

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.ҒМ/Т.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

ДАЛИЕВ ХОЖАКБАР СУЛТАНОВИЧ

**НОАНЪАНАВИЙ КИРИНДИЛАР БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙ
ВА УНИНГ АСОСИДАГИ КЎПҚАТЛАМЛИ СТРУКТУРАЛАРДАГИ
НОМУВОЗАНАТЛИ ЖАРАЁНЛАР**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2017

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Далиев Хожакбар Султанович

Ноанъанавий кириндилар билан легирланган кремний ва унинг
асосидаги кўпқатламли структуралардаги номувозанатли жараёнлар 3

Далиев Хожакбар Султанович

Неравновесные процессы в кремнии, легированном нетрадиционными
примесями и многослойных структурах на его основе. 23

Daliev Khojakbar Sultanovich

Nonequilibrium processes in silicon, doped by nontraditional impurities and
multilayered structures on its basis 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 49

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.ҒМ/Т.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

ДАЛИЕВ ХОЖАКБАР СУЛТАНОВИЧ

**НОАНЪАНАВИЙ КИРИНДИЛАР БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙ
ВА УНИНГ АСОСИДАГИ КЎПҚАТЛАМЛИ СТРУКТУРАЛАРДАГИ
НОМУВОЗАНАТЛИ ЖАРАЁНЛАР**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2017

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий Аттестация комиссиясида В2017.1.DSc/FM37 рақам билан рўйхатга олинган

Диссертация Мирзо Улугбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетида бажарилган.

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

Илмий маслаҳатчи: **Зайнабидинов Сирожиддин**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Арипов Хайрулла Кабилович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Зикриллаев Нурулла Фатхуллаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Камалов Амангелди Базарбаевич
физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот: Фарғона политехника институти

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети хузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2017 йил «__» _____ соат__ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: lutr@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91.

Диссертация автореферати 2017 йил «__» _____ кунни тарқатилди.
(2017 йил «__» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

С.Л. Лутпуллаев
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., профессор

С.А. Бахрамов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (докторлик диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда, бугунги кунда жадал ривожланаётган нано ва оптоэлектроника йўналишида, бистабил хусусиятга эга бўлган ва узиб-уловчи қурилмаларда қўллашга мўлжалланган яримўтказгичли асбобларда ишлатилувчи кристалларнинг хажми бўйича биржинслилиги ва уларнинг ишчи характеристикаларини аниқловчи киришмаларнинг жойлашиши, айниқса чуқур сатҳли, ўтиш ва ноёб элементлар билан легирланган яримўтказгичлар параметрларини бошқариш, кремнийли кўпқатламли структураларда хажмий ва юза сирти нуқсонларини аниқлаш учун янги сиғимли спектроскопия усулларини ишлаб чиқиш муҳим муаммолардан бири ҳисоблади.

Мустақиллик йилларида мамлакатимиз олимлари томонидан чуқур энергетик сатҳлар ҳосил қилувчи киришмалар билан яримўтказгичларни легирлаш орқали янги синф материалларини олишга оид кенг қамровли чоратадбирлар амалга оширилиб, муайян натижаларга эришилди. Бу борада кремнийга ўтиш металларида марганец, никель ва ноёб металлларни диффузия қилишнинг янги усуллари яратилиб, нанокластерли материалларни ҳосил қилиш технологиясини мукамаллаштириш, кремний асосида ўтиш металлари билан легирланган фотосезгир ва магнит майдонига сезгир структуралар олиш технологияларини яратишни алоҳида таъкидлаш мумкин.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси асосида яримўтказгичлар физикаси соҳасидаги назарий ва амалий изланишлар натижасида инновацион технологияларни жорий этиш орқали наноэлектроника соҳасининг самарадорлигини ошириш муҳим аҳамиятга эга.

Ҳозирги кунда жаҳонда яримўтказгичли асбобларнинг электрик параметрларини қайд қилинувчанлигини, ишлаш муддатини ва барқарорлигини ошириш йўллари аниқлашда анъанавий бўлмаган киришмалар билан легирланган кремнийда номувозанат ҳолатларни ўрганиш муҳим аҳамият касб этмоқда. Бу борада, жумладан кремнийдаги ноанъанавий киришмаларнинг ўзаро ва назоратсиз киришмалар билан таъсири жараёнларини ўрганиш; ноанъанавий киришмалар билан легирланган кремнийнинг оптик ва электрофизик хусусиятларини текшириш; кремнийни ўстириш жараёнидаги киришмалар (кислород ва углерод) билан ноанъанавий киришмаларнинг ўзаро таъсирини ўрганиш; Si-SiO₂ ўтиш чегарасида ва уларнинг бўлиниш чегарасида, яримўтказгичда, диэлектрик хажмида содир бўлувчи физик жараёнларни тадқиқ қилиш; металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) туридаги кремнийли кўпқатламли структуралар ва кремнийнинг хусусиятларига ташқи омилларнинг таъсирини ўрганиш; кремнийли МДЯ-структуралар хусусиятига ванадий ва никель, гадолиний ва самарий – чуқур киришмаларнинг таъсирини ўрганиш каби йўналишларда мақсадли илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Мазкур йўналишларда олиб борилаётган илмий-тадқиқот ишлари ушбу диссертация мавзусининг долзарблигини изоҳлайди.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ-1442–сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг асосий устувор йўналишларига боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши»нинг устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи¹.

Опто ва микроэлектроника соҳасидаги илмий изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан Цинциннати ва Калифорния университетлари, Intel фирмаси, Yale University (АҚШ), Philips Semiconductors, SGS-Thomson фирмалари, терабитли кристаллар олиш устида изланишлар Цукуба долзарб технологиялар марказида (Япония), нанотрубкалар асосида транзисторлар яратиш Юқори техника мактабида (Нидерландия), наноструктуралар физикаси Санкт-Петербургнинг Физика-техника институтида, микро ва наноэлектроника структуралар олиш технологияси «Полюс» илмий ишлаб чиқариш корхонаси (Россия) томонидан олиб борилмоқда.

Янги наноструктуралар ноёб элементлар билан легирланган яримўтказгичли материалларни олиш ва улар асосидаги структураларни ўрганишга оид жаҳонда олиб борилган илмий-тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан қуйидаги илмий натижалар олинган: кремнийли ноёб элемент эрбий (Er) ионлари таркибли илк бор ёғду диодлари олинган (Yale University, АҚШ); кристаллар решеткасига ноёб ер элементлари киритилган структуралар ишлаб чиқилган Женева (Швейцария) ва Лунд университетлари (Швеция); эрбийли марказларнинг структураси ўрганилган (Nation institute for materials science Yokohama (Япония)); экологик назорат қилиш системалари учун асбоблар яратилган (Japan atomic energy research institute); нанокиришмалар юқори магнито қаршиликли структуралар ва термодатчиклар технологияси яратилган (Тошкент давлат техника университети), кичик ўлчамли юқори хароратли ўтаўтказувчан структуралар назарияси ривожлантирилган (Ядро физикаси институти (Ўзбекистон)).

Дунёда легирланган кремний ва унинг асосидаги кўпқатламли структураларни такомиллаштириш бўйича қуйидаги қатор устивор

¹Диссертациянинг мавзуси бўйича халқаро илмий-тадқиқотлар шарҳи Holmium-related luminescence in crystalline silicon // Materials Science Engineering, V.B81, p.176-178 (2001) ва бошқа манбалар асосида бажарилган.

йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда, жумладан: марганец билан легирланган магнит майдонига сезгир структуралар ишлаб чиқиш; чуқур сатҳли никелни кремнийга диффузия қилиш жараёнларини ривожлантириш; ҳароратни ва бошқа параметрларни диагностикалашда қўлланиладиган функционал характеристикалари яхшиланган нанокластерли яримўтказгичли материаллар асосида ҳарорат датчикларини ишлаб чиқиш, фазалараро чегарадаги икки ўлчамли қатламларда содир бўладиган квантли ва нано ўлчамли эффектларни ўрганиш ва ҳ.к.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунга қадар чуқур сатҳларнинг параметрлари, хусусан, никель, ванадий ва ноёб ер элементларнинг параметрлари Weber E.R, Lemke J. (Германия) томонидан ўрганилган, Америкалик олимлар A.Stesman, B.Nouwen томонидан МДЯ-структураларнинг ҳарорат хусусиятлари, E.H.Snow, B.E.Deal томонидан МДЯ-структураларнинг электрофизик хусусиятлари, жумладан, Si-SiO₂ чегара қисмидаги нуқсонлар устида A.Stirling ва C.Charker тадқиқот олиб боришган.

Классик киришмалардан фарқли ўтиш элементлари билан легирлаш кремний асосидаги яримўтказгичли структуралар параметрларини яхшилаш мумкинлиги М.Бахадирханов, С.З.Зайнабидинов, К.П.Абдурахманов ишларида кўрсатилган. Қатор ноёб ер элементларининг диффузион параметрлари Д.Э.Назиров томонидан ўрганилган. С.И.Власов, П.Б.Парчинский томонида МДЯ-структуралардаги физик жараёнларга ташқи омилларнинг таъсири тадқиқ қилинган.

R.J.Kregler, S.R.Hofstein, H.B.Румак томонидан МДЯ-структураларнинг электрофизик хусусиятлари, асосан, оксидлаш, фотолитография, металл ўтказиш, сақлаш, куйдириш ва бошқа кимёвий ишлов бериш технологик операцияларини ўтказиш жараёнида тасодифан кириб қолувчи, базовий кристалда етарли микдордаги ҳар хил назоратсиз киришмалар мавжудлиги аниқланди. МДЯ-структуралар асосидаги микросхемалар ишчи параметрларининг стабиллиги чуқур сатҳли киришмалар борлиги билан боғлиқ.

Лекин киришмаларнинг нуқсонлар билан ўзаро таъсирлашуви масалалари ва яримўтказгичли асбобларнинг параметрларини стабиллаштириш учун МДЯ-структураларни чуқур сатҳли киришмалар билан легирлаш имкониятларини очиш, мураккаб затвор ости диэлектрикларини барпо қилиш йўллари ҳамда МДЯ-структураларнинг зарядли ҳолатларини аниқловчи киришма заррачаларининг таъсир қилиш механизмлари, яримўтказгичли структураларнинг барқарорлигини ошириш масалалари ўрганилмай қоляпти.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти грантлар тематик режаларига биноан ОТ-Ф2-081 «Таркибида киришма-нуқсонли ассоциатлар бўлган кремний монокристаллидаги нуқсонларнинг ҳосил бўлиш қонуниятларини ва яримўтказгич диэлектрик беркирилган бўлиниш чегарасида ҳосил бўлган динамик жараёнларни ўрганиш» (2007–2011 йй.), А-3-116+А-4-30 «Радиацияга юқори барқарор легирланган кремний ва кремнийли диод структураларни олиш технологиясини ҳамда

кремнийли қуёш элементларининг фотосезгирлигини ошириш усулларини ишлаб чиқиш» (2015-2017йй.) мавзусидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади ўтиш ва ноёб ер элементлар яъни ноанъанавий киришмалар билан легирланган кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиши жараёнлари ҳамда бу киришмаларнинг кремнийли МДЯ-структуралар хусусиятига таъсирини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари: кремнийли кўпқатламли структураларда ҳажмий ва юза сирти нуқсонларни аниқлаш учун ностационар сиғимли спектроскопия усулларини ишлаб чиқиш;

ноанъанавий киришмалар билан легирланган кремнийнинг оптик ва электрофизик хусусиятларини текшириш;

кремнийни ўстириш жараёнидаги киришмалар (кислород ва углерод) билан ноанъанавий киришмаларнинг ўзаро таъсирини ўрганиш;

диэлектрик ва яримўтказгич ҳажмида, уларнинг бўлиниш чегарасида ва Si-SiO₂ ўтиш қатламида содир бўлувчи физик жараёнларни тадқиқ қилиш;

МДЯ туридаги кремнийли кўпқатламли структуралар ва кремнийнинг хусусиятларига ташқи омилларнинг (нурланиш, ҳароратнинг ва б.) таъсирини ўрганиш;

кремнийли МДЯ-структуралар хусусиятига V, Ni, Gd ва Sm – баъзи бир чуқур киришмаларнинг таъсирини тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ноанъанавий киришмалар билан легирланган кремний ва унинг асосидаги МДЯ-структуралар олинган.

Тадқиқотнинг предмети ноанъанавий киришмаларнинг ўзаро ва назоратсиз киришмалар билан таъсир жараёнлари ҳамда МДЯ-структураларнинг диэлектрик ва яримўтказгич ҳажмида, уларнинг бўлиниш чегарасида ва Si-SiO₂ ўтиш қатламидаги электрон жараёнлар ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари сифатида қўйилган масалаларни ечиш учун фотосиғим, фотоўтказувчанлик ва инфрақизил спектроскопия, ностационар сиғимли чуқур сатҳлар спектроскопияси (DLTS) усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги: металл-диэлектрик-яримўтказгич (МДЯ) структураларнинг параметрларини кам қийматларда N_{SS} юза ҳолатлари энергетик спектрини, МДЯ-структураларда ҳар хил электрон жараёнларнинг кинетикасини ҳамда диэлектрик ва яримўтказгич ҳажмида, уларнинг бўлиниш чегарасида ва Si-SiO₂ ўтиш қатламида электрик фаол нуқсонларнинг параметрларини юқори аниқликда ўзгармас сиғим (CC-DLTS) шароитида (ностационар сиғимли чуқур сатҳлар спектроскопияси) DLTS ёрдамида аниқлаш усули ишлаб чиқилган;

кремнийда ноанъанавий киришмалар чуқур сатҳи ҳосил бўлиши самарадорлигини аниқловчи асосий омилларни, жумладан тоблаш ҳарорати ва легирлангандан кейинги совутиш тезлигини ҳамда турлича паст ва юқори ҳароратларда Ni ёки V диффузияси коэффицентининг ошиши ва ўстиришда легирланган кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиши асосланган;

кремнийга киритиладиган ноанъанавий киришмаларнинг атомлари ўстириш киришмалари (кислород) билан ўзаро таъсирлашиб оптик фаол кислород концентрациясининг (10 дан 50% гача) камайишига, айнан кириш-

манинг турига қараб никель билан легирланган кремнийда оптик шаффофлиги йўқолиши тажрибада аниқланган;

γ-квантлари ва электронлар билан нурлантирилган кремнийли МДЯ-структураларда диэлектрикнинг ҳажмида янги радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиши, катта дозаларда уларнинг концентрациясининг ошиши, яримўтказгич юзасида стабил инверсион қатлам ҳосил бўлишига тўсқинлик қилувчи тирқишли ток ҳосил бўлишига олиб келиши уларнинг кремний юзасидан узоқдаги марказлар билан боғлиқлиги аниқланган;

майдоний электродда манфий ва мусбат кучланишли силжишларда ўтиб кетувчи нурланиш таъсирида МДЯ-структураларида, радиацион нуқсонлар стабил шароити ҳосил бўлишини таъминловчи, ҳар хил радиацион нуқсонларнинг жойлашиш ўрни ва параметрларини аниқлаш усули яратилган;

γ-квантлари ва электронлари таъсирида МДЯ-структураларнинг Si-SiO₂ ўтиш қатламида Si атоми билан эркин боғланишли шартланган ҳамда катодли сочилган SiO₂ структураларида, кремний ва кремний оксиди орасида кенглиги 0.6 нм атрофида SiO_x таркибли қатламда, эркин боғланишларнинг фазовий жойлашиш модели ишлаб чиқилган;

МДЯ-структураларда киритилган заряд ва диэлектрикнинг ҳажмий ҳолати 250°C ҳароратда, Si-SiO₂ чегара қисмида эса сиртий ҳолатлар 350°C ҳароратда, Si-SiO₂ ўтиш қатламидаги характерли радиацион нуқсонлар эса 400°C ҳароратда батамом термик куйдирилиши кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

кремнийни ноанъанавий киришмалар билан легирлашнинг оптимал шароитлари характеристикалари қайд қилинувчи ҳар хил аналогли, рақамли ва катта интеграл схемаларни ясашда ишлатилган;

нам кислород атмосферасига C₂HCl₃ трихлорэтиленнинг 5 ҳажмий процентини кўшиш йўли билан металл-диэлектрик-яримўтказгич туридаги кремнийли кўпқатламли структураларни тайёрлашнинг оптималлашган паст ҳароратли технологияси анъанавий технологияларга қараганда оксид қатламида жойлаштирилган заряди ва сиртий ҳолатлари зичлиги сезиларли кам бўлган структуралар олиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ишда ҳар битта сатҳ параметрларини ўлчаш имкониятига, энергия бўйича юқори аниқликка эга ва концентрация бўйича сезгирлиги юқори бўлган ностационар сиғимли чуқур сатҳлар спектроскопияси, фотоўтказувчанлик ва инфракизил спектроскопия усуллариининг қўллаш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқотда олинган натижаларининг илмий аҳамияти ноанъанавий киришмалар билан легирланган металл-диэлектрик-яримўтказгич туридаги кремнийли кўпқатламли структураларда кечаётган физик жараёнлар тўғрисидаги тушунчани кенгайтиришга имкон беради.

Ҳар хил нуқсонлар параметрларини диэлектрик ва яримўтказгич ҳажмида, уларнинг бўлиниш чегарасида ва Si-SiO₂ ўтиш қатламида ўзгармас сиғим (CC-DLTS) шароитида ностационар сиғимли чуқур сатҳлар спектроскопияси ёрдамида аниқлаш учун ишлатиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ўтиш ва ноёб ер элементлар яъни ноанъанавий киришмалар билан легирланган кремнийда нуқсонлар ҳосил бўлиши жараёнлари ҳамда бу киришмаларнинг кремнийли МДЯ-структуралар хусусиятига таъсирини тадқиқ қилиш асосида:

кремнийни термик оксидлашда куруқ кислород атмосферасига кам миқдордаги хлорни қўшиш йўли билан ишлаб чиқилган МДЯ-структураларни тайёрлаш технологияси «FOTON» акциядорлик жамиятида КП304А майдон транзисторини ишлаб чиқишда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 13 сентябрдаги 03-1862-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланиши анъанавий технологияларга нисбатан оксид қатламида жойлаштирилган заряди ва сиртий ҳолатлари зичлиги кам бўлган структуралар олиш имконини берган;

ионизацион нурланиш таъсирида оксид қатламда мусбат заряд ҳосил қилиш бўйича олинган натижалар «FOTON» акциядорлик жамиятида КП304А майдон транзисторларининг параметрларини барқарорлаштиришда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 13 сентябрдаги 03-1862-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланилиши заряд ташувчиларнинг инвертирланган каналда эффектив ҳаракатчанлик нурланиш таъсирида 4–5 баробарга камайиши КП304А майдон транзисторидаги зарядларнинг йиғилиши ва оқишини бошқариш орқали электрик параметрлари барқарорлигини ошириш имконини берган;

ишлаб чиқилган ўзгармас сиғим шароитида (CC-DLTS) ностационар сиғимли чуқур сатҳлар спектроскопияси ёрдамида диэлектрик ҳажмида, Si-SiO₂ ўтишида ва унинг чегара бўлимида, яримўтказгич ҳажмида ҳар хил нуқсонлар параметрларини айрим ҳолда аниқлаш усули Ф2-ФА-Ф121 «Бир жинсли бўлмаган микроҳолатларни шаклланиши ва уларни нейтронлар ёрдамида легирланган кремнийнинг гидрогенлаш пайтида фундаментал хоссаларига таъсири» мавзусидаги илмий грантида (Ядро физикаси институти) яримўтказгичли диодлар параметрларини барқарорлаштиришда ишлатилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 24 августдаги ФТА-01-01/555-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланиши нейтронлар ёрдамида легирланган кремнийда нобиржинсли микроқўндирилмаларнинг батамом шаклланишини ва уларни гидрогенизациялашган кремнийнинг фундаментал характеристикаларига таъсирини ўрганишга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 18 та халқаро ва 5 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 39 та илмий иш чоп этилган, шулардан 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 15 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, 65 та расм, 2 та жадвал ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 220 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, 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.

Диссертациянинг «**Ўтиш ва ноёб ер элементлари билан легирланган кремнийда ва унинг асосидаги асбобларда физик ҳодисалар тадқиқотининг ҳозирги замон ҳолати**» деб номланган биринчи бобида адабиётлар таҳлили келтирилган.

Кремнийда ноанъанавий киришмалар (ўтиш ва ноёб элементлар атоми) ҳосил қиладиган ҳар хил чуқур сатҳларнинг параметрлари тартиблаштирилган, уларнинг қисқача шарҳи берилган. МДЯ-структуралар хоссаларининг ҳозирги замон ҳолати шарҳланган. Si-SiO₂ системасида содир бўлувчи ҳодисалар батафсил кўриб чиқилган ва бу ҳодисалар, асосан, Si-SiO₂ чегара қисми ва диэлектрик ҳажмида зарядларнинг мавжудлиги билан аниқланиши тўғри-сида хулоса қилинган. МДЯ-структураларнинг хоссаларига термик ва термик майдоний ишловнинг, радиациянинг таъсирига бағишланган тадқиқотларнинг тажрибадаги натижалари келтирилган.

Бобнинг охирида легирланган кремний ва унинг асосидаги кўпқатламли структуралардаги физик жараёнларни тадқиқ қилишнинг ҳозирги замон муаммолари ва истиқболли йўналишлари таҳлил қилинган.

Диссертациянинг «**Кремний ва кремнийли кўп қатламли структура-лардаги ностационар сиғимли чуқур сатҳлар спектроскопиясининг хусусийлиги**» деб номланган иккинчи бобида яримўтказгичнинг ҳажмида ностационар сиғимли чуқур сатҳлар спектроскопия усули орқали чуқур сатҳларни аниқлашнинг назарий асослари тадқиқ қилинган. Юза ҳолатларининг зичлиги ва уларни тутиш кесими сиғимли усуллар асосида ётувчи тенгламалар келтирилган, асосий эътибор ўзгармас сиғим режимидаги DLTS усулига қаратилган. Фотосиғим ва DLTS спектрларидан чуқур сатҳларнинг параметрларини аниқлашнинг бир қанча усуллари кўрсатилган ва ҳисоб-китоб формулалари келтирилган.

МДЯ-структуралар учун ўзгармас сиғим режимидаги DLTS усулининг назарий асослари ривожлантирилган. СС-DLTS усулининг сезгирлиги ва аниқлигининг юқорилиги ($N_{SS} < 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$) кўрсатилган, бу сиртий ҳолат-лар зичлигининг энергетик спектри N_{SS} нинг кам қийматларини ҳамда диэлектрик ва яримўтказгич ҳажмида, уларнинг бўлиниш чегарасида ва Si-SiO₂ ўтиш қатламида ҳар бир электр фаол нуқсонларнинг параметрларини аниқлаш имконини беради.

Электронларнинг сатҳий ҳолатлардан қайта зарядланиш кинетикаси

кўриб чиқилган. Мисол тариқасида СС-DLTS спектри сиртий ҳолатларининг икки хил қайта зарядланиш режими келтирилган. $T=292\text{K}$ даги максимум сиртий ҳолатларнинг асосий бўлмаган ток ташувчилари орқали қайта зарядланиши билан тушунтирилади.

Параметрлари ўзгармайдиган ва талабга мос материаллар олиш имконини берувчи ноёб ер элементлари ҳамда баъзи бир ўтувчи элементлар билан легирлаш технологияси ва МДЯ-структураларнинг параметрларини СС-DLTS ёрдамида аниқлаш усуллари ишлаб чиқилган. СС-DLTS ёрдамида кремнийнинг тақиқланган зонаси бўйича сатҳли ҳолатлар энергетик жойлашишини ва уларни тутиш кесимини аниқлаш имконияти кўрсатилган.

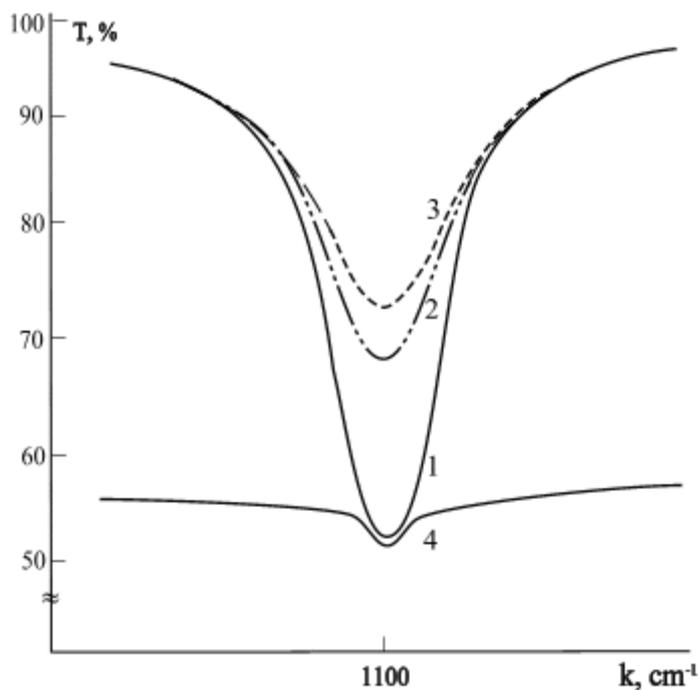
Нам кислород атмосферасида 5 ҳажмли процентда C_2HCl_3 трихлорэтилен буғларини кўшиш йўли билан металл-диэлектрик-яримўтказгич туридаги кремнийли кўпқатламли структуралар тайёрлаш технологияси оптималлаш-тирилган. Ҳароратни 900°C гача пасайтириш оксидда мустаҳкамланган зарядни ва сатҳли ҳолатларнинг анъанавий усулларга нисбатан кичик қийматларини олиш имкониятини бериши кўрсатилган.

Кремнийнинг сиртий ва ҳажмий нуқсонлари параметрларини ўлчаш учун DLTS қурилмаси ишлаб чиқилган. Ўзгармас сиғимда ва ўзгармас кучланиш режимида ишловчи автоматик универсал DLTS қурилманинг ишлаш методикаси ва схемаси таклиф қилинган. Қурилма кремнийни тақиқланган зонасининг юқори ва пастки ярмида сиртий ҳолатларнинг зичлигини, заряд ташувчиларнинг тутиш кесимини, SiO_2 даги силжимайдиган мусбат заряд ва ҳажмий ҳолатлар ҳамда Si ва Si-SiO₂ ўтиш қатламидаги нуқсонларнинг параметрларини аниқлашга имкон беради.

Диссертациянинг «**Ноанъанавий киришмалар билан легирланган кремнийда физик жараёнлар**» деб номланган учинчи бобида ўтиш металлари ва ноёб элементлар билан легирланган кремнийда физик жараёнларни фотосиғим ва DLTS усуллари ёрдамида тадқиқ этиш натижалари келтирилган.

Физик жараёнларни Si<V>да фотосиғим ва DLTS усуллари ёрдамида комплекс тадқиқ этиш натижасида Vни кремнийга диффузион киритиш заряд ташувчиларнинг тутиш кесими $\sigma_n = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$, $6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$, $2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ва $2.5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ бўлган ионизацияланиш энергияси ўзгармас тўртта чуқур сатҳ $E_c - 0.22 \text{ эВ}$, $E_c - 0.45 \text{ эВ}$, $E_c - 0.52 \text{ эВ}$ и $E_v + 0.41 \text{ эВ}$ ҳосил бўлишига олиб келиши аниқланган. Si<V> намуналарда чуқур сатҳлар ҳосил бўлиш самарадорлиги ванадийни киритишнинг технологик режимларига боғлиқ бўлиб, диффузия ҳароратининг ошиши ва диффузиядан сўнг намунани совутиш тезлигини ошиши самарадорликни оширади.

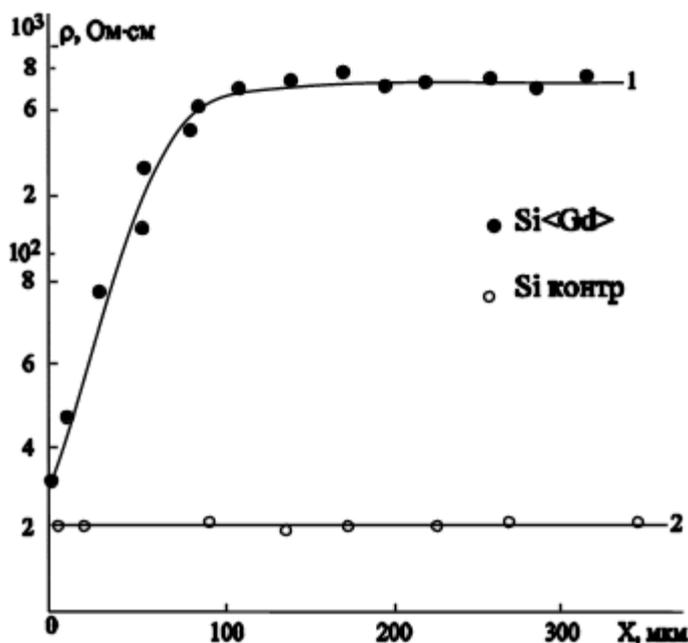
Диффузия вақтида ва ўстириш жараёнида қотишмадан Ni билан легирланган Si да номувозанат жараёнлар тадқиқ қилинган. Ni ни диффузия усулида киритилгандан кейин n-Si<Ni>_{диф} намуналарда параметрлари $E_c - 0.19 \text{ эВ}$, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ва $E_c - 0.41 \text{ эВ}$, $\sigma_n = 6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ бўлган чуқур сатҳлар аниқланган, p-Si<Ni>_{диф} намуналарда эса $E_v + 0.20 \text{ эВ}$, $\sigma_p = 7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ва $E_v + 0.41 \text{ эВ}$, $\sigma_p = 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ чуқур сатҳлар кузатилади. $E_c - 0.19 \text{ эВ}$ ва $E_v + 0.41 \text{ эВ}$



1- кремний назорат намунаси;
 $T_{\text{диф}}$: 2 - 1000°C, 3 - 1100°C, 4 - 1200°C,
1-расм. Диффузия усулида Ni билан легирланган Si намуналарида ИҚ- ютилиш спектрлари

чуқур сатҳлар (Ni сиз) термик ишлов берилган намуналарда кузатилди, $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle_{\text{диф}}$ да уларнинг концентрацияси нисбатан кам. Яъни $E_c - 0.41$ эВ и $E_v + 0.20$ эВ сатҳларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги технологик режимларга ($T_{\text{диф}}$ и $V_{\text{охл}}$) боғлиқ, $T_{\text{диф}}$ ва $V_{\text{охл}}$ лар ошиши билан уларнинг концентрацияси ошиб бориши кузатилган. Ni билан диффузия усулида легирланган Si намуналарининг ИҚ ютилиш спектрларини ўлчаш (1-расм), Ni атомларининг Si ҳажмида мавжудлиги кислород пики интенсивлигининг сезиларли камайишига олиб келади.

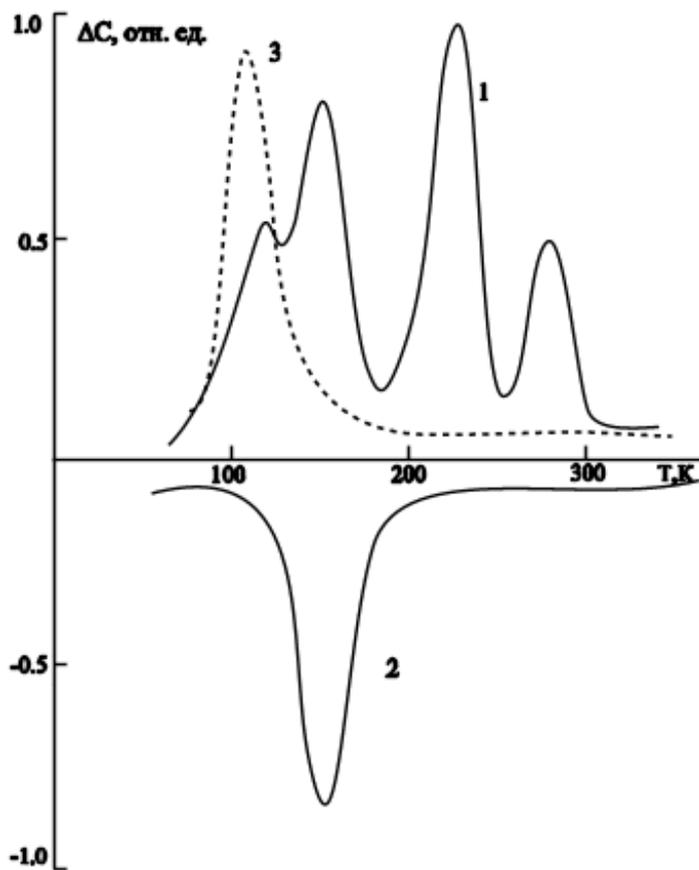
Бунда кузатилаётган эффект киритилган Ni концентрациясига боғлиқ бўлиб, қанчалик N_{Ni} кўп бўлса, шунчалик $N_0^{\text{опт}}$ камайиши кўпроқ кузатилади. Кремнийга никелни диффузия усулида киритиш ва тез совутиш натижасида $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ намуналар оптик шаффофлигининг ёмонлашишига, ҳатто, шаффофлиги йўқолишигача олиб келиши топилган. Бу эффект секин совутилган намуналарда эса кузатилмайди.



2-расм. Si<Gd> (1) ва назорат (2) намуналарида солиштирма қаршиликнинг қалинлик бўйича тақсимоти

Хулоса қилиш мумкинки, Si га Ni киритилганда, аниқроғи, Ni ва O атомлари қатнашиши билан электронейтрал ва оптик фаол бўлмаган комплекслар ҳосил бўлади.

Диффузия йўли билан киритилган Gd ва Sm атомларининг табиатини ўрганиш натижасида $\text{Si}\langle\text{Gd}\rangle$ намуналарида солиштирма қаршиликнинг тақсимланиш erfc -функция билан ифодаланмаслиги ва иккита тармоқдан иборатлиги аниқланган (2-расм).



3-расм. n-Si<Gd> (1), p-Si<Gd> (2) ва назорат намуналарининг (3) DLTS спектри

тутиш кесими $\sigma_p=2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ бўлган фақат битта $E_v+0.32 \text{ эВ}$ чуқур сатҳ кузатилади (3-расм).

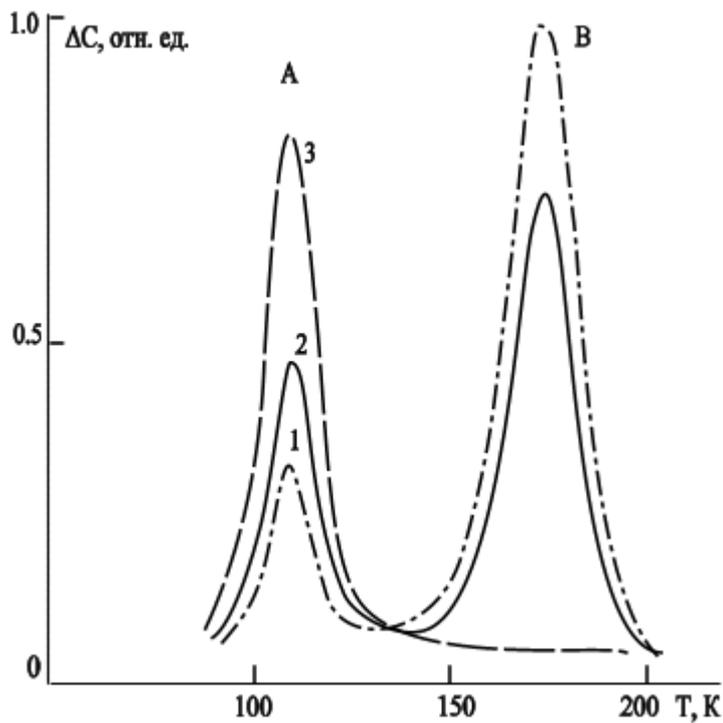
Кремнийни самарий билан легирлаганда ионизацияланиш энергияси $E_c-0.23 \text{ эВ}$, $E_c-0.39 \text{ эВ}$, $E_v+0.21 \text{ эВ}$, $E_v+0.29 \text{ эВ}$ бўлган чуқур сатҳлар ҳосил бўлади (4-расм). Фақат $E_c-0.39 \text{ эВ}$ и $E_v+0.29 \text{ эВ}$ чуқур сатҳлар ҳосил бўлишининг самарадорлиги Sm миқдори билан мос тушади. $E_c-0.23 \text{ эВ}$ сатҳ Si<Gd> ҳамда Si<Sm> намуналарида, кўринишидан термик нуқсонга ўхшайди, чунки у термик ишлов берилган назорат намунада ҳам кузатиляпти, бунда чуқур сатҳлар концентрацияси Si<Gd> ёки Si<Sm> га қараганда 1÷1.5 даража кўп. Ноёб ер элементлари билан легирланган n-Si да Gd ёки Sm таркиби ва термик ишлов ҳароратини ошиши билан $E_c-0.23 \text{ эВ}$ сатҳнинг концентрацияси камайишини Si да Gd ёки Sm атомлари мавжудлиги ҳисобига термик нуқсонлар ҳосил бўлишининг самарадорлигини камайиши билан тушунтириш мумкин.

Ноёб ер элементлари киришмаси мавжуд Si нинг инфрақизил спектроскопияси шуни кўрсатдики, назорат намуналар учун тугунлараро кислороднинг ($N_o^{\text{опт}}$) оптик фаол концентрацияси амалда ўзгармайди, ҳолбуки, Gd билан легирланган намуналар учун $N_o^{\text{опт}}$ концентрацияси 20% га камаяди, Sm билан легирланган намуналар учун эса $N_o^{\text{опт}}$ концентрациясининг камайиши 10–12% ни ташкил қилади.

Бошида ~ 50 мкм чуқурликгача 1,5÷2 даражага ρ нинг кескин ўсиши кузатилади, кейинчалик ρ стабиллашади ва чуқурлик бўйича сезиларли ўзгариш кузатилмайди. Назорат намуналарда эса чуқурлик бўйича ρ ўзгармади.

Сигимли спектроскопия ёрдамида ўлчашлар шуни кўрсатдики, Gd билан легирланган кремнийда заряд ташувчиларнинг тутиш кесими $\sigma_n=4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_n=2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_n=1.1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ва $\sigma_n=1.5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ тенг бўлган ионизацияланиш энергияси ўзгармас тўрта чуқур сатҳ $E_c-0.23 \text{ эВ}$, $E_c-0.35 \text{ эВ}$, $E_c-0.41 \text{ эВ}$ ва $E_c-0.54 \text{ эВ}$ ҳосил бўлади.

p-Si<Gd> намуналарида тақиқланган зонанинг пастки қисмида заряд ташувчиларнинг



1-1100°Сда диффузия усулида легирланган,
2 - 1200°С да ва 3 - назорат намунаси

4-расм. Si<Sm> намуналарининг DLTS спектри

ларининг юқори ҳароратли термик ишлов жараёнида фаоллашиши билан боғлиқ бўлиб, кўринишидан ноёб ер элементларининг кислород билан комплексини бузишга олиб келади, натижада, эҳтимол, N_o^{opt} ошади ва Sm атомлари билан боғлиқ чуқур сатҳлар ҳосил бўлади. Gd атомлари юқори ҳароратли иссиқлик ишловда фаоллашмайди, бу Gd атомлари прецепитатларининг алоқа энергияси юқори-лиги билан боғлиқ.

Ноёб ер элементи киришмалари билан легирланган Si да радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиши ўрганилиб, Si да Sm ва Gd атомларининг борлиги радиацион нуқсонларнинг ҳосил бўлиш жараёнини секинлашишига олиб келиши, яъни А– ва Е–марказларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги оддий кремнийга нисбатан 1÷1.5 даража паст бўлиши аниқланган. Таъкидлаш лозимки, Si<Sm> намуналарига нисбатан Si<Gd> намуналарида А–марказлар ва Е–марказлар бир қанча кам. Бунда ноёб ер элементларининг концентрацияси қанчалик кам бўлса, радиацион нуқсонлар концентрацияси ҳам шунчалик кам бўлади. Бу эффектлар кремнийда ноёб ер элементлари атомларининг радиацион нуқсонлар билан ўзаро таъсирининг ўзига ҳослиги билан боғлиқ.

Диссертациянинг тўртинчи бобида «**Кремнийли МДЯ-структуралар ва МОЯ-транзисторларда номувозанатли жараёнлар**» СС-DLTS ва ЮЧ ВФХ усуллари ёрдамида ўрганилган.

МДЯ-структураларни γ -квантлар билан нурлантириш Si-SiO₂ чегара қисмида Cl ва OH ионлари билан уч валентли кремний боғланишининг узилиши ҳисобига юза ҳолатларининг кўпайишига ва оксидда жойлаштирилган мусбат заряднинг ҳосил бўлишига олиб келади.

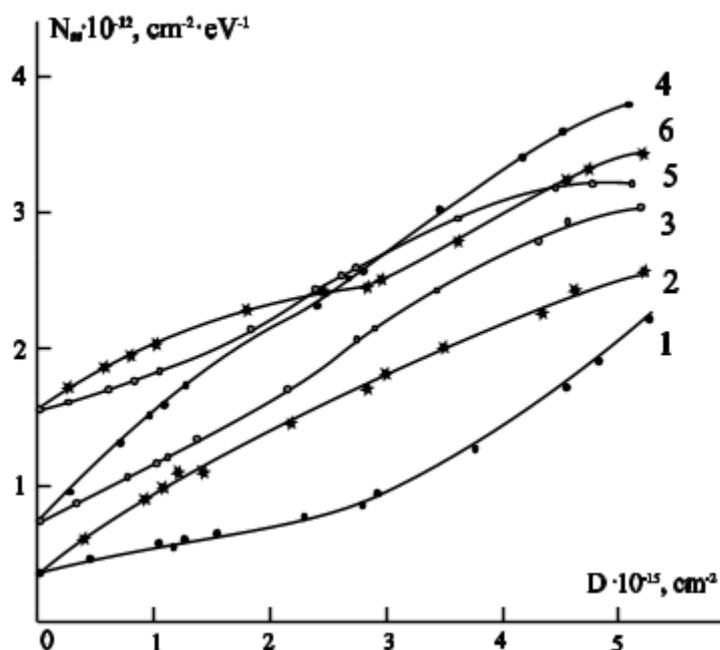
900÷1250°С интервалида юқори ҳарорат термик ишлови Si ўстириш жараёнида киритилган ноёб ер элементлари атомини фаоллаштиради. Si<Sm> намуналарида электронларнинг тутиш кесими $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-17}$ ва $\sigma_n = 1.2 \cdot 10^{-15}$ см² тенг бўлган чуқур $E_c - 0.23$ эВ ва $E_c - 0.39$ эВ сатҳ топилган. Бунда бу сатҳларнинг ҳосил бўлиш эффективлиги ноёб ер элементлари киришмасининг миқдорига боғлиқ, бир пайтда текшириляётган намуналарнинг юқори ҳароратдаги термик ишлови N_o^{opt} нинг ошишига олиб келади.

Бу эффект эҳтимол, ноёб элементлар киришмаси атом-

Кремнийли МДЯ-структураларни нурлантирилганда Si-SiO₂ чегара қисмида ва диэлектрикнинг ҳажмида радиацион нуқсонлар ҳосил бўлади, уларнинг концентрацияси кўпайганда катта дозаларда яримўтказгич юзасида стабил инверсион қатлам ҳосил бўлишига тўсқинлик қилувчи тирқишли ток ҳосил бўлишига олиб келиши аниқланган.

МДЯ-структураларнинг параметрларига, унинг майдоний электродида силжишли ва силжисиз ҳолатларда γ -нурлантиришнинг таъсири ўрганилган ва майдоний электродда силжишнинг борлиги ёки унинг кутбидан катъи назар нурлантириш вақтида диэлектрикда марказларнинг генерацияланиши ва ионланишига кам таъсир қилиши топилган, лекин мусбат кучланиш силжишда эса сатҳ ҳолатларининг зичлиги кремнийнинг тақиқланган зонаси ўртасига яқин жойда нисбатан тез ўсади (5-расм).

Қайд қилиш керакки, структурларни силжиш кучланишисиз нурлантирилганда тажрибада берилганларининг катта фарқланиши кузатилади, бу оксиддаги жойлаштирилган зарядларнинг флукутацияси билан боғлиқ.



СС-DLTS спектрларидан ҳар хил ҳарорат ва уларга тўғри келувчи юза ҳолати E_t ўртача ионизацияланиш энергиясида ҳисобланган: Т, К (E_t , эВ): 1,2– 250 (0.44); 3,4 – 150 (0.24); 5,6–80 (0.09). $V_{см}$, В: 1,3,5 – -10; 2,4,6 – +10

5-расм. Юза ҳолати зичлиги N_{SS} нинг мусбат ва манфий силжитиш кучланиши $V_{см}$ да D га боғлиқлиги

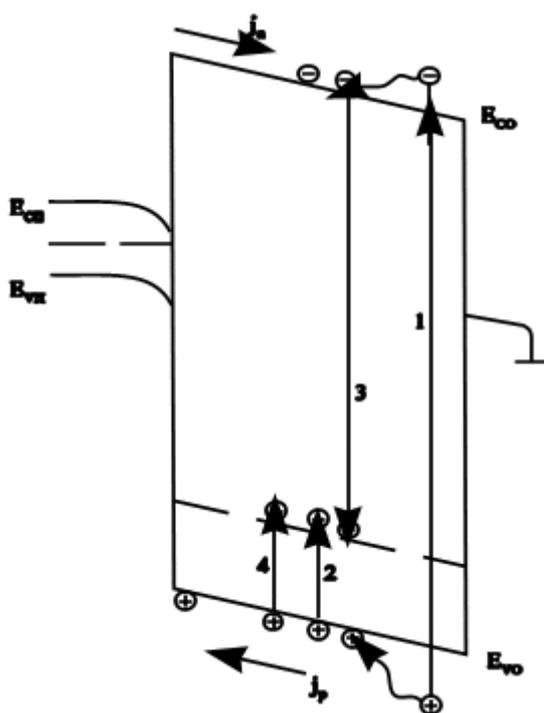
Юқори энергияли тормозли γ -нурланиш билан нурлантирилган МНОЯ-структуранинг диэлектрик қатламида зарядлар йиғилишига жавобгар асосий физик жараёнларни МНОЯ-структуранинг хусусийлигини ҳисобга олиб (6-расм), ⁶⁰Со γ -квантлари билан нурлантирилган металл-оксид-яримўтказгич структуралар учун ривожлантирилган генерация-рекомбинация модели

$V \neq 0$ бўлганда нурлантириш радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиш шароитларини стабиллаштиради ва уларнинг дозага боғлиқлигини аниқлашга имкон беради. 30 МэВ тормозланиш спектрида максимал энергияли γ -квантларда юқори энергетик тормозли γ -нурлари билан нурлантирилган металл-нитрид-оксид-яримўтказгич туридаги структураларнинг юқори частотали С-V-характеристикалари илк бор ўлчанган МНОЯ-структуранинг зоналар яссилиги кучланиши ва бўсага кучланишининг тормозли γ -нурланишнинг юқори энергетик энергия ташиш катталигига боғлиқлиги олинган.

билан тавсифлаш мумкинлиги кўрсатилган. ^{60}Co γ -квантлари билан нурлантирилган ва юқори энергетик тормозли γ -нурланиш таъсири қилинган МНОЯ-структуралар учун SiO_2 чегара бўлимида энергия нурланишининг бир хил қийматида бир бирига нисбатан силжитилган $\Delta V_{\text{FB}}(F)$ ва $\Delta V_{\text{MG}}(F)$ боғлиқлиги ўрнатилган.

^{60}Co γ -квантлар ва юқори энергетик тормозли γ -нурлантиришни КП304А туридаги МОЯ транзистори параметрларига таъсири тадқиқ қилинган. ^{60}Co γ -квантлари билан нурлантириш бўсаға кучланишини ва Si-SiO_2 чегара бўлимида сатҳ ҳолатларни юқори энергетик тормозли γ -нурлантириш таъсирига нисбатан катта ўзгаришига олиб келади, бу оксид қатламда ютилган доза қийматининг фарқи билан боғлиқ. Бу ўз навбатида нурланиш билан генерацияланган рекомбинациядан холис электрон-кавак жуфтларининг ҳар хил сонига олиб келади.

Илк бор МОЯ-транзисторларнинг инвертирланган каналидаги заряд ташувчиларининг эффектив ҳаракатчанлигига, юқори энергетик тормозли



- 1-электрон-каваклар жуфтлиги генерацияси;
- 2-тутқичларга кавакларнинг илиниши;
- 3-кавак ва электронларнинг рекомбинацияси;
- 4-кавакларнинг термализацияси

6-расм. Зарядларнинг йиғилиши ва ёйилиши жараёнларини тушунтирувчи МОЯ-транзисторнинг энергетик зона диаграммаси

чегарасида зўриққан алоқаларнинг узилиши билан боғлиқ спектрда локал максимумнинг $E_c - 0.18$ эВ пайдо бўлиши нурланишнинг $F = 7.5 \cdot 10^3$ Дж/см² энергия ташилишида ҳамма спектрлар билан мос тушади.

Юқори энергетик тормозли γ -нурланиши таъсир қилинган МОЯ-транзисторларнинг бўсағасида ўтиш вольт-ампер характеристикаларини тадқиқ қилиш шуни кўрсатдики, сиртий ҳолатлар куйдиришдан кейин ҳамма

γ -нурлантиришни бўсаға кучланишига ва ток характеристикаларига таъсири тадқиқ қилинган.

Нурланиш энергияси ўтишининг ошиши билан V_{MG} катта манфий кучланишлар қиймати томонига силжиши ва бу ҳолат оксид қатламида мусбат зарядлар ҳосил бўлиши билан боғлиқлиги аниқланган. Инвертирланган каналдаги заряд ташувчиларининг эффектив ҳаракатчанлиги нурлантириш ошиши билан 4÷5 марта камайиши кўрсатилган.

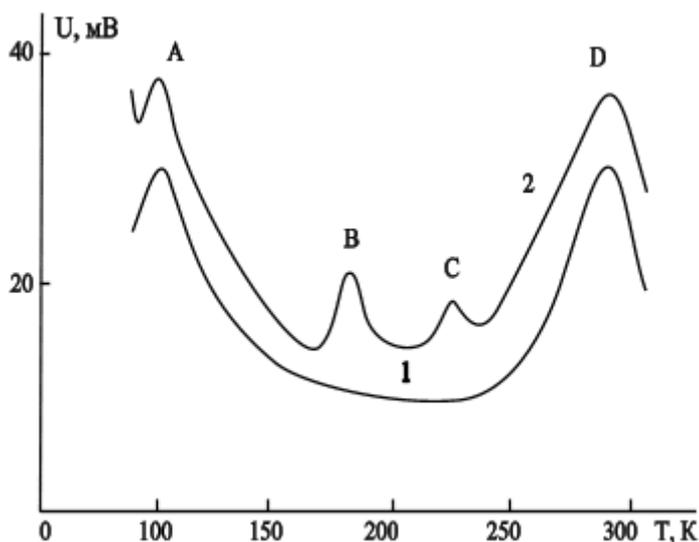
МОЯ-транзисторни юқори энергетик тормозли γ -нурланиш билан куйдириш Si-SiO_2 чегара қисмидаги сатҳ ҳолатларининг ҳамма энергетик спектрларини кўтарилишга олиб келиши тажрибада аниқланган ва Si-SiO_2

текширилган тақиқланган зона энергиялари диапазонида ўзини номонотон тутади. $T_{отж}=150\div 170$ °C ҳароратгача куйдириш сиртий ҳолатларнинг ошишига, $210\div 220$ °C дан сўнг эса уларнинг камайишига олиб келади. Бу жараёнларни диффузион-дрейфли механизм билан тушунтириш мумкин.

Тормозли нурланиш таъсири ўтказилган МОЯ-транзисторларни изохрон тоблаганда бўсаға кучланиши ва сиртий ҳолатлар $T_{отж}=350\div 360$ Cдан кейин ўз аввалги ҳолатига қайтиши тажрибада аниқланган.

МОЯ-транзисторларнинг ва МНОЯ-структураларнинг характеристикаларига иссиқлик майдони орқали ишлов берилганда (ИМОИБ) паст ҳароратли изохрон ҳамда изотермик куйдиришнинг таъсири тадқиқ қилинган ва дастлаб юқори энергетик тормозли γ -нурланиш билан нурлантирилган МОЯ-транзисторларни секин совутиш билан 360 °C да 30 минут давомида термик ишлов бериш кремнийнинг тақиқланган зонаси кенглиги бўйича сиртий ҳолатларни $1\div 1.5$ даражага камайириши аниқланган ҳамда нурлантирилмаганларни 300 °C да ва $V_G=10$ V да ИМОИБ қилиш V_{MG} кучланишининг $10\text{--}15\%$ га камайишига олиб келади.

Ванадий, никель ва гадолийнинг ва самарийнинг Si-SiO₂ чегара қисми ва ҳажм хоссаларига таъсири СС-DLTS ва ЮЧ ВФХ ёрдамида амалга оширилган. Назорат намуналарга қараганда Al-SiO₂-n-Si<V> туридаги МДЯ-структураларнинг характеристикалари манфий силжиш кучланишлари томонига сурилган, бу МДЯ-структураларда сиртий ҳолатлар кўпайганини ва Si-SiO₂ чегара қисмида Si га V киритилганда мусбат зарядлар ҳосил бўлганини таъкидлайди.



7-расм. Ванадий киришмали МДЯ-структура (2) ва назорат МДЯ-структура намуналарини (1) СС-DLTS спектрлари

Si<V> асосидаги МДЯ-структураларнинг СС-DLTS спектрини ўлчаш шуни кўрсатдики (7-расм), легирланган намуналар спектрида максимумли тўртта пик тегишли ҳароратларда куйидагича кузатилади: $T_{max}=102$ К (пик А), $T_{max}=180$ К (пик В), $T_{max}=225$ К (пик С) ва $T_{max}=290$ К (пик D). Шу пиклар билан боғлиқ нуқсон параметрларининг ҳисоб-китоби биринчи учта пикнинг параметри дастлаб Si<V> кузатилган тегишли чуқур сатҳлар параметридан фарқланмаслигини кўрсатади.

Ҳақиқатан пик А энергия ионизацияси $E_c - 0.22$ эВ бўлган чуқур сатҳга тўғри келади, пик В $E_c - 0.45$ эВ, пик С $E_c - 0.22$ эВ энергия

ионизацияли чуқур сатҳга тўғри келади, пик D эса кузатилаётган ва назорат намуналар-дагига тўғри келади.

7-расмда (1-чизик) назорат МДЯ-структураларнинг СС-DLTS кремнийни юзасида E_{FS} электронлар учун Ферми квазисатҳи тахминан кремнийнинг тақиқланган зонаси ўртасида жойлашганда ва импульс тўлиши $U_f=10V$ узунлиги $t_f=1ms$, ушлаб қолиш вақти $t_1=10 ms$, $t_2=20 ms$ да ўлчанган спектри келтирилган. $T=290K$ даги максимум асосий бўлмаган ток ташувчилар орқали юза сатҳларининг қайта зарядланиши билан боғлиқлиги аниқланган.

$Si<V>$ асосидаги МДЯ-структураларнинг СС-DLTS спектрини ўлчаш шуни кўрсатдики (7-расм, 2-чизик), легирланган намуналарнинг спектрида тўртта пик максимумлари билан тегишли температураларда қуйидагича кузатилди: $T_{max}=102 K$ (пик А), $T_{max}=180 K$ (пик В), $T_{max}=225 K$ (пик С) ва $T_{max}=290 K$ (пик D).

Шу пиклар билан боғлиқ нуқсон параметрларининг ҳисоб-китоби биринчи учта пикнинг параметри дастлаб $Si<V>$ кузатилган тегишли чуқур сатҳлар параметридан фарқланмаслигини кўрсатди. Ҳақиқат пик А энергия ионизацияси $E_c-0.22эВ$ бўлган чуқур сатҳга тўғри келади, пик В $E_c-0.45 эВ$, пик С $E_c-0.52 эВ$ энергия ионизацияли чуқур сатҳга тўғри келади, пик D эса кузатилаётган ва назорат намуналардагига тўғри келади.

Нейтронли-трансмутацион легирланган кремний (НТЛК) асосидаги МДЯ-структураларнинг физик хоссалари ўрганилган ва уларни заряд алоқали асбоблар ишлаб чиқарилишида қўллаш мумкинлиги кўрсатилган. НТЛК асосидаги тест МДЯ-структураларнинг параметрлари аниқланган ва паст ҳароратли иссиқлик ишлов бериш йўли билан $Si-SiO_2$ чегара қисмида сиртий ҳолатлар концентрациясини камайтириш имконияти кўрсатилган.

Диссертациянинг «**Металл-яримўтказгич-диэлектрик системасида $Si-SiO_2$ ўтиш қатламининг сиғимли спектроскопияси**» деб номланган бешинчи бобида СС-DLTS ёрдамида релаксацион ҳодисалар кўриб чиқилган.

Катодли сочилган SiO_x пардали МДЯ-структураларнинг СС-DLTS спектрида $T=280K$ да максимум кузатилаяпти. Бу максимум оксиднинг юпқа пардаси ва кремний билан ўтишдаги нуқсонлардан электронларнинг эмиссияси бўлиши билан боғлиқ. SiO_x даги бу марказларнинг кремнийнинг оксидланиш даражасидан ($0<x<2$) N_{ti} нинг зичлигидан боғлиқлиги ва $N_{ti} x \approx 1.25$ да максимумга эгаллиги аниқланган.

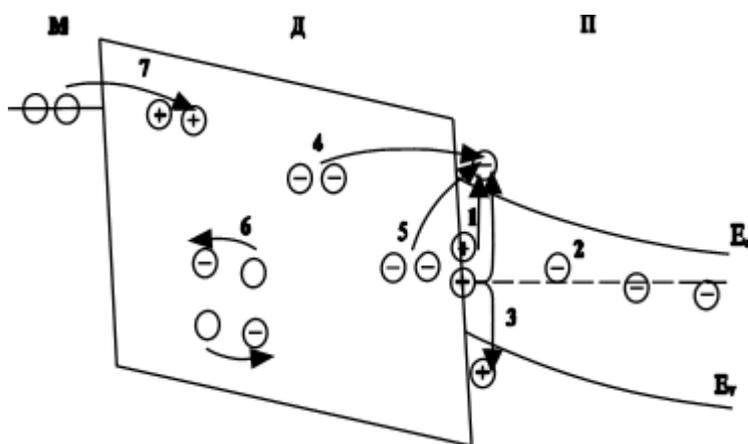
Термик ўстирилган оксидли МДЯ-структураларни γ -квантлари ва электронлар билан нурлантириш СС-DLTS спектрида $280K$ яқинидаги характерли пикнинг ошишига олиб келади, бунда унинг амплитудаси нурланиш дозаси ошиши билан ўсиб бориши топилган. SiO_x ни плазмали олганда ва нурланишдаги ҳосил бўлаётган характерли пик $Si-SiO_2$ ўтишидаги радиацияли нуқсонлар билан характерланади ҳамда кремний оксиди ва кремний ўртасидаги SiO_x таркиби қатламида кремнийнинг эркин алоқали фазовий тақсимланиш модели билан интерпретацияланиши кўрсатилган.

SiO_x пардасида энергетик спектрни ва электронларнинг МДЯ-структурадаги характерли радиацион нуқсонлар орқали электронларни тутиб олиш тезлиги ўлчамлари натижасини солиштиришдан конкрет асбобларнинг Si-SiO_2 ўтиш қатламидаги кремнийнинг оксидланиш даражаси баҳоланган. Диэлектрикнинг ҳажмида, яримўтказгичда, уларнинг чегарасида ҳамда Si-SiO_2 ўтиш қатламида содир бўлувчи ҳар хил жараёнлар ўрганилган ва уларнинг МДЯ-структуралардаги релаксацион жараёнлар ўтишига улуши баҳоланган (8-расм).

Релаксациянинг мумкин бўлган жараёнлари:

1. Сиртий ҳолатлардан Si га электронларнинг эмиссияси.
2. Электронларнинг ҳажмий ҳолатдан Si га эмиссияси.
3. Асосий бўлмаган ток ташувчиларнинг генерацияси ва йиғилиши ҳамда сиртий ҳолатларнинг асосий бўлмаган ток ташувчиларини қамрашда қайта зарядланиши.
4. Si ўтказувчанлик зонасига диэлектрикнинг ҳажмий ҳолат дан туннелланиш йўли билан электронларнинг эмиссияси.
5. SiO_x ($0 < x < 2$) таркибли утиш қатлами нуқсонларидан электронлар эмиссия-си туфайли туннелланиш.
6. SiO_2 ичида заряд марказининг релаксацияси (бунда манфий заряд маркази Si томонга сурилади)
7. Металли электроддан электронларнинг инжекцияси ва уларни диэлектрик ҳажмининг марказларига тутиб олиниши.

Металли электродда силжиш кучланиши бор бўлганда МДЯ-структура-ни нурлантириш вақтида ҳосил бўлувчи радиацион нуқсонларни изохрон



8-расм. Кремнийли МДЯ-структуранинг металли электродида мусбат кучланиш-нинг импульсдан кейинги заряд релаксацияси жараёнлари

куйдириш натижасида диэлек-трикнинг ҳажмий ҳолатлари ва ўрнатилган заряд 250°C да, сиртий ҳолатлар 350°C да тобланиши кўрсатилган, Si-SiO_2 ўтиш қатламидаги характерли радиацион нуқсонлар фақат 400°C да куйдирилади. Нурлантириш вақтида металли электродда мусбат силжиш кучланишида ҳосил бўлувчи сиртий ва ҳажмий кўшимча ҳолатлар 120°C да куйдириш кўрса-тилган ва нурлантиришда

нуқсонларни кейинги куйдириш кинетикасига нисбатан юқори ҳароратда силжиш $V_{\text{см}}$ кучланишининг қутбига боғлиқ эмас.

ХУЛОСА

Кремнийда генерацияли-релаксация эффектлари устида ва ноанъанавий элементлар билан легирланган кремнийли кўпқатламли металл-диэлектрик-яримўтказгич структураларда ўтказилган комплекс тадқиқотлар асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Нам кислород атмосферасига C_2HCl_3 трихлорэтиленнинг парларини кўшиш йўли билан металл-диэлектрик-яримўтказгич структураларини олиш технологияси мукамаллаштирилган.

2. n-Si да V ва Ni киришмалари легирлаш усулига қарамасдан учта чуқур сатҳлар ҳосил қилади: ЧС ($E_c - 0.22$ эВ, $E_c - 0.45$ эВ ва $E_c - 0.52$ эВ), а n-Si<Ni> да иккита ЧС ($E_c - 0.19$ эВ и $E_c - 0.41$ эВ) ва уларнинг ҳосил бўлиш самарадорлиги легирлаш усули ва $T_{диф.}$ и $V_{охл}$ технологик режимларга боғлиқлиги қайд этилган.

3. Кремнийга ноанъанавий киришмалар (V ва Ni, Gd ва Sm ўтиш ва ноёб ер элементлар)ни киритиш йўли билан радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиш жараёнини ва термик нуқсонлар ҳосил бўлиши самарадорлигини камайтириш мумкинлиги аниқланган.

4. Тажрибада кузатилаётган кислород концентрацияларининг 25–50% га камайиши, айрим вақтларда эса кремнийнинг шаффофлиги йўқолиши ноанъанавий киришмаларнинг ўстиришдаги назоратсиз киришмалар атомла-ри билан ўзаро таъсирланишига боғлиги аниқланган.

5. Ишлаб чиқилган ва такомиллаштирилган ўзгармас сиғимдаги СС-DLTS усули ёрдамида кремнийнинг тақиқланган зонаси кенглигида сиртий ҳолатларнинг энергетик жойлашиши ва тутиш кесимини аниқлаш имконияти кўрсатилган, бу N_{SS} кичик қийматларда сиртий ҳолатларнинг энергетик спектрини, МДЯ-структураларда электрон жараёнларнинг кинетикасини ҳамда электрик фаол нуқсонларнинг параметрларини яримўтказгични ва диэлектрикни ҳажмида, уларнинг чегара қисмида ва Si-SiO₂ ўтиш қатламида айрим-айрим аниқлашга имкон беради.

6. МДЯ-структураларни γ -нурлантириш диэлектрикнинг ҳажмида ва Si-SiO₂ чегара қисмида радиацион нуқсонлар ҳосил бўлишига олиб келиши аниқланган, шунда силжишли ($V \neq 0$) нурлантириш кремний ва оксид қатлами орасида фазовий тақсимланган, оксидда жойлаштирилган зарядларнинг флуктуациясига олиб келувчи силжишсиз нурлантиришга нисбатан, радиацион нуқсонлар ҳосил бўлиш шароитларини стабиллаштиради.

7. КП304А туридаги МОЯ-транзисторлар ва МНОЯ-структураларнинг хар хил параметрларига ^{60}Co γ -квантлар таъсири натижаларини солиштириш шуни кўрсатдики, ^{60}Co γ -квантлар билан нурлантириш бўсаға кучланишини ва Si-SiO₂ чегара қисмида сиртий ҳолатларнинг юқори энергетик тормозли γ -нурлантиришга нисбатан катта ўзгаришига олиб келади ва оксид қатламида ютилган дозалар катталикларининг фарқлилиги билан боғланиши таъкидланган.

8. Реал асбобларнинг Si–SiO₂ ўтиш қатламида кремний оксидланиши даражасининг ён тақсимланиши ҳисобланган ва катодли сочилган SiO_x қат-ламли МДЯ-структураларнинг СС-DLTS спектрида T=280K да юпка оксид пленкаси ва кремний ўтиши орасидаги нуқсонлардан электронларнинг эмиссияси билан боғлиқ максимум кузатилади.

9. Яримўтказгич, диэлектрик ҳажмида, ҳамда уларнинг чегара соҳасида содир бўладиган ҳар хил электрон жараёнлар ўрганилган ва уларнинг МДЯ-структураларда релаксацион жараёнлар шаклланишига қўшган улуши баҳоланган.

10. НТЛК асосида тест МДЯ-структураларнинг параметлари аниқланган ва Si–SiO₂ чегарасида сиртий ҳолатларнинг паст ҳароратли термик ишлов бериш йўли билан камайтириш мумкинлиги кўрсатилган.

11. V ва Ni киришмаларининг МДЯ-структураларнинг кремнийли таг-лигида мавжудлиги Si–SiO₂ чегара соҳасида мусбат зарядлар ҳосил бўлиши-га ва сиртий ҳолатларнинг ошишига олиб келади, ҳамда N_{ss} ни E_g бўйича тақсимланишини ўзгаришига ҳамда ванадий ва никелнинг чуқур сатҳларига тўғри келувчи энергиялар соҳасида бир қанча аниқ пикларни ҳосил бўлишига олиб келади. МДЯ-структураларда ноёб элементлар киришмаси (гадолиний ва самарий) бўлганда ҳам худди шундай хусусиятга эга эканлиги аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017. FM/T.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛО-
ГИЙ, САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

ДАЛИЕВ ХОЖАКБАР СУЛТАНОВИЧ

**НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ
НЕТРАДИЦИОННЫМИ ПРИМЕСЯМИ И МНОГОСЛОЙНЫХ
СТРУКТУРАХ НА ЕГО ОСНОВЕ**

01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент – 2017 год

Тема диссертации доктора наук (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2017.1.DSc/FM.37

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу fti-kengash.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyo.net.uz.

Научный консультант: **Зайнабидинов Сирожиддин**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Арипов Хайрулла Кабилович**
доктор физико-математических наук, профессор

Закриллаев Нурулла Фатхуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Камалов Амангельди Базарбаевич
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: Ферганский политехнический институт

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий, Самаркандском государственном университете. (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-30-41; e-mail: lutp@uzsci.net).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ____). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2017г.
(протокол рассылки № ____ от _____ 2017г.)

С.Л.Лутпуллаев
Председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук,
д.ф.-м.н., профессор

А.В.Каримов
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук
д.ф.-м.н., профессор

С.А.Бахрамов
Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученой степени доктора наук,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время во всём мире одной из важных физических проблем в стремительно развивающемся направлении нано и оптоэлектроники является разработка методов спектроскопии поверхностных и объемных дефектов в многослойных кремниевых структурах и контролируемого управления распределением примесей в легированных полупроводниках, особенно с глубокими уровнями, такими как переходные и редкоземельные элементы в объеме кристаллов, используемых в полупроводниковых приборах, предназначенных для применения в переключающих и обладающих бистабильными свойствами устройствах.

В годы независимости учеными нашей страны осуществлены широкомасштабные комплексные меры по получению нового класса полупроводниковых материалов путем легирования полупроводникового материала примесями, создающими глубокие энергетические уровни и достигнуты определенные результаты. В этом направлении созданы новые способы диффузии редкоземельных и переходных элементов никеля и марганца в кремний, усовершенствована технология получения нанокластерных материалов, при этом можно особо отметить достигнутые значительные успехи по получению фоточувствительных и магниточувствительных структур на основе кремния легированного переходными металлами.

В соответствии со “Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан” является наиболее важным повышение эффективности отрасли наноэлектроники на основе теоретических и практических исследований в области физики полупроводников за счет внедрения инновационных технологий.

Во всём мире на сегодня изучение неравновесных процессов в кремнии, легированном нетрадиционными примесями открывает возможность повышения воспроизводимости, срока службы и надежности полупроводниковых приборов. В связи с этим изучение процессов взаимодействия нетрадиционных примесей между собой и с неконтролируемыми примесями, в частности, реализация научных исследований в следующих направлениях считается одной из важных задач: исследование электрофизических и оптических свойств кремния, легированного НП; изучение взаимодействия атомов НП с ростовыми примесями (кислородом) в кремнии; изучение физических процессов, происходящих в объеме диэлектрика, полупроводника, на границе их раздела и в переходном слое Si - SiO₂; изучение влияния внешних факторов (облучения, температуры и др.) на свойства кремния и кремниевых многослойных структур типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП); исследование влияния некоторых глубоких примесей - V, Ni, Sm и Gd на свойства кремниевых МДП-структур. Научно-исследовательские работы, проводимые в указанных направлениях, указывают на актуальность темы данной диссертации.

Настоящая научно-исследовательская работа в определенной степени служит выполнению задач по повышению конкурентоспособности изделий электронной техники, отмеченных в постановлении Президента Республики Узбекистан ПП-1442 «О приоритетах развития промышленности Республики Узбекистан в 2011 - 2015 годах» от 15 декабря 2010 года, а также в других нормативно-правовых документах, 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 III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации². Научные исследования в области микроэлектроники и оптоэлектроники проводятся в ведущих центрах, институтах и университетах ведущих стран, в том числе в университетах Цинциннати и Калифорнийском (США), фирмах Philips Semiconductors, SGS-Thomson, а фирмой Intel и Yale University (США) ведутся исследования по созданию лазеров на основе кремния, легированного редкоземельными элементами, Центром передовых технологий в Цукуба (Япония) проводятся исследования по получению терабитных кристаллов, в Школе высоких технологий (Нидерланды) создаются транзисторы на основе нанотрубок, физика наноструктур исследуется в Физико-техническом институте Санкт-Петербург (Россия), технологией получения структур микро и наноэлектроники занимаются в НПП «Полюс» (Россия).

В результате проводимых в мире исследований по получению материалов легированных редкоземельными элементами и изучению структур на их основе получены ряд научных результатов, в частности ниже приведенные: в Yale University (США) получены первые образцы светоизлучающих кремниевых структур содержащих ионы редкоземельные элементы эрбия (Er); разработаны структуры содержащие редкоземельные элементы в кристаллической решетке (Лундский университет (Швеция) и Женевский университет (Швейцария)); изучены структуры эрбиевых центров (Nation institute for materials science Yokohama); созданы приборы для систем экологического наблюдения (Japan atomic energy research institute); создана технология термодатчиков с нановключениями и наноструктур с высоким магнитосопротивлением (Ташкентский государственный технический университет), развита теория низкоразмерных сверхпроводников (Институт Ядерной физики (Узбекистан)).

² Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе Holmium-related luminescence in crystalline silicon // Materials Science Engineering, V.B81, p.176-178 (2001),

В настоящее время проводятся исследования в следующих перспективных направлениях, в том числе: по разработке магнито-чувствительных структур на основе кремния, легированного марганцем; по разработке датчиков диагностики температуры и других параметров с улучшенными функциональными характеристиками на основе полупроводниковых материалов с нанокластерами; по развитию диффузионных процессов легирования кремния глубокими примесями никеля; изучению наноразмерных и квантовых эффектов протекающих в двумерных слоях межфазных границ.

Степень изученности проблемы. Параметры глубоких уровней, в частности, никеля, ванадия и редкоземельных элементов изучены E.R.Weber, J.Lemke (Германия), температурные свойства МДП-структур изучены американскими учеными A.Stesman, B.Nouwen, а электрофизические свойства МДП-структур рассмотрены E.H.Snow, B.E.Deal (США), в том числе дефекты на границе раздела Si-SiO₂ исследованы A.Stirling, C.Charker

В работах М. К. Бахадырханова, С.З. Зайнабидинова, К.П. Абдурахманова была показана возможность улучшения параметров полупроводниковых структур на основе кремния путем легирования нетрадиционными примесями- переходными металлами и редкоземельными элементами по сравнению со стандартным легированием классическими примесями. Диффузионные параметры ряда редкоземельных элементов изучены Д.Э. Назировым. Исследования влияния внешних факторов на физические процессы в МДП-структурах подробно изучены С.И. Власовым, П.Б. Парчинским.

Как отмечено в работах R.J.Kregler, S.R.Hofsteina, Н.В.Румака электрофизические свойства МДП-структур определяются, главным образом, присутствием различных неконтролируемых примесей, случайно попадающих в полупроводниковую структуру в процессе проведения технологических операций - химической обработки, окисления, фотолитографии, нанесения металлизации, хранения, отжига и др. или присутствующих в достаточном количестве в исходном полупроводниковом кристалле. Именно с наличием примесей с ГУ связывалась нестабильность рабочих параметров микросхем на основе МДП- структур.

Однако остаются не изученными вопросы взаимодействия примесей с дефектами и выявления возможности легирования МДП-структур примесями с ГУ для стабилизации параметров полупроводниковых приборов, пути создания сложных подзатворных диэлектриков, а также установление факторов, определяющих механизм влияния примесных частиц на зарядовое состояние МДП-структур, повышения надежности полупроводниковых структур.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Национального Университета Узбекистана по темам: ОТ-Ф2-081

«Изучение закономерностей дефектообразования в монокристаллическом кремнии с примесно-дефектными ассоциатами и динамических процессов формирования скрытых границ раздела полупроводник-диэлектрик» (01.07.07–31.12.11гг.); А-3-116+А-4-30 «Разработка технологии получения легированного кремния и кремниевых диодных структур с повышенной радиационной стойкостью и способов повышения фоточувствительности кремниевых солнечных элементов» (01.01.15-31.12.17 гг.).

Целью исследования является изучение процессов дефектообразования в кремнии, легированном нетрадиционными примесями – переходными и редкоземельными элементами, а также исследование влияния этих примесей на свойства кремниевых МДП-структур.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

разработать методы нестационарной емкостной спектроскопии для определения объемных и поверхностных дефектов в кремниевых многослойных структурах;

исследовать электрофизические и оптические свойства кремния, легированного НП, а также изучить энергетический спектр глубоких уровней и дефектную структуру в кремнии, легированном НП;

изучить взаимодействие атомов НП с ростовыми примесями (кислородом и углеродом) в кремнии с помощью ИК–спектроскопии;

исследовать физические процессы, происходящие в объеме диэлектрика, полупроводника, на границе их раздела и в переходном слое Si–SiO₂;

изучить влияние внешних факторов (облучения, температуры и др.) на свойства кремния и кремниевых многослойных структурах типа МДП;

исследовать влияние некоторых глубоких примесей – V, Ni, Sm и Gd на свойства кремниевых МДП-структур.

Объектом исследования являются кремний, легированный нетрадиционными примесями и МДП-структуры на их основе.

Предметом исследования являются процессы взаимодействия нетрадиционных примесей с неконтролируемыми примесями, а также электронные процессы, протекающие в объеме диэлектрика, полупроводника, на границе их раздела и в переходном слое Si - SiO₂ МДП-структур.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), высокочастотных вольтфарадных характеристик (ВЧ ВФХ), фотоемкости (ФЕ), фотопроводимости (ФП) и инфракрасной спектроскопии.

Научная новизна диссертационного исследования: разработан метод определения параметров МДП-структур, который позволяет определить энергетический спектр плотности поверхностных состояний (ППС) при низких значениях N_{SS} , кинетику различных электронных процессов в МДП-структурах, а также определить отдельно параметры электрически активных дефектов в объеме полупроводника, диэлектрика, переходном слое Si–SiO₂ и на границе их раздела с помощью DLTS при постоянной

емкости (CC-DLTS) с высокой разрешающей способностью ($N_{SS} < 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$);

обоснованы основные факторы, определяющие эффективность образования глубоких центров (ГЦ) нетрадиционными примесями в Si, то есть температура отжига и скорость охлаждения после легирования, при различных низких и высоких температурах, а также особенности дефектообразования в Si, легированном в процессе роста и диффузией Ni или V при различных низко- и высокотемпературных обработках;

экспериментально определено, что атомы нетрадиционных примесей (V, Ni, Gd, Sm), вводимые в кремний, взаимодействуя с ростовой примесью (O), приводят к уменьшению концентрации оптически активного кислорода (от 10 до 50%) в зависимости от вида конкретной примеси, вплоть до потери оптической прозрачности ($\text{Si} < \text{Ni} >$);

установлена взаимосвязь с удаленными от поверхности Si центрами и новыми радиационными дефектами, образуемыми в объеме диэлектрика при облучении кремниевых МДП-структур γ -квантами и электронами, которые приводят к увеличению концентрации дефектов при больших дозах и к появлению сквозного тока, препятствующего формированию стабильного инверсионного слоя на поверхности полупроводника;

разработан способ определения параметров и местоположения различных радиационных дефектов в МДП-структурах, подвергшихся воздействию проникающего излучения при положительном и отрицательном смещениях на полевом электроде, обеспечивающий стабилизирующие условия образования радиационных дефектов;

разработана модель пространственного распределения свободных связей кремния в слое состава SiO_x между кремнием и двуокисью кремния шириной около 0.6 нм при образовании характерного РД, обусловленного свободной связью на атоме Si в переходном слое Si-SiO₂ МДП-структур, облученных электронами и γ -квантами, а также в структурах с катодно-распыленной пленкой SiO₂;

экспериментально показано, что при изохронной термообработке встроенный заряд и объемные состояния диэлектрика в МДП-структурах отжигаются при 250°C, а поверхностные состояния на границе раздела Si-SiO₂ отжигаются при 350°C, при этом характерные РД в переходном слое Si-SiO₂ полностью отжигаются при 400° С.

Практические результаты исследования: оптимальные условия легирования кремния нетрадиционными примесями использованы для создания различных аналоговых, цифровых и больших интегральных схем с воспроизводимыми характеристиками;

оптимизированная низкотемпературная (900°C) технология изготовления кремниевых многослойных структур типа металл-диэлектрик-полупроводник путем добавления 5 объемных процентов паров трихлорэтилена C_2HCl_3 в атмосфере влажного кислорода позволила получить структуры с существенно низкими плотностями поверхностных состояний

и фиксированного заряда в окисле по сравнению со структурами, полученными по традиционной технологии.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением методов фотопроводимости, инфракрасной спектроскопии и нестационарной емкостной спектроскопии, имеющих высокую чувствительность по концентрации и высокую разрешающую способность по энергии, возможность отдельного определения параметров каждого из уровней.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в расширении представления о физических процессах, протекающих в кремниевых многослойных структурах типа металл-диэлектрик-полупроводник, легированных нетрадиционными примесями.

Параметры различных дефектов в объеме диэлектрика, полупроводника, на границе их раздела и в переходном слое Si-SiO₂ кремниевых многослойных структур можно отдельно определить с помощью нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней при постоянной емкости СС-DLTS.

Внедрение результатов исследования. По результатам изучения процессов дефектообразования в кремнии, легированном нетрадиционными примесями – переходными и редкоземельными элементами, а также исследования влияния этих примесей на свойства кремниевых МДП-структур:

разработанная технология изготовления МДП-структуры с добавлением небольшого количества хлора в атмосферу сухого кислорода при термическом окислении Si использована в АО «FOTON» Акционерной компании «Узэлтехсаноат» (Справка № 03-1862 АК «Узэлтехсаноат» от 13 сентября 2017 года). Использование научных результатов позволило уменьшить плотность поверхностных состояний и повысить стабильность электрических параметров МДП-структур;

Результаты, полученные при изучении образования положительного заряда в окисном слое под воздействием ионизирующего излучения были использованы в АО «FOTON» Акционерной компании «Узэлтехсаноат» для стабилизации параметров полевых транзисторов типа КП 304А (Справка № 03-1862 АК «Узэлтехсаноат» от 13 сентября 2017 года). Использование научных результатов по уменьшению эффективной подвижности носителей заряда в инвертированном канале полевых транзисторов типа КП 304А в 4-5 раз при облучении позволило повысить стабильность электрических параметров путем управления накоплением и растеканием зарядов.

разработанная методика отдельного определения параметров различных дефектов в объеме диэлектрика, полупроводника, на границе их раздела и в переходном слое Si-SiO₂ с помощью нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней при постоянной емкости (СС-DLTS) использована при выполнении гранта Ф2-ФА-Ф121 «Бир жинсли бўлмаган микрохолоатларни шаклланиши ва уларни нейтронлар ёрдамида

легиран кремний гидрогенлаш пайтида фундаментал хоссаларига таъсири» Института ядерной физики АН РУз (Справка № ФТА -01-01/555 Агентства по науке и технологиям от 24 августа 2017 года). Использование научных результатов позволило детально изучить формирование неоднородных микровключений и их влияние на фундаментальные характеристики нейтронно-легированного кремния при гидрогенизации;

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 18 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации основное содержание изложено в 39 научных публикациях, в том числе в монографии, в 15 научных статьях опубликованных в журналах рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций (список в конце автореферата).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка опубликованных работ, содержит 65 рисунков, 2 таблицы, список использованной литературы из 156 наименований и изложена на 220 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, проведён обзор международных научных исследований по теме диссертации, показана степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, 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 дана информация об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Современное состояние исследований физических явлений в легированном кремнии и приборах на его основе»** приведен обзор литературных данных.

Систематизированы параметры различных глубоких уровней, создаваемых нетрадиционными примесями (атомами переходных и редкоземельных элементов) в кремнии, дан их краткий анализ. Приведен также анализ современного состояния исследований свойств МДП-структур. Детально рассмотрены явления, происходящие в системе Si-SiO₂ и сделан вывод, что эти явления определяются, в основном, существованием зарядов в объеме диэлектрика и на границе раздела Si-SiO₂. Приведены экспериментальные результаты исследования влияния радиации, термополевых и термических обработок на свойства МДП-структур.

В конце главы рассмотрены современные проблемы и перспективы исследования физических процессов в легированном кремнии и многослойных структурах на их основе.

Во второй главе **«Нестационарная емкостная спектроскопия глубоких центров в кремнии и кремниевых многослойных структурах»** изложены особенности емкостной спектроскопии. Проанализированы теоретические основы метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней в объеме полупроводника. Приведены уравнения, лежащие в основе емкостных методов исследования плотности поверхностных состояний и сечений захвата на них; основное внимание уделено методу DLTS в режиме постоянной емкости. Даны расчетные формулы и показаны несколько методов определения параметров ГУ из спектров DLTS и фотоемкости (ФЕ).

Развиты теоретические основы методов DLTS при постоянной емкости для МДП-структур. Показано, что более высокую чувствительность и разрешающую способность ($N_{SS} < 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$) имеет метод СС-DLTS, который позволяет определить энергетический спектр плотности поверхностных состояний при низких значениях N_{SS} , а также отдельно определить параметры электрически активных дефектов в объеме полупроводника, диэлектрика, на границе их раздела и переходном слое Si-SiO₂.

Рассмотрена кинетика перезарядки электронов с поверхностных состояний. В качестве примера приведен спектр СС-DLTS при двух разных режимах перезарядки поверхностных состояний (ПС). Максимум при $T=292\text{K}$ объясняется перезарядкой ПС неосновными носителями тока.

Разработаны методы определения параметров МДП-структур с помощью СС-DLTS и технология легирования кремния некоторыми переходными и редкоземельными элементами, позволяющие получать материалы с заданными и воспроизводимыми параметрами. Показана возможность определения энергетического распределения ППС и сечения захвата на них по всей ширине запрещенной зоны кремния с помощью СС-DLTS.

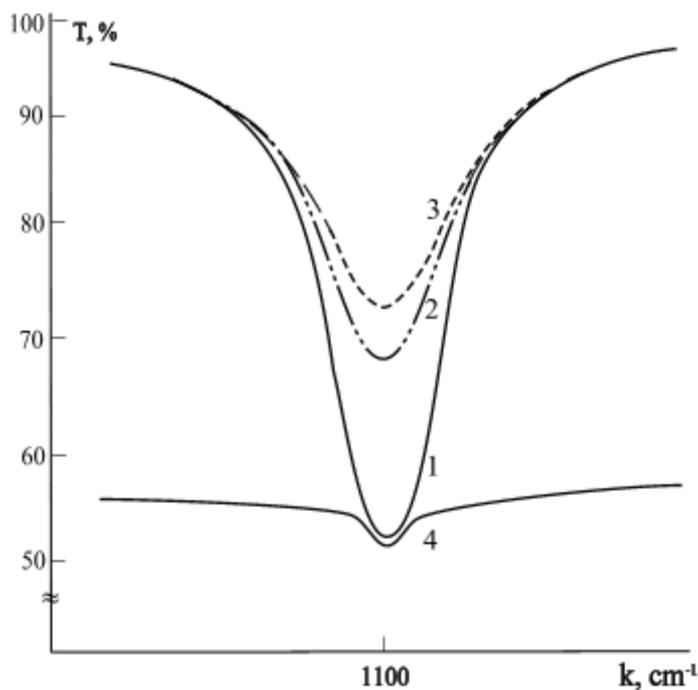
Оптимизирована технология изготовления кремниевых многослойных структур типа металл-диэлектрик-полупроводник путем добавления 5 объемных процентов паров трихлорэтилена C_2HCl_3 в атмосфере влажного кислорода. Показано, что снижение температуры до $900^\circ C$ позволяет получать структуры с существенно низкими значениями ППС и фиксированного заряда в окисле по сравнению со структурами, полученными по традиционной технологии.

Разработана установка DLTS для сканирования поверхностных и объемных дефектов в кремнии. Предложена схема и описание автоматической универсальной установки, работающей в режимах DLTS при постоянном напряжении и DLTS при постоянной емкости. Установка позволяет определить плотность поверхностных состояний в верхней и нижней половине запрещенной зоны кремния, сечения захвата носителей заряда, встроенный заряд и объемные состояния в SiO_2 , а также параметры дефектов в объеме Si и переходном слое Si- SiO_2 .

В третьей главе «**Физические процессы в кремнии, легированном нетрадиционными примесями**» приведены результаты исследований с помощью методов DLTS и ФЕ физических процессов в Si легированном переходными металлами и редкоземельными элементами.

Из комплексных исследований физических процессов в $Si\langle V \rangle$ с помощью методов DLTS и ФЕ установлено, что диффузионное введение V в Si приводит к образованию четырех ГУ с фиксированными энергиями ионизации $E_c - 0.22$ эВ, $E_c - 0.45$ эВ, $E_c - 0.52$ эВ и $E_v + 0.41$ эВ с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_n = 5 \cdot 10^{-14}$ см², $6 \cdot 10^{-14}$ см², $2 \cdot 10^{-15}$ см² и $2.5 \cdot 10^{-13}$ см², соответственно. Показано, что эффективность образования ГУ в образцах $Si\langle V \rangle$ зависит от технологических режимов введения ванадия: она увеличивается с ростом температуры диффузии и скорости охлаждения образцов после диффузии.

Исследованы неравновесные процессы в Si, легированном Ni как путем диффузии, так и в процессе выращивания из расплава. Установлено, что после диффузионного введения Ni в образцах n-Si $\langle Ni \rangle_{диф}$ обнаружены ГУ с параметрами $E_c - 0.19$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$ см² и $E_c - 0.41$ эВ, $\sigma_n = 6 \cdot 10^{-16}$ см², а в образцах p-Si $\langle Ni \rangle_{диф}$ наблюдаются ГУ $E_v + 0.20$ эВ, $\sigma_p = 7 \cdot 10^{-15}$ см² и $E_v + 0.41$ эВ, $\sigma_p = 3 \cdot 10^{-15}$ см². Глубокие же уровни $E_c - 0.19$ эВ и $E_v + 0.41$ эВ наблюдаются и в термообработанных образцах (без Ni), причем их концентрации в Si $\langle Ni \rangle_{диф}$ значительно ниже. То есть от технологических режимов ($T_{диф}$ и $V_{охл}$) зависит только эффективность образования уровней $E_c - 0.41$ эВ и $E_v + 0.20$ эВ: с ростом $T_{диф}$ и $V_{охл}$ их концентрации увеличиваются.



1- контрольный образец $T_{\text{диф}}$: 2 - 1000°C,
3 - 1100°C, 4 - 1200°C., быстрое охлаждение

Рис.1. Спектры ИК-поглощения в образцах Si, диффузионно-легированного Ni

Этот эффект не наблюдается в образцах с медленным охлаждением.

Таким образом, можно заключить, что при введении Ni в Si, вероятнее всего, образуются электронейтральные и оптически неактивные комплексы с участием атомов Ni и O.

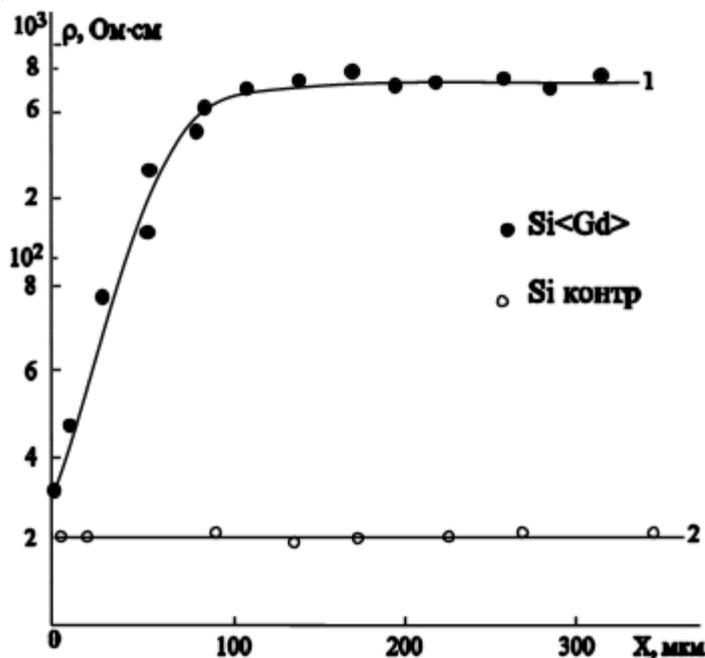


Рис.2. Зависимости удельного сопротивления ρ в образцах для Si<Gd> и контрольного образца Si

Измерение спектров ИК-поглощения образцов Si, диффузионно - легированного Ni (рис.1) показало, что присутствие атомов Ni в объеме Si приводит к заметному уменьшению интенсивности кислородного пика поглощения, к уменьшению $N_0^{\text{опт}}$. При этом наблюдаемый эффект зависит от концентрации введенного Ni: чем больше N_{Ni} , тем больше уменьшение величины $N_0^{\text{опт}}$. Обнаружено, что диффузионное введение никеля в кремний с последующим быстрым охлаждением приводит к ухудшению оптической прозрачности образцов Si<Ni>, вплоть до потери прозрачности.

На основе изучения поведения атомов Gd и Sm, введенных в Si путем диффузии установлено, что профиль распределения удельного сопротивления ρ в образцах Si<Gd>, не описывается erfc -функцией, а состоит из двух участков, рис.2. Вначале наблюдается резкий рост ρ на 1,5÷2 порядка до глубины ~ 50 мкм, далее значение ρ стабилизируется и заметного изменения ρ с глубиной не наблюдается. Значения ρ в контрольных образцах с глубиной не изменялись. Измерения с помощью емкостной спектроскопии показали, что: в кремнии легирован-

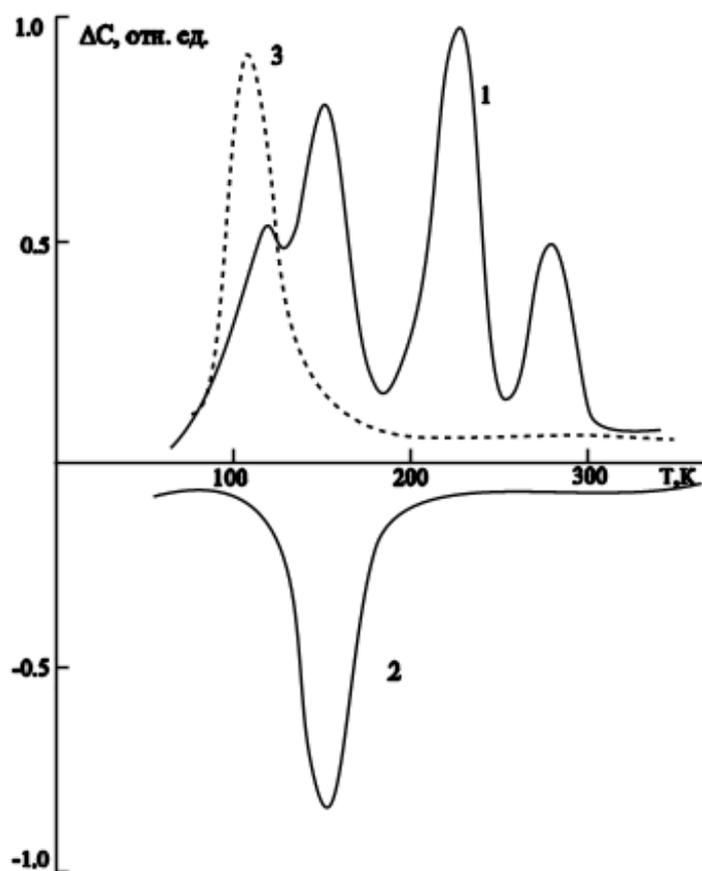


Рис. 3. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<Gd>(1), p-Si<Gd> (2) и контр.образца (3).

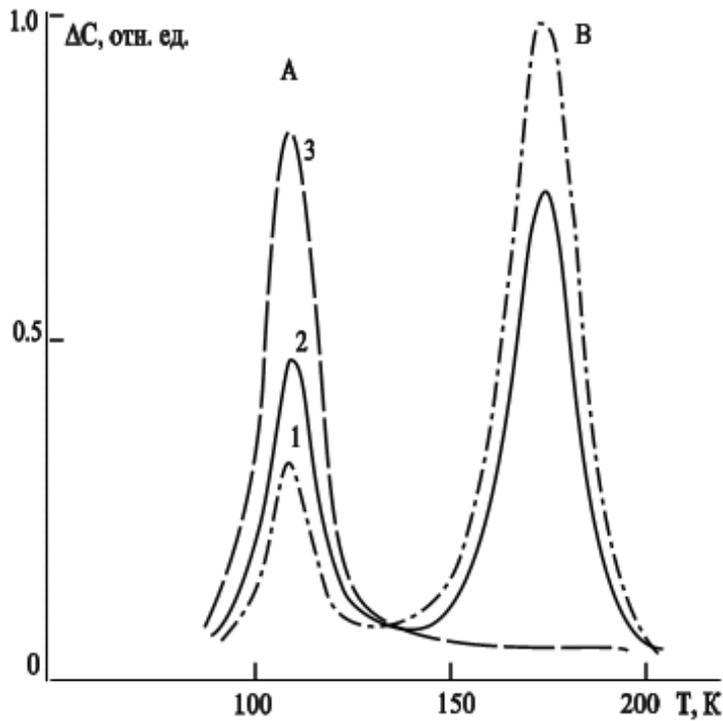
коррелирует с содержанием Sm. Уровень $E_c - 0.23$ эВ как в образцах Si<Gd>, так и в образцах Si<Sm> является, по всей видимости, термодфектом, поскольку он наблюдается и в контрольных термообработанных образцах, при этом концентрация этого ГУ на $1 \div 1.5$ порядка выше, чем в образцах Si<Gd> или Si<Sm>. Наблюдаемое значительное уменьшение концентрации уровня $E_c - 0.23$ эВ в n-Si с редкоземельными элементами (РЗЭ) с ростом содержания Gd или Sm и температуры ВТО можно объяснить снижением эффективности термического дефектообразования при наличии атомов Gd и Sm в Si.

Инфракрасная спектроскопия Si с примесями РЗЭ показала, что концентрация оптически активного междоузельного кислорода (N_o^{opt}) практически не изменяется для контрольных образцов, в то время как для образцов, легированных гадолинием, концентрация N_o^{opt} уменьшается на 20%, а для образцов Si, легированных Sm, величина уменьшения N_o^{opt} составляет 10-12%.

Показано, что ВТО в интервале $900 \div 1250$ °C активизирует атомы РЗЭ, введенные в Si в процессе выращивания. В образцах Si<Sm> обнаружены ГУ $E_c - 0.23$ эВ и $E_c - 0.39$ эВ с сечениями захвата электронов $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-17}$ и $\sigma_n = 1.2 \cdot 10^{-15}$ см², соответственно. При этом эффективность образования этих уровней зависит от содержания примеси РЗЭ и температуры обработки образцов, в то время как ВТО исследуемых образцов приводит к увеличению N_o^{opt} . Этот эффект, вероятно, связан с активацией атомов РЗЭ в про-

ном Gd образуются четыре ГУ с фиксированными энергиями ионизации $E_c - 0.23$ эВ, $E_c - 0.35$ эВ, $E_c - 0.41$ 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. В образцах p-Si<Gd> наблюдается лишь один ГУ в нижней половине запрещенной зоны $E_v + 0.32$ эВ с сечениями захвата носителей заряда $\sigma_p = 2 \cdot 10^{-16}$ см², соответственно (рис.3).

Обнаружено, что при легировании Si самарием также образуются 4 ГУ с энергиями ионизации: $E_c - 0.23$ эВ, $E_c - 0.39$ эВ $E_v + 0.21$ эВ, $E_v + 0.29$ эВ (рис.4). Отметим, что только эффективность образования ГУ $E_c - 0.39$ эВ и $E_v + 0.29$ эВ



$T_{\text{дифф.}}$: 1- 1200°C, 2 - 1100°C и
3 - контрольный образец

Рис. 4. Типичные спектры DLTS диффузионно легированных образцов Si<Sm>

центров на $1 \div 1.5$ порядка по сравнению с обычным Si. Следует отметить, что в отличие от образцов Si<Sm>, в образцах Si<Gd>, концентрации А- и Е- центров, несколько меньше. Причем, чем больше концентрация атомов РЗЭ, тем меньше концентрации РД. Эти эффекты связаны с особенностями взаимодействия атомов РЗЭ с РД в кремнии.

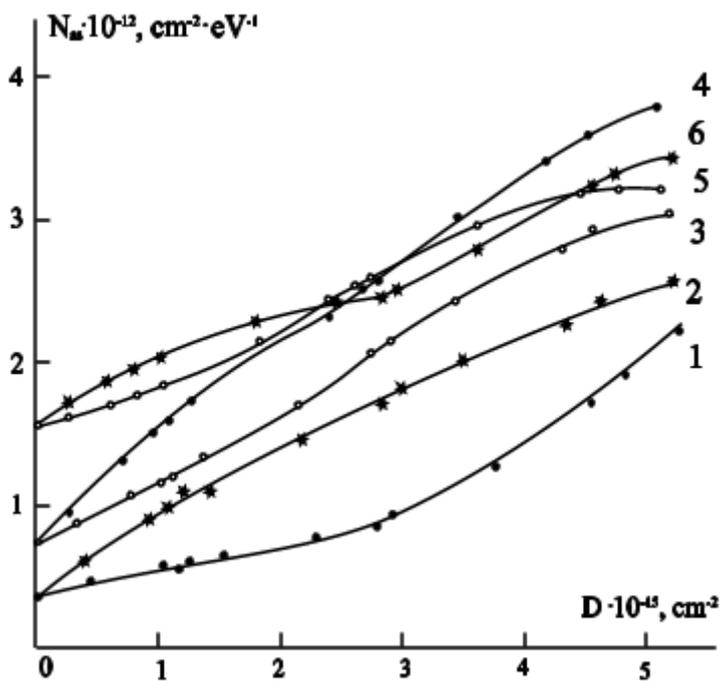
В четвертой главе изучены **«Неравновесные процессы в кремниевых МДП-структурах И МОП-транзисторах»** методами СС-DLTS и ВЧ ВФХ. Показано, что облучение МДП-структур γ -квантами приводит к увеличению ППС вследствие обрыва связи трехвалентного кремния с ионами ОН и Cl на границе раздела Si-SiO₂ и образованию положительного встроенного заряда в окисле.

Обнаружено, что на границе раздела Si-SiO₂ и в объеме диэлектрика при облучении происходит образование РД, с ростом их концентрации при больших дозах появляется сквозной ток, препятствующий формированию стабильного инверсионного слоя на поверхности полупроводника.

Изучено влияние γ -облучения на параметры МДП-структур со смещением и без смещения на полевом электроде и обнаружено, что наличие смещения на полевом электроде и его полярность во время облучения слабо влияют на генерацию и ионизацию центров в диэлектрике, но плотность поверхностных состояний вблизи середины запрещенной кремния растет значительно быстрее при положительном смещении (рис. 5).

цессе ВТО, которая, по всей видимости, приводит к разрушению комплексов кислорода с примесями РЗЭ, в результате чего, вероятно, и происходит увеличение $N_0^{\text{опт}}$ и образование ГУ, связанных с атомами Sm. Атомы Gd не поддаются активации при ВТО, что, вероятно, связано с высокой энергией связи преципитатов гадолиния.

Исследовано радиационное дефектообразование в Si, легированном примесями РЗЭ и установлено, что присутствие атомов Sm и Gd в Si приводит к замедлению процессов радиационного дефектообразования, то есть к снижению эффективности введения А- центров и Е-



E_t ПС: Т,К (E_t , эВ): 1,2– 250 (0.44); 3,4 – 150 (0.24); 5,6– 80 (0.09). $V_{см}$, В: 1,3,5 – -10; 2,4,6 – +10

Рис. 5. Зависимости плотности ПС N_{SS} от D при положительном и отрицательном $V_{см}$, вычисленные из спектров СС-DLTS при разных температурах и соответствующих им средних энергиях ионизации

Получены зависимости порогового напряжения и напряжения плоских зон МНОП-структур от величины переноса энергии высокоэнергетического тормозного γ -излучения.

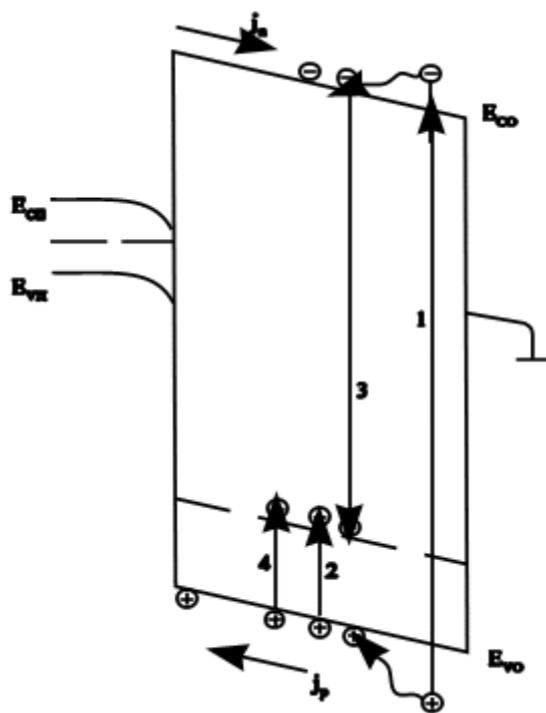
Показано, что основные физические процессы, ответственные за накопление заряда в диэлектрическом слое МНОП-структуры при облучении высокоэнергетическим тормозным γ -излучением можно описать с помощью генерационно-рекомбинационной модели, развитой применительно к структурам металл-окисел-полупроводник (МОП-структурам), облученным γ -квантами ^{60}Co , учитывая особенности МНОП-структуры (рис.6).

Установлено, что зависимости $\Delta V_{FB}(F)$ и $\Delta V_{MG}(F)$ для МНОП-структур, подвергнутых воздействию высокоэнергетического тормозного γ -излучения и облученных γ -квантами ^{60}Co , сдвинуты друг относительно друга, что связано с различной величиной поглощенной дозы в SiO_2 и на границе раздела Si-SiO_2 при одинаковом значении переноса энергии излучения.

Исследовано влияние высокоэнергетического тормозного γ -излучения и γ -квантов ^{60}Co на различные параметры МОП-транзисторов типа КП 304А. Обнаружено, что облучение γ -квантами ^{60}Co приводит к большему изменению порогового напряжения и ППС границы раздела Si-SiO_2 по сравнению с влиянием высокоэнергетического тормозного γ -излучения, что связывается с различием величины поглощенной дозы в окисном слое. Это приводит, в

Надо отметить, что при облучении структур без смещения наблюдается большой разброс экспериментальных данных, что связывается с флуктуациями встроенного заряда в окисле. Облучение же при $V \neq 0$ стабилизирует условия образования РД и позволяет установить четкие зависимости их плотности от дозы.

Впервые измерены высокочастотные С-V-характеристики структур типа металл-нитрид-окисел-олупроводник (МНОП-структуры), облученных высокоэнергетическим тормозным γ -излучением с максимальной энергией γ -квантов в тормозном спектре 30 МэВ.



2- захват дырок на ловушки; 3- рекомбинация электронов и дырок; 4- термализация дырок

Рис.6. Энергетическая зонная диаграмма МОП-транзистора, поясняющая процесс накопления и растекания зарядов генерация электронно-дырочных пар

Экспериментально обнаружено, что облучение МОП-транзистора высокоэнергетическим тормозным γ -излучением приводит к подъему всего энергетического спектра ППС границы раздела Si-SiO₂ с увеличением переноса энергии излучения и появлению локального максимума $E_c - 0.18$ эВ на спектре, связанного с разрывом напряженных связей на границе Si-SiO₂, который при переносе энергии излучения $F=7.5 \cdot 10^3$ Дж/см² сливается со всем спектром.

Экспериментальное исследование подпороговых передаточных ВАХ МОП-транзисторов, подвергнутых воздействию высокоэнергетического тормозного γ -излучения, показало, что после отжига ППС во всем исследованном диапазоне энергий запрещенной зоны ведет себя немонотонно. Отжиг до температур $T_{отж}=150 \div 170^\circ\text{C}$ приводит к увеличению ППС, а после $210 \div 220^\circ\text{C}$ ППС начинает уменьшаться. Эти процессы объясняются с помощью диффузионно-дрейфового механизма.

Из экспериментов обнаружено, что при изохронном отжиге МОП-транзисторов, предварительно подвергнутых воздействию тормозного излучения, пороговое напряжение и ППС возвращаются в исходное состояние при $T_{отж}=350 \div 360^\circ\text{C}$.

Исследовано влияние низкотемпературного изотермического и изохронного отжигов и термополевых обработок (ТПО) на характеристики и

свою очередь, к разному числу избежавших рекомбинации электронно-дырочных пар, генерированных излучением.

Впервые исследовано влияние высокоэнергетического тормозного γ -излучения на пороговое напряжение (V_{MG}), эффективную подвижность носителей заряда в инвертированном канале ($\mu_{эфф}$) и токовые характеристики МОП-транзисторов. Установлено, что с ростом переноса энергии излучения V_{MG} смещается в сторону больших отрицательных значений и это связывается с образованием положительного заряда в окисном слое. Показано, что эффективная подвижность носителей заряда в инвертированном канале с облучением уменьшается в 4÷5 раз.

параметры МНОП-структур и МОП-транзисторов и установлено, что термообработки МОП-транзисторов, предварительно облученных высокоэнергетическим тормозным γ - излучением при 360°C в течение 30 минут с медленным охлаждением приводят к уменьшению ППС на $1\div 1.5$ порядка по ширине запрещенной зоны кремния, а также ТПО необлученных при 300°C и $V_G=10\text{ В}$, приводят к уменьшению V_{MG} на 10-15% .

Для изучения влияния атомов ванадия, никеля и гадолиния на свойства объема и границы раздела Si-SiO₂, нами проводились комплексные исследования с помощью СС-DLTS и ВЧ ВФХ. Измерения ВЧ ВФХ показали, что характеристики МДП-структур типа Al-SiO₂-n-Si<V>, сдвинуты в сторону отрицательных смещений по сравнению с контрольными образцами, что свидетельствует об увеличении ППС МДП-структур и образовании положительного заряда на границе раздела Si-SiO₂ при введении V в Si.

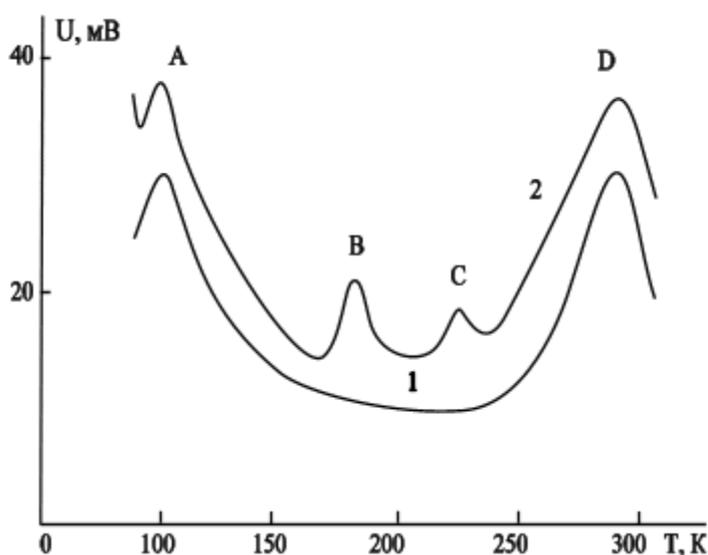


Рис. 7. Спектры СС-DLTS типичных МДП-структур на основе Si с примесью V(1) и контрольных МДП-структур (2)

Измерения спектров СС-DLTS МДП-структур на основе Si<V> (рис.7) показали, что на спектрах легированных образцов наблюдаются 4 пика с максимумами при температурах $T_{\max}=102\text{ К}$ (пик А), $T_{\max}=180\text{ К}$ (пик В), $T_{\max}=225\text{ К}$ (пик С) и $T_{\max}=290\text{ К}$ (пик D). Численные расчеты параметров дефектов, обусловленных этими пиками, показали, что параметры первых трех пиков не отличаются от параметров соответствующих ГУ, наблюдавшихся нами ранее в Si<V>. Действительно, пик А соответствует ГУ с

энергией ионизации $E_c - 0.22\text{ эВ}$, пик В - ГУ $E_c - 0.45\text{ эВ}$, пик С – ГУ с энергией ионизации $E_c - 0.52\text{ эВ}$, а пик D соответствует пику, наблюдаемому и в контрольных структурах.

На рис.7, кривая 1 представлены спектры СС-DLTS контрольных МДП-структур, измеренные при такой емкости обеднения, что квазиуровень Ферми для электронов на поверхности кремния E_{FS} находится примерно в середине запрещенной зоны кремния и импульсе заполнения $U_f=10\text{ В}$ при длительности $t_f=1\text{ мс}$, временах задержки $t_1=10\text{ мс}$, $t_2=20\text{ мс}$. Максимум при $T=290\text{ К}$ связан с перезарядкой поверхностных состояний неосновными носителями тока, наблюдавшийся нами ранее.

Исследованы физические свойства МДП-структур на основе нейтронно-трансмутационно легированного кремния и показана возможность их использования для производства приборов с зарядовой связью. Исследованы кристаллы нейтронно-трансмутационно легированного кремния (НТЛК) с

параметрами, пригодными для производства приборов с зарядовой связью. Определены параметры тестовых МДП-структур на основе НТЛК и показана возможность уменьшения плотности ПС на границе Si-SiO₂ путем низкотемпературных обработок.

В пятой главе «Емкостная спектроскопия переходного слоя в системе металл-диэлектрик-полупроводник» рассмотрены релаксационные явления и свойства переходного слоя Si-SiO₂ в МДП-структурах с помощью СС-DLTS.

Обнаружено, что на спектрах СС-DLTS МДП-структур с катодно-распыленной пленкой SiO_x наблюдается максимум при T=280 К. Показано, что этот максимум связан с эмиссией электронов из дефектов в переходном слое между кремнием и тонкой пленкой окисла. Определена зависимость плотности N_{ti} этих центров в SiO_x от степени окисления кремния (0 < x < 2) и показано, что N_{ti} имеет максимум при x ≈ 1.25.

Обнаружено, что облучение электронами и γ - квантами МДП-структур с термически выращенным окислом приводит к повышению на спектрах СС-DLTS характерного пика вблизи 280 К, при этом его амплитуда растет с ростом дозы облучения. Показано, что характерный пик, возникающий как при облучении, так и при плазменном нанесении SiO_x, обусловлен РД в переходном слое Si - SiO₂ и интерпретируется моделью пространственного распределения свободных связей кремния в слое состава SiO_x между кремнием и двуокисью кремния.

Из сопоставления результатов измерения в пленках SiO_x энергетического спектра и скорости захвата электронов характерными радиационными дефектами в МДП-структурах сделана оценка профиля распределения степени окисления Si в переходном слое Si - SiO₂ конкретных приборов, изучены различные электронные процессы, происходящие в объеме диэлектрика, полупроводника, на границе их раздела, а также в переходном слое Si - SiO₂ и оценен их вклад в картину релаксационных процессов в МДП-структурах (рис. 8).

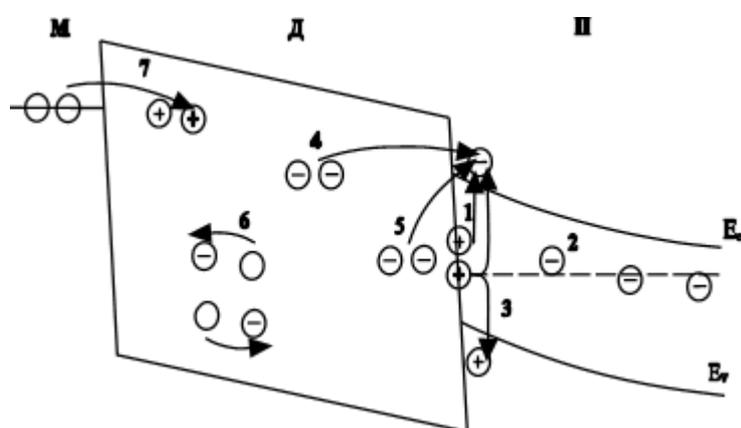


Рис. 8. Процессы релаксации заряда после импульса положительного напряжения на металлическом электроде МДП-структуры

Возможные процессы релаксации:

1. Эмиссия электронов из ПС в Si.
2. Эмиссия электронов из объемных состояний (ОС) в Si.
3. Генерация и накопление неосновных носителей тока (ННТ) и перезарядка ПС при захвате ННТ.
4. Эмиссия электронов из ОС диэлектрика путем туннелирования в зону проводимости Si.

5. Туннелирование с эмиссией электронов из дефектов переходного слоя состава SiO_x ($0 < x < 2$). 6. Релаксация центра заряда (ионов, электронов) внутри SiO_2 (причем центр отрицательного заряда смещается в сторону Si). 7. Инжекция электронов из металлического электрода и захват их на центры в объеме диэлектрика.

Исследован изохронный отжиг РД, возникающих во время облучения МДП-структур γ - квантами при наличии смещения на металлическом электроде. Показано, что встроенный заряд и объемные состояния диэлектрика отжигаются при 250°C , поверхностные состояния - при 350°C , а характерный радиационный дефект в переходном слое Si - SiO_2 полностью отжигается только при 400°C . Показано также, что дополнительные объемные состояния и ПС, которые возникают в структурах при положительном смещении на металлическом электроде во время облучения, отжигаются при 120°C и кинетика дальнейшего отжига дефектов при более высоких температурах не зависит от полярности $V_{\text{см}}$ при облучении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных комплексных исследований генерационно-релаксационных эффектов в кремнии и кремниевых многослойных структурах типа металл-диэлектрик-полупроводник, легированных нетрадиционными элементами сделаны следующие выводы:

1. Усовершенствована технология изготовления кремниевых многослойных структур типа металл-диэлектрик-полупроводник путем добавления паров трихлорэтилена C_2HCl_3 в атмосфере влажного кислорода.

2. Показано, что примеси V и Ni независимо от способа легирования в n-Si образуют три глубокие уровни: ГУ ($E_c - 0.22$ эВ, $E_c - 0.45$ эВ и $E_c - 0.52$ эВ), а в n-Si<Ni> два ГУ ($E_c - 0.19$ эВ и $E_c - 0.41$ эВ) с фиксированными энергиями ионизации и эффективность образования этих центров зависит от технологических режимов – $T_{\text{диф}}$ и $V_{\text{охл}}$ и способа легирования.

3. Выявлено, что путем введения нетрадиционных примесей (переходных и редкоземельных элементов - V и Ni, Gd и Sm) в кремний можно снизить эффективность термического дефектообразования и замедлить процессы образования РД.

4. Наблюдаемое на эксперименте снижение концентрации кислорода и углерода на 25-50%, а в отдельных случаях (Si<Ni>) потеря оптической прозрачности кремния связано с активным взаимодействием атомов нетрадиционных примесей в кремнии с ростовыми неконтролируемыми примесями.

5. Показана возможность определения энергетического распределения ППС и сечения захвата на них по всей ширине запрещенной зоны кремния с помощью разработанного метода DLTS при постоянной емкости (CC-DLTS), который позволяет определить энергетический спектр ППС при низких значениях N_{SS} , кинетику различных электронных процессов в МДП-структурах, а также отдельно определить параметры электрически активных

дефектов в объеме полупроводника, диэлектрика, переходном слое Si–SiO₂ и на границе их раздела.

6. Найдено, что γ -облучение МДП структур приводит к образованию РД на границе раздела Si–SiO₂ и в объеме диэлектрика, при этом облучение со смещением ($V \neq 0$) стабилизирует условия образования РД, пространственно распределенных в переходном слое между кремнием и окисным слоем в отличие от облучения без смещения, приводящего к флуктуациям встроенного заряда в окисле.

7. Сравнение результатов воздействием γ -квантов ⁶⁰Со на различные параметры МНОП-структур и МОП-транзисторов типа КП304А показало, что облучение γ -квантами ⁶⁰Со приводит к большему изменению порогового напряжения и ППС границы раздела Si–SiO₂ по сравнению с влиянием высокоэнергетического тормозного γ -излучения и связывается с различием величины поглощенной дозы в окисном слое.

8. Проведена оценка профиля распределения степени окисления кремния в переходном слое Si–SiO₂ реальных приборов и обнаружено, что на спектрах СС-DLTS МДП-структур с катодно-распыленной пленкой SiO_x наблюдается максимум при $T=280$ К, связанный с эмиссией электронов из дефектов в переходном слое между кремнием и тонкой пленкой окисла.

9. Изучены различные электронные процессы, происходящие в объеме диэлектрика, полупроводника, на границе их раздела, а также в переходном слое Si–SiO₂ и оценен их вклад в картину релаксационных процессов в МДП-структурах.

10. Определены параметры тестовых МДП-структур на основе НТЛК и показана возможность уменьшения плотности ПС на границе Si–SiO₂ путем низкотемпературной обработки и использования их для производства приборов с зарядовой связью.

11. Обнаружено, что присутствие примесей V и Ni в кремниевой подложке МДП-структур приводит к увеличению ППС и образованию положительного заряда на границе раздела Si–SiO₂, а также к изменениям распределения N_{ss} по E_g и образованию нескольких явно выраженных пиков в области энергий, соответствующих глубоким уровням ванадия и никеля. Аналогичным образом ведут себя примеси редкоземельных элементов (гадолиния и самария) в МДП структурах.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING OF THE SCIENTIFIC DEGREES
DSc.27.06.2017. FM/T. 34.01 AT PHYSICOTECHNICAL INSTITUTE,
INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES,
SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

DALIEV HOJAKBAR SULTANOVICH

**NONEQUILIBRIUM PROCESSES IN SILICON, DOPED BY NONRADI-
TIONAL IMPURITIES AND MULTILAYERED STRUCTURES ON ITS
BASIS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION OF DOCTOR OF SCIENCE (DSc)
ON THE PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT – 2017

Theme of dissertation of doctor of science (DSc) on physics and mathematics Sciences registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.1.DSc.FM.37

The dissertation has been prepared in National University of Uzbekistan

Abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English resume) on the website (fti-kengash.uz) and on Information and educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific consultant: **Zainabidinov Sirozhiddin**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Aripov Hayrulla Kabilovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Zikrillaev Nurulla Fatkhullaevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Kamalov Amangeldi Bazarbaevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organisation: **Fergana Polytechnic Institute**

Dissertation defense will take place "___" _____ 2017 at ___ at the meeting of Scientific council number DSc.27.06.2017. FM/T.34.01 at the Physicotechnical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University. (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2b, Bodomzor Yuli str., The administrative building of the Physicotechnical Institute, conference hall. Phone/Fax: (99871) 235-42-41; e-mail: lutp@uzsci.net.

With the dissertation is possible to review in the Information resource centre of the Physicotechnical Institute (registered under № ____). Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2b, Bodomzor Yuli str. Phone/Fax: (99871) 235-42-41.

Abstract of dissertation sent out « ___ » _____ 2017.
(meeting report № ____ on « ___ » _____ 2017).

S. L. Lutpullaev
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

A. V. Karimov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

S. A. Bakhramov
Chairman of scientific seminar under scientific
council the award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. The study of nonequilibrium processes in silicon, doped non-traditional contaminants (NP) - transition and rare-earth elements and multilayer structures based on it as an opportunity to identify ways to improve reliability, service life and reproducibility of electrical parameters of semiconductor devices. This aspect of the study of the processes of interaction of non-traditional impurities among themselves and with uncontrolled impurities in silicon; development of methods for non-stationary capacitance spectroscopy for the determination of bulk and surface defects in silicon multilayer structures; a study of electrophysical and optical properties of silicon doped NP; study on the interaction of atoms of NP growth with impurities (oxygen) in silicon; the study of the physical processes occurring in the volume of dielectric, semiconductor, on the border of their section and in the transition layer of Si - SiO₂; the study of the influence of external factors (irradiation, temperature, etc.) on the properties of silicon and silicon multilayer structures of the type metal-insulator-semiconductor (TIR); a study of the influence of some impurities deep - V, Ni, Sm and Gd on the properties of silicon MIS structures is considered to be one of the most important tasks. Research work conducted in these areas point to the relevance of the topic of this thesis.

Relevant research priority areas of science and developing technologies of the Republic. The research described in the dissertation was carried out in accordance with the Priority directions of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan: F2 "Physics, astronomy, energy and engineering" and PPI-3 "Energy, energy and resource conservation, transportation, engineering and development of modern electronics, microelectronics, Photonics and electronic instrumentation".

A review of international research on the topic of dissertation. Research in the field of microelectronics and optoelectronics held in leading centers, institutes and leading universities, including the universities of Cincinnati and University of California (USA), and the firm Intel is working on creating a laser based on silicon doped by rare-earth elements. On the technology of silicon MIS structures, work is underway in NPP "Polus" (Russia). Parameters of deep levels, in particular, of Nickel, vanadium and rare-earth elements studied by Weber E. R, J. Lemke (Germany), the thermal properties of MIS structures were studied by American scientists Stesman A., Nouwen B., and electrophysical properties of MIS structures considered by E. H. Snow, B. E. Deal (USA), including defects at the interface Si - SiO₂ are investigated Stirling A., Charker C.

Problem development status. In spite of a large number of studies, there remain unexplored issues of interaction of impurities with defects and identify possible doping of mos-structures with deep level impurities to stabilize the parameters of semiconductor devices, the way of creating complex gate dielectrics, as well as the establishment of the factors determining the mechanism of influence of impurity particles on the charge state of the MIS structures, improving the reliability of semiconductor structures.

Relevance of the dissertation research to the plans of scientific-research works. The dissertation work is performed in accordance with thematic plans grants No. GR 01.200009108 "The influence of alloying impurities and external influences on the electrical properties of the semiconductor and natural polymeric structures", OT-F2-081 "The Study of patterns of defect formation in nanocrystallites-kom silicon with impurity-defect associates and the dynamic processes of the formation of the hidden interface semiconductor - dielectric", ITD-14-035 "Development of methods of increasing the stability of parameters of silicon mos-structures", A-3-116+A-4-30 "Development of technology for silicon and doped silicon diode structures with increased radiation resistance and ways to improve the photosensitivity of silicon solar cells".

The aim of research work is to the study of the processes of defect formation in silicon, doped with impurities of non-traditional – transitional and rare earth elements, and a study of the influence of these impurities on the properties of silicon MIS structures.

Tasks of research work is to develop methods of non-stationary capacitance spectroscopy for the determination of bulk and surface defects in silicon multilayer structures; to investigate physical processes occurring in the volume of dielectric, semiconductor, on the border of their section and in the transition layer of Si - SiO₂;

The object of research is silicon, doped impurities and non-traditional MIS-structures based on them.

The subject of research – are the processes of interaction of non-traditional impurities with uncontrolled impurities, the electronic processes occurring in the volume of dielectric, semiconductor, on the border of their section and in the transition layer of Si - SiO₂ mos structures.

Methods of the research: methods of nonstationary capacitance spectroscopy of deep levels (DLTS), high-frequency volt Farad characteristics (HF CV), photo capacity, photoconductivity and infrared spectroscopy.

Scientific novelty of the research work is the method of determining parameters of MIS structures by DLTS at a constant capacitance (CC-DLTS) is high-resolution $N_{SS} < 1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$), which allows to determine the energy spectrum of surface-state density at low values of N_{SS} , the kinetics of various electron processes in MIS-structures, as well as separately to determine the parameters of electrically active defects in the bulk semiconductor, the dielectric, the transition layer Si-SiO₂ and at the border of the section;

discovered that irradiation of silicon MIS structures γ -quanta and electrons in the volume of dielectric is the formation of new radiation defects, the increase in the concentration of which in high doses leads to the through current, preventing the formation of a stable inversion layer at the semiconductor surface, they are removed from the surface Si;

the proposed method of determining the parameters and location of different radiation defects in mos structures exposed to penetrating radiation at positive and negative bias to the field electrode, providing the stabilizing conditions for the formation of radiation defects;

Practical results of research work is optimized low-temperature (900°C) the technology of manufacturing silicon multilayer structures of the type metal-insulator-semiconductor by adding 5% by volume vapor trichloroethylene C_2HCl_3 in the atmosphere of wet oxygen allows to obtain structures with sufficiently low density of surface States and fixed charge in the oxide compared to the structures obtained by traditional technology.

Authenticity of the obtained results is supported by use methods of photo-conductivity, infrared spectroscopy and transient capacitance spectroscopy with high sensitivity by concentration and high resolution in energy, the possibility of the separate determination of the parameters for each of the levels.

Scientific and practical value of the research results. The obtained original experimental results extend the range of ideas about the physics of local centers in semiconductors and generation of the relaxation effects in silicon and silicon multilayer structures of the type metal-insulator-semiconductor doped with non-traditional elements.

The method of separate definition of parameters of various defects in the bulk of dielectric, semiconductor, on the border of their section and in the transition layer of Si-SiO₂ multilayer structures with nonstationary capacitance spectroscopy of deep levels at a constant capacitance CC-DLTS is used to detail the parameters of mos structures.

Implementation of the research results. Based on the results of studying defect formation processes in silicon doped with non-traditional impurities - transition and rare-earth elements, as well as studies of the:

developed technology for the fabrication of a MIS structure with the addition of a small amount of chlorine to the atmosphere of dry oxygen during thermal oxidation of Si was used in JSC FOOTON of Uzeltehsanoat Joint Stock Company (Reference No. 03-1862 of JSC Uzeltehsanoat of September 13, 2017). The use of scientific results made it possible to reduce the density of surface states and increase the stability of the electrical parameters of MIS structures; effect of these impurities on the properties of silicon MIS structures:

the results obtained in the study of the formation of a positive charge in the oxide layer under the influence of ionizing radiation were used in JSC FOOTON Joint Stock Company Uzeltehsanoat to stabilize the parameters of field-effect transistors type KP 304A (Reference No. 03-1862 of JSC Uzeltehsanoat on September 13, 2017). The use of scientific results to reduce the effective mobility of charge carriers in the inverted channel of field-effect transistors of the type KP 304A in 4-5 times during irradiation has made it possible to increase the stability of electric parameters by controlling the accumulation and spreading of charges.

the developed method for the separate determination of parameters of various defects in the bulk of dielectric, semiconductor, on the border of their section and in the transition layer of Si-SiO₂ by using nonstationary capacitance spectroscopy of deep levels at a constant capacitance (CC-DLTS) is used when executing the grant F2-FA-Φ121 "Bir jinsli bolmagan mikroholatlarni shakllanishi va ularni neytronlar yordamida legirlangan kremniyning gidrogenlash paytida fundamental hossalarga tasiri" Institute of nuclear physics of Uzbekistan Academy of Sciences

(reference number FTA -01-01/555 Agency for science and technology of August 24, 2017). The use of scientific results allowed a detailed study of the heterogeneous formation of micro inclusions and their influence on the fundamental characteristics of neutron-doped silicon by hydrogenation;

based on the developed the technology of manufacturing of MIS-structures with the addition of a small amount of chlorine in the atmosphere of dry oxygen during thermal oxidation of Si is used in JSC "FOTON" Joint-stock company "Uzeltchanoat" (reference AK "Uzeltchanoat" dated 18 August 2017). The use of research results has allowed to reduce the density of surface States and improve the stability of the electrical parameters of mos structures.

Approbation of the research results. Results of the research work have been discussed at 23 international and republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. On the topic of the thesis the main contents set out in 39 scientific publications, including monographs, 15 scientific articles published in journals recommended by the Higher attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of basic scientific results of doctoral theses (the list at the end of the abstract).

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, five chapters, conclusion and a list of references. The dissertation contains 220 pages of printed text including figures and tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Зайнабидинов С.З., Далиев Х.С. Дефектообразование в кремнии. Ташкент, Университет, 1993, 191с.

2. Далиев Х.С., Лебедев А.А., Экке В. Исследование электрофизических свойств кремниевых МДП-структур, облученных γ - квантами при наличии электрического поля в диэлектрике. ФТП, 1987, т.21, в.1, с.23-29. (№11. Springer, IF: 0.603).

3. Далиев Х.С., Лебедев А.А., Экке В. Влияние термообработки на плотность радиационных дефектов в диэлектрике и на поверхности полупроводника кремниевых МДП-структур. ФТП, 1987, т.21, в.5, с.836-841. (№11. Springer, IF: 0.603).

4. Далиев Х.С., Атамуратов А.Э. Зайнабидинов С.З. Юсупов А.Ю. Ток утечки МОП транзистора и состояние межфазовой границы Si-SiO₂. Письма в журнал технической физики, 1995 г., вып.4, с75-78. (№ 2 JIF, IF: 0.771). TECHN PHYS LETT.

5. Далиев Х.С., Атамуратов А.Э., Зайнабидинов С.З., Юсупов А., Адинаев К.М. Влияние термополевой обработки и ионизирующего облучения на энергетический спектр поверхностных состояний на границе Si-SiO₂ МОП транзистора. Журнал технической физики, 1997, том 67, № 9, с.137-138. Technical Physics (№11. Springer, IF: 0.632).

6. Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Бозорова О.А., Далиев Ш.Х. Совместное влияние примесных атомов никеля и гафния на фоточувствительность кремниевых солнечных элементов. Гелиотехника, 2005, №1, с.85-87.

7. Далиев Х.С. Воздействие высокоэнергетического тормозного γ излучения на характеристики кремниевых МНОП структур ДАН РУз, 2009, в. 5, с.36-39. (01.00.00. №7)

8. Далиев Х.С. Взаимодействие атомов ванадия с различными состояниями кислорода в кремнии. Узб.физ.журн., (Uzbek Journal of Physics)Vol. 19 (№2), 2017, с. 88-91. (01.00.00.№5)

9. Daliev Kh.S. MIS-structures based on neutron-transmutation doped silicon - SCIENCE AND WORLD, International scientific journal, № 3 (43), 2017, Vol. I, p.18-20. (№ 5 GIF, IF: 0.325).

10. Daliev Kh.S. Influence of gadolinium atoms on the parameters of MOS structures. SCIENCE AND WORLD, International scientific journal, № 4 (44), 2017, Vol. I, p.15-16. (№ 5 GIF, IF: 0.325).

11. Daliev Kh.S. Spectroscopy of Defects in Semiconductors, Doped Nickel. Journal of Scientific and Engineering Research, 2017, 4(5), p.211-215. (№ 5 GIF, IF: 0.543).

12. Далиев Х.С. Емкостная спектроскопия кремниевых МДП-структур с примесью ванадия. Узб.физ.журн., Vol. 19 (№3), 2017, с. 32-38.

(01.00.00.№5).

13. Daliev Kh.S. Influence γ - irradiation on the parameters of MIS – structures with voltage and without voltage at the field electrode. J.Scientific and Engineering Research. Vol.-4, Issue-8 (2017) , p.23-32. (№ 5 GIF, IF: 0.543)

14. Daliev Kh.S. The characteristic parameters of silicon, doped with vanadium. World Journal of Engineering Research and Technology, 2017, Vol. 3, Issue 4, p. 289 -296. (№ 23 SJIF, IF: 4.326).

15. Daliev Kh.S. Radiation defect formation in silicon, doped with samarium. SCIENCE AND WORLD, International scientific journal, № 8 (48), 2017, Vol. I, p.15-16. (№ 5 GIF, IF: 0.325).

16. Daliev Kh.S. The energy spectrum of defects in silicon, doped with vanadium. World Journal of Research and Review(WJRR), 2017, Vol. 5, Issue 2, p. 54-56. (№ 23 CIF, IF: 2.026).

II бўлим (II часть, part II)

17.Зайнабидинов С.З., Абдурахманов К.П., Лебедев А.А., Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Ходжаев М.Д. Взаимодействие никеля с атомами различных элементов в кремнии. В кн.: “Свойства легированных полупроводниковых материалов”, Москва, Наука, 1990, с.19-22.

18.Далиев Х.С. Влияние примеси гадолия на характеристики кремниевых МДП-структур. Естественные и технические науки, РАН, 2009, № 2(40), с.22-24.

19.Далиев Х.С. Влияние термообработки на параметры МДП-структур на основе нейтронно-трансмутационно легированного кремния. Естественные и технические науки, РАН, 2009, №1(39), с.28-30.

20.Далиев Х.С., Зайнабидинов С.З., Лебедев А.А. О роли переходных элементов в процессах радиационного дефектообразования в кремнии. Тезисы докладов научно-технической конференции «Перспективные материалы твердотельной электроники. Твердотельные преобразователи в автоматике и робототехнике», Минск, 1990, ч.1, с.28-29.

21.Далиев Х.С. О дефектообразовании в кремнии, легированном редкоземельными элементами. Тезисы докладов научно-технической конференции «Перспективные материалы твердотельной электроники. Твердотельные преобразователи в автоматике и робототехнике», Минск, 1990, ч.1, с.29-30.

22. Daliev Kh.S. The investigation of properties of the silicon doped with samarium, gadolinium and europium Тезисы докладов I Региональной конференции Республик Средней Азии и Казахстана «Радиационная физика твердого тела», Самарканд, 1991, ч.II, с.142-143.

23.Зайнабидинов С.З., Далиев Х.С. Исследование процессов дефектообразования в кремнии, легированном примесями редкоземельных элементов. Тезисы докладов I Национальной конференции «Дефекты в полупроводниках», Санкт-Петербург, 1992, с.178.

24.Далиев Х.С., Зайнабидинов С.З. Кремний, легированный редкоземельными элементами - перспективный материал микроэлектроники. Тезисы

сы докладов Международной конференции «Современные проблемы физики полупроводников и диэлектриков», Ташкент, 1995, с.66.

25. Зайнабидинов С.З., Далиев Х.С. Емкостная и ИК-спектроскопия дефектов в кремнии и кремниевых структурах. Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы физики полупроводников и диэлектриков», Ташкент, 1995, с.147.

26. Daliev Kh.S., Utamuradova Sh.B., Daliev Sh.Kh. Capacitance transient spect-roscopy of radiation defects on the interface Si-SiO₂ of silicon MIS-structures. 8-th International «Conf. SOLID STATE PHYSICS», Алматы, Казахстан, 2004, с.86-87.

27. Далиев Х.С. О влиянии европия на свойства МДП – структур Материалы международн. конференции «Физика в Узбекистане, 2005», Ташкент, с.65-66.

28. Зайнабидинов С.З., Далиев Х.С., Далиев Ш.Х. Радиационные дефекты в многослойных структурах. «Яримўтказгичлар физикасининг фундаментал ва амалий муаммолари», Халқаро илмий-услубий конференция материаллари, Андижон, 2006, с.47.

29. Далиев Х.С. Неравновесные процессы в кремнии и кремниевых МДП-структурах, легированных нетрадиционными примесями. Тезисы докл. Междунар. конф. «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах», Ташкент, 2007, с.114-115.

30. Далиев Х.С. Возможность использования МДП-структур на основе НТЛК для производства ПЗС. Тезисы докл. Междунар. конф. «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах», Ташкент, 2007, с.150-151.

31. Daliev Kh.S. Research of physical processes in the silicon doped by non-traditional impurities and multilayered structures on its basis. Материалы 2-Международной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах», Ташкент, 2009, с.73-74.

32. Daliev Kh. Influence of High-Energy Bremsstrahlung Gamma-Radiation on MNIS – Structure Parameters. The Seventh International Conference MODERN PROBLEMS OF NUCLEAR PHYSICS, 22-25 September 2009 Tashkent, Uzbekistan, p.155-156.

33. Далиев Х.С., Пардаев У.Я., Зарифбаев Ж.Ш. Релаксационные процессы в кремнии с примесями иттербия и железа. Тезисы докл. XXII Междунар. конференции «Релаксационные явления в полупроводниках», г.Воронеж Россия, 14-17 сент., 2010, с.46.

34. Далиев Х.С. Неравновесные процессы в кремнии, легированном нетрадиционными примесями и многослойных структурах на его основе. «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари», Республика илмий-амалий анжумани материаллари, Андижон, 2015, с.106-108.

35. Далиев Х.С., Арипджанова Х.А., Равшанов Й.Р. Влияние тормозного гамма-излучения на параметры МНОП-структур. Труды респ. конф «Современные проблемы ядерной физики», Ташкент, 2015, с.21-23.

36. Daliev Kh.S. Nonequilibrium processes in silicon, doped with non-traditional impurities and multi-layered structures based on it. Symposium proceedings IPS 2016 «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects», 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan, P.146-147.

37. Daliev Kh.S., Bekmuratov M.B., Aripdjanova Kh.F. Study of relaxation processes in multilayer structures by non-stationary capacitance spectroscopy. Symposium proceedings IPS 2016 «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects», 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan, P.240-241.

38. Далиев Х.С. Физические процессы в кремнии и кремниевых многослойных структурах. Матер.Респ.научн.конф. «Неравновесные процессы в полу-проводниках и полупроводниковых структурах», Ташкент, 2017, с. 61-62.

39. Далиев Х.С., Сатимов Д. Исследование воздействия γ - облучения под напряжением на параметры кремниевых МДП- структур. Материалы Международной конференции “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”, Ташкент, 2017, с.132-135.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририяида ўзбек, рус ва инглиз (резюме) тилларида таҳрирдан ўтказилди (12.09.2017 йил).

Босишга рухсат этилди: 16.09.2017 йил
Бичими 60x45 ¹/₈, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3,25. Адади: 100. Буюртма: № 212.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.