки чуқур сатҳнинг мавжудлиги аниқланган.

3. W ва Mo киришмаларининг Si таркибига ўстириш жараёнида киритилишида киришмаларнинг аксарияти электр фаоллигини кўрсатмаслиги ва улар узоқ муддатли юқори ҳароратли ишлов беришдан сўнг фаоллашиши аниқланган.

4. Вольфрам ва молибден киришмалари билан легирланган кремнийда нуқсон ҳосил бўлиш жараёнларининг самарадорлиги легирлаш усулига, нуқсонли структуранинг мукамаллигига, термик фон ва дастлабки кремнийни бу киришмалар билан легирлашнинг технологик режимларига боғлиқ эканлиги биринчи марта аниқланди.

5. Вольфрам ва молибден киришмаларини юқори ҳароратли диффузия усулида кремнийга киритишда оптик фаол кислород концентрациясини вольфрам ва молибден киришмаларининг концентрациясига қараб 25-30% га камайитишига олиб келиши аниқланди. Таъсир вольфрам ва молибден киришмаларининг кислород билан нейтрал комплексларини шакллантириши билан боғлиқлиги кўрсатилди.

6. Вольфрам ва молибден киришмаларининг кремнийнинг таркибида бўлиши радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини назорат намуналарига нисбатан 5÷6 мартагача пасайтиришига олиб келиши аниқланди, термик нуқсонлар концентрациясини эса 2÷3 марта камайитириши кўрсатилган.

7. Электронеутрал киришмалар (гадолиний) ни кремний таркибига олдиндан киритиш вольфрам ва молибден киришмаларининг эрувчанлигини оширишга олиб келиши, W ва Mo киришмаларининг чуқур сатҳларнинг ҳосил бўлиш самарадорлигини 2 марта оширади.

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

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

ПАЛУАНОВА АНИФА ДАРИБАЕВНА

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ,
ЛЕГИРОВАННОГО ВОЛЬФРАМОМ И МОЛИБДЕНОМ**

01.04.10 – физика полупроводников

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

Ташкент–2022

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам
зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров
Республики Узбекистан за № В2019.2.PhD/FM.380**

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

Автореферат диссертация на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (<http://ispm.uz>) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель: **Далиев Шахрух Хожакбарович**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Азаматов Закиржан Тахирович**
доктор физико-математических наук, профессор

Отажонов Салим Мадрахимович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Ташкентский государственный технический университет**

Защита диссертации состоится «20» 01 2022 года в 15⁰⁰ часов на заседании Научного совета 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. (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-76-94, факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения цифровых технологий института (зарегистрирована за № 32) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Автореферат диссертации разослан «20» 01 2022 года.
(реестр протокола рассылки № 32 от «20» 01 2022 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, PhD

Х.К. Арипов
Председатель 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. В мире период бурного развития науки и техники стремительно растет спрос на использование устройств твердотельной электроники, микроэлектроники, опто- и наноэлектроники. С их развитием связано успешное решение проблемы создания современных систем связи и телевидения, эффективной передачи и преобразования электроэнергии, разнообразной бытовой, медицинской и специальной электронной аппаратуры. Область применения твердотельных устройств постоянно расширяется, создавая совершенно новые типы устройств, позволяющих развивать новые направления в промышленности, что, в свою очередь, требует улучшения структуры Si, являющегося основным материалом современной полупроводниковой твердотельной электроники. В связи с этим, одной из актуальных задач является изучение процессов образования дефектов в Si путем их легирования различными примесями и создание контролируемых методов стабилизации параметров полупроводниковых устройств.

В мире на сегодня изучение процессов дефектообразования в монокристаллическом кремнии, в частности, реализация научных исследований в следующих направлениях считается одной из важных задач: исследование процессов формирования дефектных центров в кремнии, легированном вольфрамом и молибденом под действием различных факторов; изучение влияния технологических примесей на механизмы образования глубоких центров в кремнии с примесями вольфрамом и молибденом; установление закономерностей в формировании энергетического спектра глубоких уровней, создаваемых примесями вольфрама и молибдена, их взаимодействия с другими примесями и структурными дефектами решетки, влияния термических и радиационных дефектов на формирование дефектной структуры легированного кремния. Научно-исследовательские работы, проводимые в указанных направлениях, указывают на актуальность темы данной диссертации.

В годы независимости, учеными Узбекистана уделяется большое внимание изучению процессов легирования полупроводниковых материалов и многослойных структур с глубокими уровнями. Достигнуты определенные успехи в разработках по повышению фоточувствительности кремниевых структур путем введения примесей тугоплавких элементов. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, является наиболее важным повышение эффективности отрасли микроэлектроники на основе теоретических и практических исследований в области физики полупроводников за счет внедрения инновационных технологий.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач предусмотренных в постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 “О мерах по дальнейшему

совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, № ПФ-4947 «Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года, ПФ-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научно-технической деятельности» от 14 июля 2018 года, ПП-5032 « О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Настоящее исследование выполнено в соответствии с Приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: Ф2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» III «Энергия, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Исследования в области физики полупроводников и полупроводниковых материалов проводились исследовательскими центрами, институтами и университетами передовых стран: в том числе университеты Чента и Калифорнии (США), Hemlock Semiconductor Corporation, Sony Corporation, Philips Semiconductors, STMicroelectronics (Италия), Lucent Technologies Испания) и Берлинского технического университета (Германия). Исследования ведутся в Bell Laboratory Research Center (SRC).

В настоящее время ведутся исследования поведения тугоплавких элементов в различных материалах с целью создания датчиков температуры на основе полупроводниковых материалов на основе кремния и улучшения других их функциональных параметров; разработка датчиков температуры и влажности на основе легированного Si; исследование процессов образования термических и радиационных дефектов в кремнии, легированном различными элементами; исследование наноразмерных дефектов, возникающих на границе раздела многослойным структур.

До сих пор внимание ученых и производителей было сосредоточено на изучении физических процессов, происходящих в кремниевых и кремниевых структурах, а также стабильности их параметров.

Американские, итальянские и японские ученые Lauwaert J, Koichiro S, Simoen E, Vrielinck. H, M.L. Poligano, A. Gaibati, S. Grasso, D. Magni (W и Mo) провели исследования энергетических спектров глубоких центров, образованных в запрещенной зоне кремния, легированного атомами различных глубоководных примесей.

Российские ученые Я. Расмагин, И. К. Новиков В.А., Родионов Д.П., Степанова Н.Н., Филиппов Ю.И. Казанцев изучили состояние различных глубоких уровней в кремнии и определили энергетические спектры и парамагнитные центры этих примесей. Они также изучили свойства ряда

пассивных, электрически неактивных атомов в кремнии и других полупроводниках.

Узбекские ученые Муминов Р.А., Бахадырханов М.К., Зайнабидинов С.З., Мамадалимов А.Т., Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Далиев Ш.Х и другие также внесли значительный вклад в развитие физики локальных центров в полупроводниках и полупроводниковых структурах.

Несмотря на большое количество экспериментальных данных по изучению свойств полупроводников и полупроводниковых структур, до настоящего времени отсутствует данные, позволяющие прогнозировать поведение кремния и многослойных структур на его основе при воздействии различных внешних факторов: давления, температуры и радиоационного излучения.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательской работы высшего образовательного и научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.

Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Национального университета Узбекистана и Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана в соответствии с тематическими планами грантов Агентства по науке и технологиям Республики Узбекистан: ЁФ-2-08 «Изучение влияния радиации на образование и отжиг дефектов в кремнии и кремниевых многослойных структурах с примесями редкоземельных элементов» (2010-2011), ЁФ-2-13 «Влияние примесей подгруппы титана на электрофизические свойства кремниевых структур» (2016-2017 гг.) и ОТ-Ф2-11 «Исследование закономерностей образования наноразмерных дефектов в поверхностных слоях и объеме кремния, легированного примесями d-элементов» (2017-2020 гг.), МУ-Ф3-20171025461 «Электрофизические характеристики и свойства кремниевых МДП-структур с оксидами лантана, гадолиния и европия в качестве диэлектрика» (2018-2019 гг.).

Целью исследования является исследование особенностей образования дефектов в кремнии, легированном примесями вольфрама и молибдена, а также влияния технологических примесей на поведение этих примесей в кремнии с помощью емкостной и инфракрасной спектроскопии.

Задача исследования:

оптимизировать технологию легирования кремния примесями вольфрама и молибдена;

исследовать электрофизические свойства образцов Si, легированных вольфрамом и молибденом разными методами;

изучить влияние исходной дефектной структуры кремния на процессы образования глубоких центров вольфрама и молибдена;

исследовать особенности образования дефектных центров в кремнии, легированном примесями вольфрама и молибдена;

изучить влияние различных технологических режимов и внешних факторов на эффективность образования глубоких центров, создаваемых примесями вольфрама и молибдена в кремнии;

изучить роль электронейтральных примесей в процессах дефектообразования в кремнии, легированном молибденом и вольфрамом.

Объектом исследования является монокристаллический кремний, выращенный методом Чохральского и бестигельной зонной плавки, легированный примесями вольфрама и молибдена.

Предметом исследования является исследование особенностей образования дефектов в кремнии, легированном примесями вольфрама и молибдена.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней, фотоемкости, фотопроводимости, инфракрасной спектроскопии и рентгеновской топографии.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

Оптимизированы технологические режимы легирования кремния вольфрамом и молибденом;

установлено, что полная растворимость и концентрация электроактивных атомов примесей вольфрама и молибдена зависит от технологических режимов их введения в Si;

установлено, что примеси вольфрама и молибдена, введенные в кремний при выращивании, находятся в электронейтральном состоянии и активировать их можно путем длительных высокотемпературных обработок;

впервые установлено, что эффективность процессов дефектообразования в кремнии, легированном вольфрамом и молибденом зависит от способа легирования, совершенства дефектной структуры, термической предыстории и технологических режимов легирования кремния этими примесями;

обнаружено, что введение вольфрама и молибдена в кремний путем высокотемпературной диффузии приводит к уменьшению концентрации оптически активного кислорода на 25-30 % в зависимости от концентрации введенных примесей, что обусловлено образованием нейтральных комплексов вольфрама и молибдена с кислородом;

установлено, что присутствие вольфрама и молибдена в объеме кремния приводит к снижению эффективности образования радиационных дефектов в 5 ÷ 6 раз, а термических дефектов в 2 ÷ 3 раза по сравнению с контрольными образцами;

впервые обнаружено, что предварительное введение электронейтральной примеси - гадолиния в кремний приводит к увеличению растворимости атомов вольфрама и молибдена и эффективности образования глубоких уровней в 2 раза;

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Разработаны способы повышения эффективности образования глубоких уровней, создаваемых вольфрама и молибдена в кремнии;

Разработаны технологические режимы снижения эффективности образования радиационных дефектов и увеличения термической стабильности кремния путем введения примесей вольфрама и молибдена;

Достоверность результатов исследований подтверждается применением методов нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней, фотоемкости, методов фотопроводимости, инфракрасной спектроскопии, имеющих высокую чувствительность по концентрации, высокую разрешающую способность по энергии и возможность отдельного определения параметров каждого из уровней, а также хороший воспроизводимостью результатов, полученных разными методами.

Научная и практическая значимость результатов исследований.

Научная значимость результатов исследования заключается в расширении представлений о физических процессах, происходящих в монокристаллическом кремнии и кремниевых структурах, легированных атомами вольфрама и молибдена.

Полученные результаты по повышению термической стабильности и радиационной стойкости параметров кремния путем введения вольфрама и молибдена могут быть использованы при изготовлении различных полупроводниковых приборов.

Внедрение результатов исследования.

По результатам изучения особенностей образования дефектов в кремнии, легированном примесями вольфрама и молибдена, а также влияния технологических примесей на поведение этих примесей в кремнии с помощью емкостной и инфракрасной спектроскопии:

технология легирования монокристаллического кремния примесями вольфрама и молибдена и структур на их основе позволила детально изучить процессы образования термодиффектов в наноструктурированных кремниевых датчиках в Ташкентском государственном техническом университете при выполнении проекта “Разработка микропроцессорных устройств для контроля температуры и влажности в различных условиях” (справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 4 ноября 2021 г. №89-03-2337). Использование научных результатов позволило детально изучить процессы образования различных термических дефектов в кремниевых структурах и привело к увеличению термостойкости наноструктурированных кремниевых датчиков в 2-3 раза.

полученные научные результаты апробированы на экспериментальных образцах АО «FOTON» и их использование позволило улучшить рабочие параметры полупроводниковых диодов на 10-15%. (Регистрационный номер №04-3/2494 АО «Узэлтехсаноат» от 22 ноября 2021 г.) Использование научных результатов позволило контролировать энергетические спектры глубоких поверхностей, сформированных в кремнии, легированном атомами вольфрама и молибдена;

снижение концентрации технологических неконтролируемых примесей (O, S) в кремнии на 20-25% при диффузионном введении атомов вольфрама и

молибдена в кремний позволило уменьшить концентрацию термических дефектов в 2-3 раза.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 7 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 9 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Кабинете Министров Республики Узбекистана для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, аннотации, списка использованной литературы из 140 названий, 21 рисунков, 4 таблиц, 130 страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы 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, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Основные сведения о состоянии вольфрама и молибдена в кремнии»** анализируются результаты, представленные в литературе. В этой главе рассматривается введение атомов вольфрама и молибдена в трудно растворимые элементы, внедренные в монокристаллы кремния различными методами, и результаты устройств на их основе. Проанализированы данные об электрофизических свойствах кремния, легированного вольфрамом и молибденом, при различных температурах, влиянии внешнего излучения, а также влиянии технологических вмешательств на кремний на структурные дефекты.

Описан анализ состояния, природы и влияния различных дефектов на различные внешние факторы в кремнии и кремниевых структурах. На основании проведенного анализа определены цели и задачи диссертации.

Вторая глава диссертации, озаглавленная **«Методика экспериментов. технология изготовление образцов»**, подробно описывает основные закономерности измерения емкостной спектроскопией глубоких поверхностей в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Описана сущность классического стиля DLTS. В нем также описан метод расчета спектров DLTS, полученных путем сканирования спектров DLTS в

различных режимах, а также путем однократного и множественного сканирования.

Для определения концентрации кислорода и углерода в фоновых поступлениях кремния был разработан метод измерения спектров ИК-поглощения с использованием инфракрасного спектрофотометра SPECORD-72-IR, работающего в спектре от 1200 до 400 см⁻¹ инфракрасного (ИК) излучения по двухлучевой схеме описан.

Кроме того, полностью описана технология легирования кремния легированными вольфрама и молибдена.

Третья глава диссертации, озаглавленная **«Исследование особенностей образования дефектных центров в кремнии, легированном примесями вольфрама и молибдена»**, посвящена изучению процессов дефектообразования, происходящих в кремнии при легировании атомами вольфрама и молибдена. Описаны результаты исследования с помощью методов емкостной спектроскопии (DLTS и ФЁ) энергетического спектра глубоких дефектных центров в кремнии, легированном примесями вольфрама и молибдена, определены особенности образования глубоких уровней, образуемых молибденом и вольфрамом в запрещенной зоне кремния.

Обнаружено, что вольт-фарадные характеристик (ВФХ) во всех исследованных диодах на основе Si<Mo> и Si<W>, полученных путем легирования примесями W и Mo при 1200°С в течение 1–50 ч, носят линейный характер. Это свидетельствует о том, что примеси W и Mo равномерно распределены по объему кремния.

Результаты измерения профиля распределения удельного сопротивления образцов Si<Mo> и Si<W> показали, что введение примеси

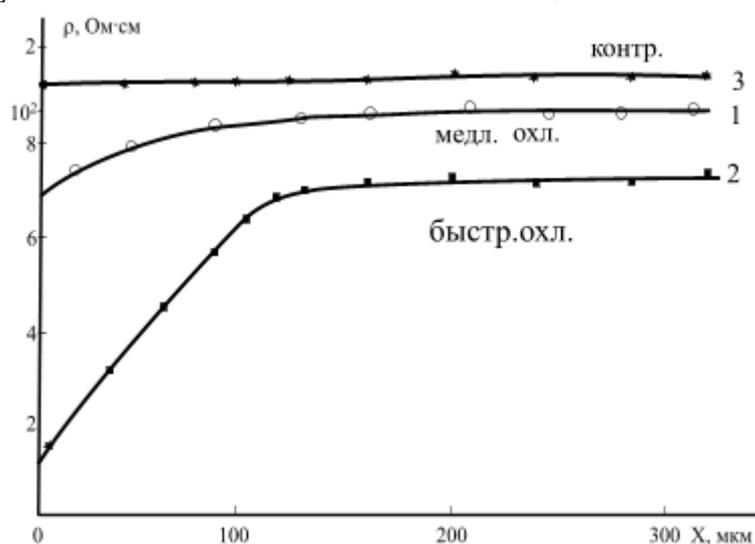


Рис.1. Профиль распределения удельного сопротивления в образцах Si<Mo> после диффузии с медленным (1) и быстрым (2) охлаждением и контрольный Si (3)

вольфрама или молибдена приводит к заметному изменению удельного сопротивления образцов и профиля распределения ρ в зависимости от скорости охлаждения после диффузии (рис.1).

Энергетический спектр дефектов в кремнии рассмотрим на примере вольфрама. Результаты измерений показали, что на спектрах DLTS образцов n-Si<W> наблюдаются три пика (рис.2, кривая 1, пики А, В и С) с максимумами при $T_m = 125$ К, $T_m = 145$ К и $T_m = 160$ К. Пересчет спектров DLTS в зависимости Аррениуса показывает, что наблюдаемые глубокие уровни связаны с перезарядкой этих пиков с энергиями ионизации $E_c - 0.22$ эВ, $E_c - 0.30$ эВ и $E_c - 0.39$ эВ. В образцах p-Si <W> идентифицированы два глубоких уровня с энергиями ионизации $E_v + 0,31$ эВ, $E_v + 0,36$ эВ (рис.2, пики D и E).

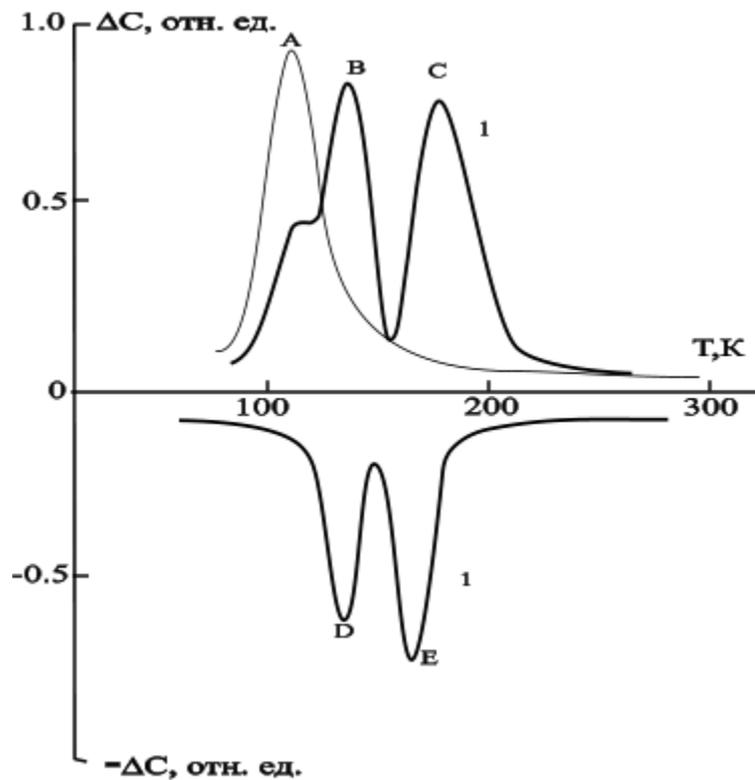


Рис.2. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<W> и p-Si<W>

Анализ полученных данных показывает, что уровень с энергией ионизации $E_c - 0.22$ эВ наблюдается и в контрольных термообработанных образцах, причем его концентрация значительно больше, чем в Si<W>.

Показано, что концентрации наблюдаемых уровней зависят от технологических условий введения вольфрама.

Результаты проведенных измерений спектров DLTS образцов n-Si<Mo> и p-Si<Mo> показали, что диффузионное введение Mo в Si при 1200°C с последующим быстрым охлаждением приводит к образованию двух глубоких уровней с энергиями ионизации $E_c - 0.20$ эВ и $E_c - 0.29$ эВ. В

нижней половине запрещенной зоны образцов n-Si<Mo> обнаружен один глубокий уровень с энергией ионизации $E_v+0.36$ эВ.

Сравнение результатов DLTS для образцов n-Si<Mo> и p-Si<Mo>, легированных молибденом при разных температурах, показывает, что эффективность образования глубоких уровней, связанных с молибденом, так же как и в случае с вольфрамом, зависит от температуры диффузии $T_{\text{диф}}$ и скорости охлаждения $v_{\text{охл}}$. Концентрации ГУ увеличиваются с ростом $T_{\text{диф}}$ и $v_{\text{охл}}$. (рис 3).

Анализ данных показывает, что присутствие атомов Mo в объеме Si приводит к снижению концентрации глубоких уровней $E_c-0.20$ эВ, связанных с термообработкой.

Сравнение результатов DLTS образцов n-Si<Mo> и p-Si<Mo>, легированных молибденом при разных температурах, показывает, что эффективность образования глубоких уровней, связанных с молибденом, так же, как и в случае с вольфрамом, зависит от температуры диффузии $T_{\text{диф}}$. Концентрации глубоких уровней увеличиваются с ростом температуры диффузии.

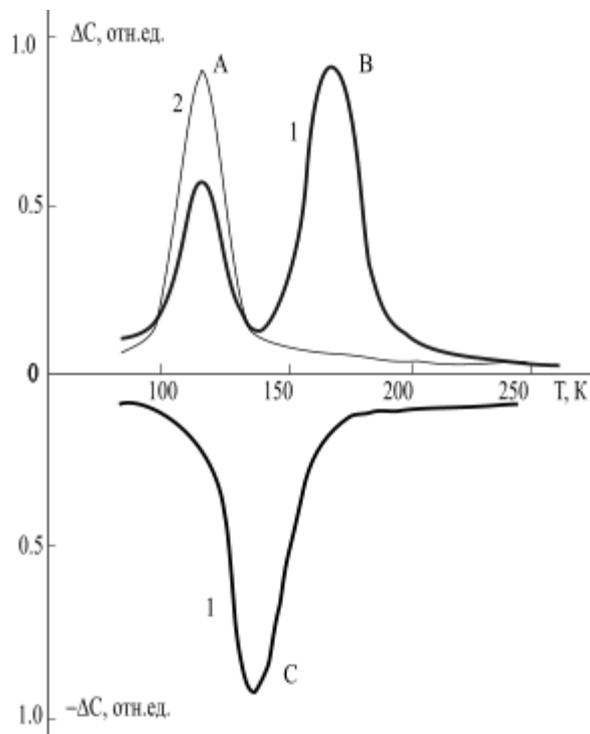


Рис.3. Спектры DLTS образцов n-Si<Mo> и p-Si<Mo>, легированных молибденом при 1200°C (кривая 1) и контрольных термообработанных образцов n-Si (кривая 2)

Изучены процессы дефектообразования в кремнии с примесью вольфрама и молибдена с помощью инфракрасной спектроскопии.

Исследовано влияние состояния ростовых технологических примесей на образование дефектных центров вольфрама и молибдена. Обнаружено, что диффузионное введение примеси вольфрама или молибдена в Si, также как и других тугоплавких элементов, приводит к уменьшению концентрации оптически активного кислорода на $20 \div 30 \%$ в зависимости от температуры диффузии и скорости охлаждения после нее (рис. 4, кривая 2). В контрольных образцах, термообработанных при тех же условиях, что и диффузия вольфрама или молибдена этот эффект не наблюдался (рис.4, кривая 1).

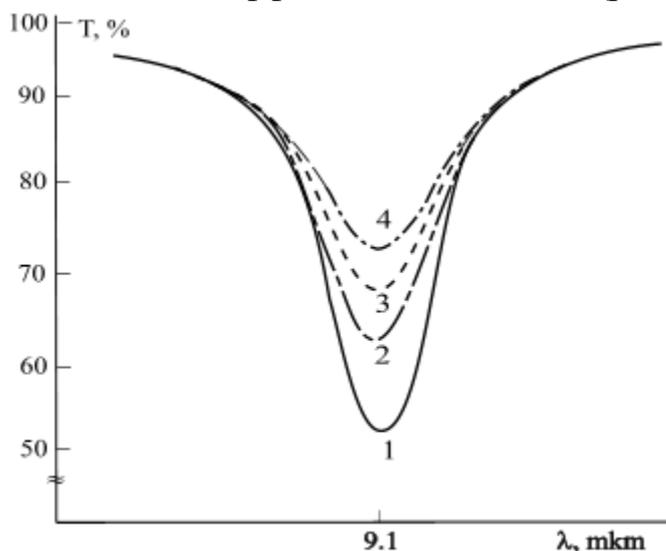


Рис.4. Типичные спектры ИК-поглощения контрольных образцов n-Si (кривая 1), n-Si<W> (кривая 2), n-Si+ВТО (кривая 3), n-Si<W>с предварительным ВТО при 1100°C (кривая 4).

Показано, что введение вольфрама или молибдена в предварительно термообработанный кремний приводит к снижению эффективности образования дефектных центров вольфрама и молибдена. Измерения спектров ИК-поглощения в термообработанных образцах кремния показали, что ВТО при 1100°C приводит к преципитации атомов кислорода, в результате этого происходит существенное уменьшение $N_{O^{opt}}$ на 40-50% (рис. 4, кривая 3). В образцах, предварительно подвергнутых ВТО, а затем легированных вольфрамом или молибденом уменьшение $N_{O^{opt}}$ составило $10 \div 15 \%$ относительно термообработанных образцов (рис. 3, кривая 4). Это объясняется, вероятно, особенностями взаимодействия атомов вольфрама или молибдена со связанными состояниями атомов кислорода.

Результаты измерений показали, что эффективность образования дефектных центров вольфрама и молибдена зависит и от содержания ростовых примесей - кислорода и углерода (рис.5, кривые 1-3).

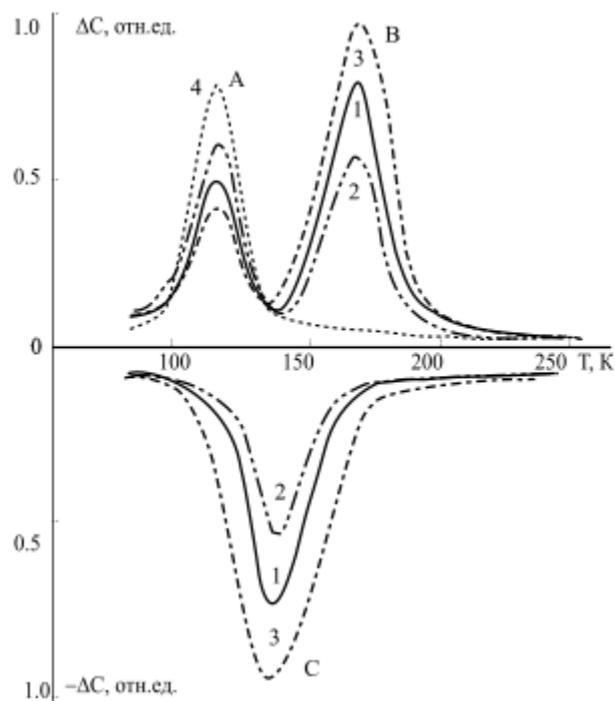


Рис.5. Спектры DLTS образцов n-Si<Mo> и p-Si<Mo>, легированных молибденом при 1200°C (1), с повышенным содержанием кислорода (2) и углерода (3) и контрольных термообработанных образцов n-Si (4)

Установлено, что чем больше концентрация атомов кислорода в объеме кремния, тем меньше концентрация глубоких уровней, связанных с вольфрамом и молибдена, повышенное содержание атомов углерода, наоборот, приводит к увеличению концентрации уровней W и Mo.

В четвертой главе, озаглавленной “**Исследование влияния различных внешних факторов на эффективность образования глубоких центров в кремнии, легированном вольфрамом и молибденом**”, приведены результаты исследования воздействия термообработки и радиационного облучения, дополнительного легирования нейтральными (пассивными) примесями на процессы дефектообразования в кремнии, легированном примесями вольфрама и молибдена.

Нами изучено влияние низкотемпературного отжига на поведение дефектных центров, связанных с вольфрамом и молибденом в кремнии и было обнаружено, что термообработка, как изохронная, так и изотермическая, в интервале 150÷400°C образцов Si<W> и Si<Mo> приводит к отжигу уровней, обусловленных диффузионным введением атомов W и Mo в кремнии.

Рассмотрим кинетику отжига глубоких уровней тугоплавких элементов на примере образцов Si<W>. Установлено, что при изотермическом отжиге концентрации N_t глубоких уровней $E_c-0.30$ эВ и $E_c-0.39$ эВ изменяются немонотонно со временем отжига. Как видно из рис.6, кривые 1-3 концентрации обоих уровней при малых временах возрастают, затем

концентрация уровня $E_c-0.30$ эВ резко падает, а уменьшение концентрации ГУ $E_c-0.39$ эВ происходит значительно медленнее (рис.7, кривые 1 и 2). Изменение концентрации уровня $E_c-0.22$ эВ, который наблюдается также и в контрольных образцах (без вольфрама), происходит в противофазе изменению концентрации уровней вольфрама в кремнии.

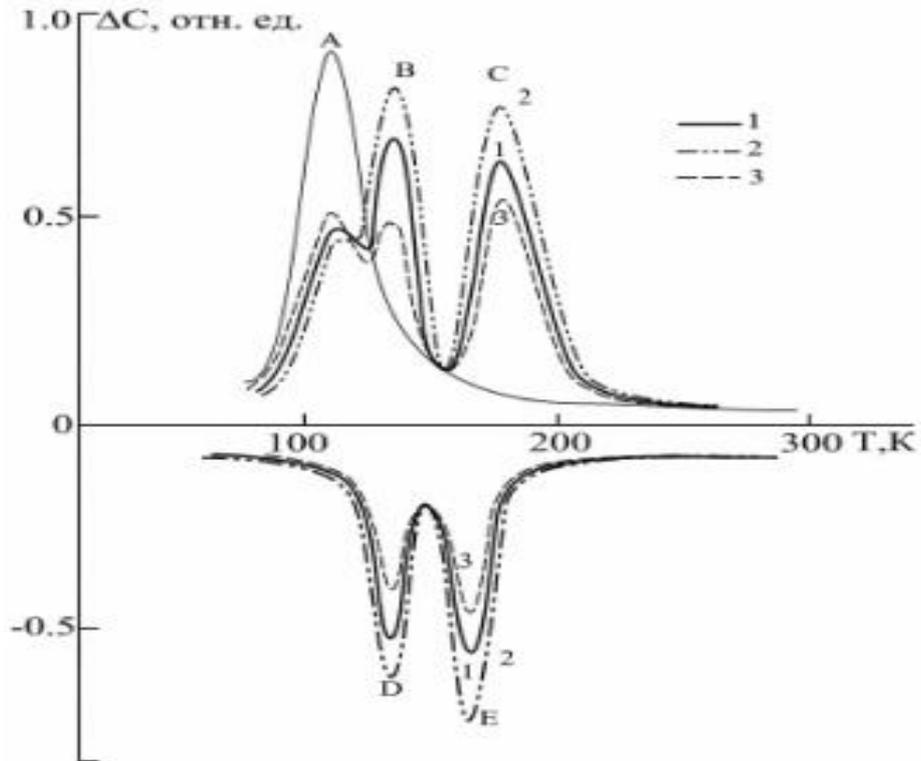


Рис.6. Спектры DLTS образцов $n\text{-Si}\langle W \rangle$ и $p\text{-Si}\langle W \rangle$, подвергнутых изотермическому отжигу при 300°C

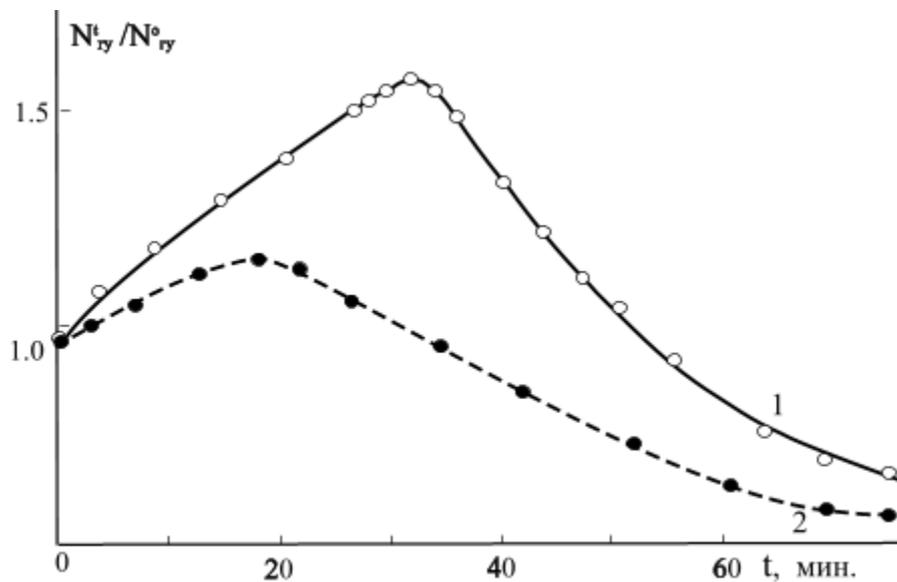


Рис.7. Кинетика изохронного отжига образцов $n\text{-Si}\langle W \rangle$ при 300°C

Структурные исследования образцов Si<W> показали, что после диффузии примесей ТПЭ на микрофотографиях наблюдаются крупные скопления различной формы (рис.8, а).

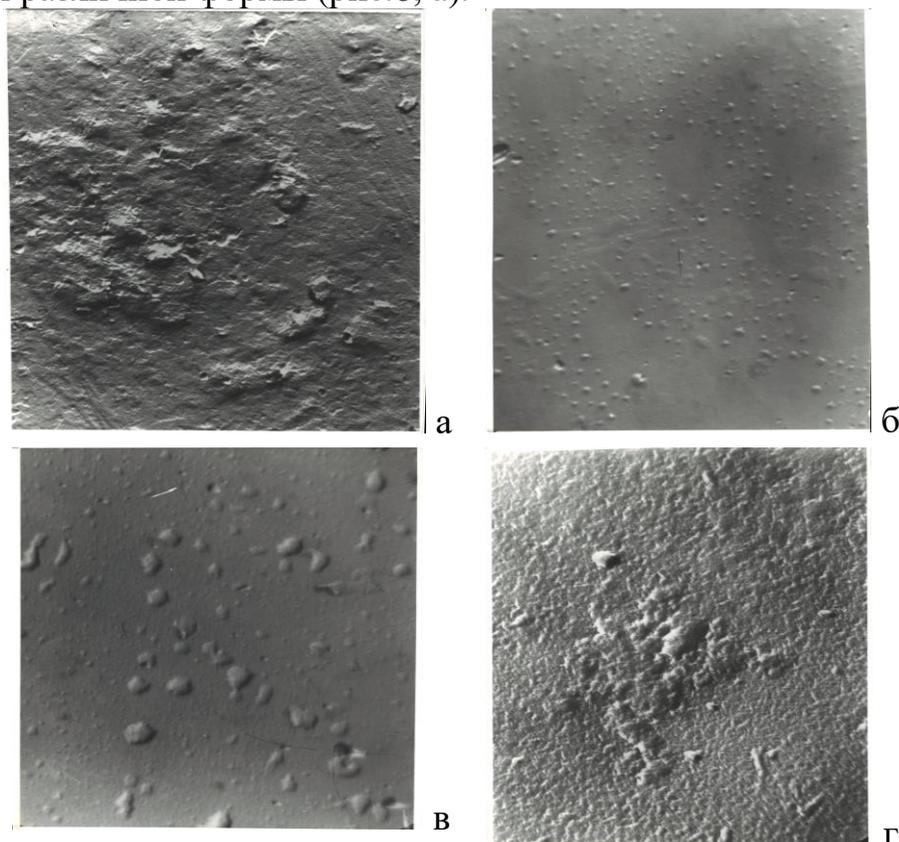


Рис.8. Микрофотографии дефектной структуры образцов Si<W> после изотермического отжига при 300°C

После изотермического отжига при 300°C, 10 мин. наблюдается распад больших скоплений на более мелкие (рис.2, б). При дальнейшем отжиге образцов в течение 30-40 мин. мелкие скопления собираются в более крупные образования (рис.2, в). Полный отжиг уровней, обусловленных примесью W, сопровождается образованием крупных скоплений (рис.2, г). При этом концентрация междоузельного оптически активного кислорода возвращается к исходному значению (до легирования W).

Показано, что корреляция между уменьшением концентрации междоузельного оптически активного кислорода и глубокими уровнями, связанных с атомами вольфрама с изменением размеров крупных скоплений дефектных частиц различной формы в Si<W> при отжиге, свидетельствует о сложном характере взаимодействия атомов тугоплавких элементов с неконтролируемыми технологическими примесями и дефектами структуры кремния.

Нами исследовались процессы дефектообразования в n-кремнии, легированном молибденом и влияния на эти процессы одной из примесей редкоземельных элементов – гадолиния.

Анализ полученных результатов показывает, что присутствие в решетке кремния примеси Gd приводит к трансформации спектров DLTS:

концентрации уровней, связанных с атомами молибдена увеличиваются в 2 раза в $n\text{-Si}\langle\text{Gd, Mo}\rangle$ по сравнению с $n\text{-Si}\langle\text{Mo}\rangle$. Следует отметить, что концентрация ГУ $E_c-0.20$ эВ, обусловленного термодфектами, значительно уменьшается в присутствии атомов гадолиния, то есть атомы редкоземельных элементов препятствуют образованию термодфектов (рис.9).

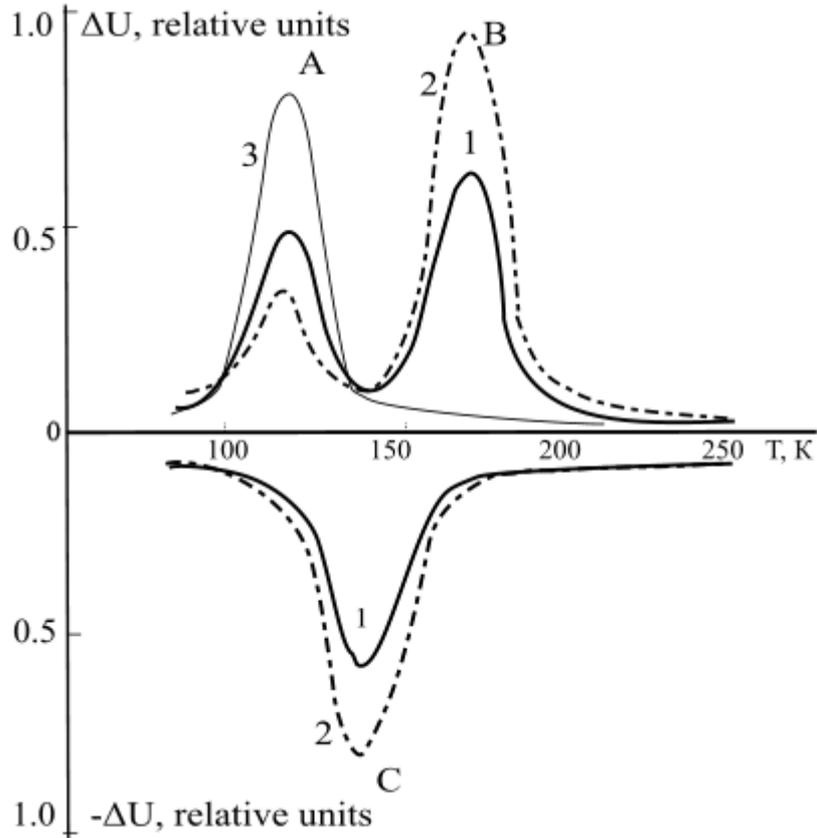


Рис.9. Типичные спектры DLTS образцов $n\text{-Si}\langle\text{Mo}\rangle$ (1) и $n\text{-Si}\langle\text{Gd, Mo}\rangle$, $T_{\text{диф}}=1200^\circ\text{C}$, $n\text{-Si}$ (3) - контрольный образец.

Установлено, что присутствие атомов гадолиния в объеме кремния увеличивает растворимость атомов молибдена, при этом уменьшается концентрация уровней $E_c-0.20$ эВ, связанного с термодфектами.

Можно сделать вывод, что присутствие примесей редкоземельных элементов в объеме кремния, существенно повышает растворимость примесей тугоплавких элементов, в данном случае Мо в кремнии и одновременно снижает эффективность образования термодфектов. Это свидетельствует о том, что примеси редкоземельных элементов в Si выступают в роли внутренних геттеров для различных дефектов в объеме кремния, а также неконтролируемых технологических примесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Впервые проведено комплексное исследование особенностей образования глубоких центров в кремнии, легированном примесями вольфрама и молибдена методами DLTS и ФЕ и показано, что полная растворимость и концентрация электроактивных атомов примесей W и Mo зависит от технологических условий их введения в Si.
2. Оптимизированы технологические режимы легирования кремния вольфрамом и молибденом и установлено, что в образцах n-Si и p-Si, легированного вольфрамом как путем диффузии, так и в процессе выращивания из расплава, образуются три ГУ в верхней половине запрещенной зоны, с фиксированными энергиями ионизации $E_c-0.22$ эВ, $E_c-0.30$ эВ и $E_c-0.39$ эВ. В нижней половине запрещенной зоны этих образцов - два глубоких уровня с энергиями ионизации $E_v+0.31$ эВ, $E_v+0.35$ эВ.
3. Установлено, что большинство этих примесей, введенных в Si при выращивании, не проявляют электрической активности и активировать их можно путем длительных высокотемпературных обработок.
4. Впервые установлено, что эффективность процессов дефектообразования в кремнии, легированном вольфрамом и молибденом зависит от способа легирования, совершенства дефектной структуры, термической предыстории и технологических режимов легирования исходного кремния этими примесями.
5. Обнаружено, что введение вольфрама и молибдена в кремнии путем высокотемпературной диффузии приводит к уменьшению концентрации оптически активного кислорода на 25-30 % в зависимости от концентрации вольфрама и молибдена. Эффект связывается с образованием нейтральных комплексов вольфрама и молибдена с кислородом.
6. Обнаружено, что присутствие вольфрама и молибдена в кремнии приводит к снижению эффективности образования радиационных дефектов в 5 ÷ 6 раз по сравнению с контрольными образцами, а концентрация термических дефектов снижается в 2÷3 раза в присутствии атомов W и Mo в объеме кремния.
7. установлено, что предварительное введение электронейтральных примесей (гадолиния) приводит к повышению растворимости атомов вольфрама и молибдена и увеличивает эффективность образования глубоких уровней, создаваемых W и Mo в 2 раза.

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

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

PALUANOVA ANIFA DARIBAEVNA

**ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SILICON DOPED WITH
TUNGSTEN AND MOLYBDENUM**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent - 2022

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research work is to study the features of the formation of defects in silicon doped with tungsten and molybdenum impurities, as well as the effect of technological impurities on the behavior of these impurities in silicon using capacitive and infrared spectroscopy.

The object of investigation is monocrystalline silicon, grown by the Czochralski method and crucible-free zone melting, doped with tungsten and molybdenum elements.

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

Technological modes of silicon doping with tungsten and molybdenum have been developed;

the features of the formation of defects in silicon doped with tungsten and molybdenum impurities have been investigated and it has been shown that the total solubility and concentration of electroactive atoms of W and Mo impurities depends on the technological conditions of their introduction into Si;

it was found that most of these impurities introduced into Si during growth do not exhibit electrical activity and can be activated by prolonged high-temperature treatments;

it was established for the first time that the efficiency of defect formation processes in silicon doped with tungsten and molybdenum depends on the alloying method, the perfection of the defect structure, thermal history and technological modes of alloying the initial silicon with these impurities;

it was found that the introduction of tungsten and molybdenum in silicon by high-temperature diffusion leads to a decrease in the concentration of optically active oxygen by 25-30%, depending on the concentration of tungsten and molybdenum. The effect is associated with the formation of neutral complexes of tungsten and molybdenum with oxygen;

it was found that the presence of tungsten and molybdenum in silicon leads to a decrease in the efficiency of the formation of radiation defects by a factor of 5–6 in comparison with the control samples;

it is shown that the concentration of thermal defects decreases by a factor of 2–3 in the presence of W and Mo atoms in the bulk of silicon;

it was found that the preliminary introduction of electrically neutral impurities (gadolinium) leads to an increase in the solubility of tungsten and molybdenum atoms and increases the efficiency of the formation of deep levels created by W and Mo by a factor of 2;

Implementation of the research results. Based on the results of studying the features of the formation of defects in silicon doped with tungsten and molybdenum impurities, as well as the effect of technological impurities on the behavior of these impurities in silicon using capacitive and infrared spectroscopy:

the technology of doping monocrystalline silicon with tungsten and molybdenum impurities and structures based on them made it possible to study in detail the processes of formation of thermal defects in nanostructured silicon sensors at the Tashkent State Technical University during the implementation of

the project “Development of microprocessor devices for monitoring temperature and humidity in various conditions” (reference of the Ministry of Higher and Secondary special education of the Republic of Uzbekistan dated November 4, 2021, No. 89-03-2337). The use of scientific results made it possible to study in detail the processes of formation of various thermal defects in silicon structures and led to an increase in the thermal resistance of nanostructured silicon sensors by a factor of 2-3.

the obtained scientific results were tested on experimental samples of JSC "FOTON" and their use made it possible to improve the operating parameters of semiconductor diodes by 10-15%. (Registration number No. 04-3 / 2494 of JSC "Uzeltekhsanoat" dated November 22, 2021) The use of scientific results made it possible to control the energy spectra of deep surfaces formed in silicon doped with tungsten and molybdenum atoms;

A decrease in the concentration of technological uncontrolled impurities (O, C) in silicon by 20-25% with the diffusion introduction of W and Mo atoms into silicon made it possible to reduce the concentration of thermal defects by a factor of 2-3.

Approbation of research results. The main results of the dissertation work were reported and discussed at 7 international and 7 republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. On the topic of the dissertation, 23 scientific papers on the topic were published, including 9 articles in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, four chapters, annotations, bibliography, 140 titles, 21 figures, 4 tables, 130 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I-бўлим (I часть, part I)

1. Далиев Ш. Х., Палуанова А.Д., Файзуллаев К.М., Кайпназаров С.Г. Энергетический спектр дефектов в кремнии с примесью молибдена. // Физика полупроводников и микроэлектроника. Ташкент, 2019, №3, С.47-53. (01.00.00; №16)

2. Далиев Х.С., Далиев Ш.Х., Хусанов З.М., Палуанова А.Д. Радиационное и термическое дефектообразование в кремниевых МДП структурах с примесями тугоплавких элементов. // Физика полупроводников и микроэлектроники. Ташкент, 2019, №5, С.62-67. (01.00.00; №16)

3. Daliev Sh. Kh., Paluanova A.D., Ergashev J., Rakhimov A. Defect structure of silicon with an impurity of tungsten under the influence of external factors. // Euroasian journal of semiconductor science and engineering. Tashkent, 2020, №3 pp.39-42. (01.00.00; №16)

4. Далиев Ш.Х., Эргашев Ж.А., Рахимов А. Дефектная структура кремния с примесью вольфрама под воздействием внешних факторов. // “Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы”. Ташкент, 2020, С. 57-61, 28-май.

5. Daliev Sh. Kh., Usmanova Sh. P., Paluanova A.D. Energy Spectrum of Defective Centers in Silicon Doped with Molybdenum. // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 2020, Vol. 8, No. 9, pp.6222 – 6325. (№12, Index Copernicus)

6. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д. О роли состояния ростовых примесей в процессах дефектообразования в кремнии, легированном вольфрамом. // Science and world, 2021, Vol.1, №89, pp.8-11. (№5, GIF:0.325).

7. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д. Воздействие температурной обработки на энергетический спектр дефектов в кремнии, легированном молибденом. // Евразийский союз ученых. 2021, Т. 1, № 82. С.50-53. (№5, GIF:0.388).

8. Daliev Sh.Kh., Paluanova A.D. Effect of gadolinium atoms on defect formation in silicon doped with molybdenum impurities. // European Science Review. 2021, №5-6, pp. 38-41. (№5, GIF:1.44).

9. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д. Особенности дефектообразования в кремнии с молибденом в присутствии электронейтральных примесей. // Science and world, 2021, Vol.8, № 96, pp. 17-19. (№5, GIF:0.325).

II-бўлим (II часть, part II)

10. Утамурадова Ш.Б., Палуанова А.Д.. Изучение особенностей дефектообразования в кремнии с дефектно примесными ассоциатами. // «Яримўтказгичлар физикасининг ва кайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг муаммолари» Андижон 2018-йил, 34-35 бб.

11. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д., Радиационное дефектообразование в кремнии, легированном тугоплавкими элементами. // Яримўтказгичлар физикасининг Ҳозирги замон муаммолари республика илмий анжумани материаллари. Ташкент-2018. 34-35 бб.
12. Палуанова А.Д. Изучение влияния примесей, в частности вольфрама электрофизического свойства кремния.// “Қайта тикланувчи энергия манбалари ва барқарор атроф муҳит физикаси” мавзусида ўтказиладиган Республика илмий-техник анжуманида. Қарши, 2019. 25-26 март, 60-61 бб.
13. Daliev Sh.Kh, Mamadalimov A.T., Paluanova A. D., Radiation defect formation in silicon with impurity molybdenum. // 9-халқаро анжуман Ядро физикаси ва ядро технологияларининг ҳозирги замон муаммолари Тошкент, 2019, 24-27 сентябрь, 257-258 бб.
14. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д., Кинетика низкотемпературного отжига уровней вольфрама в кремнии. // Респуб науч практ конф с участием зарубежных ученых “Физика и экология” Нукус-2019, 17-18 октябрь, С. 19-20
15. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д., .Утемуратова Х.Ю., Норкулов Ш.Б. Генерационные характеристики МДП- структур с диэлектрическими пленками из оксидов редкоземельных элементов. // “Современные проблемы физики полупроводников” Республиканской конференции. Нукус-2019, 20-ноябрь. С. 188-189.
16. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д. Глубокие уровни молибдена в кремнии. // Фотоэнергетикада наноструктуралари яримўтказгич материаллар. Халқаро илмий анжуман. 2020-йил. 9-10 октябрь. С. 427-430.
17. Далиев Ш.Х., Палуанова А.Д., Эргашев Ж. А., Влияние молибдена на генерационные характеристики кремниевых структур. // V Международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро и наноструктурах. Фергана 2020. 13-14 ноябрь. С. 372-374.
18. Палуанова А.Д., Энергетический спектр дефектных центров в кремнии, легированном молибденом. // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг I республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-I) материаллар, Тошкент 2021. 21-апрел, 58-61 бб.
19. Daliev Sh. Kh, Paluanova A. D., Influence of associated states of oxygen on ir absorption in silicon doped with molybdenum. // Materials of VII International scientific-practical conference structural relaxation in solids. May 25-27,2021 Vinnytsia, Ukraine. pp: 89-91.
20. Ш.Х.Далиев, А.Д. Палуанова., Влияние пассивных примесей на дефектообразование в кремнии с вольфрамом. // Материалы международной научной конференции. Тенденции развития физики конденсированных сред. ФарДУ. Фергана-2021. С.253-255.
21. Ш.Х.Далиев, А.Д. Палуанова Роль степени совершенства кристаллической структуры на формирование дефектных центров

тугоплавких элементов в кремнии. // Физика фанининг техника соҳасидаги тутган ўрни. Республика илмий-амалий конференция материаллари. 2021 йил 28-май, Нукус. С.21-22/

22. Ш.Х.Далиев, К.А. Исмаилов, А.Д. Палуанова, Х.Ю.Утемуратова, Ш.А. Исмойлов, Ж.А. Эргашев. Влияние степени совершенства поверхности кремнии на формирование дефектных центров тугоплавких элементов. // «Яримўтказгичлар физикаси, микро ва наноэлектрониканинг фундаментал ва амалий муаммолари» I-халқаро анжуман. Тошкент 2021-йил, 28-29 октябрь, С.154-155.

23. Ш.Х.Далиев, К.А. Исмаилов, А.Д. Палуанова, Х.Ю.Утемуратова, Ш.А. Исмойлов, Ж.А. Эргашев. Фотопроводимость в кремнии, легированном молибденом, цирконием и гафнием. // Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике, материалы II-международной конференции. ТГТУ. Ташкент-2021. 18-19 ноябрь, С. 114-116.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида
тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини
мослиги текширилди (05.01.2022 йил)

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

Шартли босма табағи:3,25. Адади 60. Буюртма №27.

Гувоҳнома reestr № 10-4434

Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти
босмахонасида чоп этилган.

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

