

**ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ**

ХЎЖАНИЁЗОВ ЖУМАНАЗАР БОБОҚУЛОВИЧ

**ИОН-ИМПЛАНТАЦИЯ ҚИЛИНГАН КРЕМНИЙ ВА ЮПҚА
СИЛИЦИД ПЛЁНКАЛАРДА ЭЛЕКТРОНЛАРНИНГ ПЛАЗМАЛИ
ТЕБРАНИШЛАРИНИ УЙҒОНИШИ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2021

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

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

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

Хўжаниёзов Жуманазар Бобоқулович

Ион-имплантация қилинган кремний ва юпқа силицид плёнкаларда
электронларнинг плазмали тебранишларини уйғониши..... 3

Хужаниёзов Жуманазар Бобоқулович

Особенности возбуждения плазменных колебаний электронов в ионно-
имплантированном кремнии и в силицидных пленках..... 21

Khujaniyozov Jumanazar Bobokulovich

Features excitation of plasma oscillations of electrons in the ion-implanted
silicon and the silicide films 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 43

**ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ**

ХЎЖАНИЁЗОВ ЖУМАНАЗАР БОБОҚУЛОВИЧ

**ИОН-ИМПЛАНТАЦИЯ ҚИЛИНГАН КРЕМНИЙ ВА ЮПҚА
СИЛИЦИД ПЛЁНКАЛАРДА ЭЛЕКТРОНЛАРНИНГ ПЛАЗМАЛИ
ТЕБРАНИШЛАРИНИ УЙҒОНИШИ**

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2021

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.2.PhD/FM245 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислон Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.qarshidu.uz) ҳамда «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Рысбаев Абдурашит Сарбаевич

физика-математика фанлари доктори,
профессор

Расмий оппонентлар:

Сабиров Леонард Мухаммеджанович

физика-математика фанлари доктори,
профессор

Рахманов Ғанибой Тоджиевич

физика-математика фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

У.А. Арифов номидаги Ион – плазма ва лазер технологиялари институти

Диссертация ҳимояси Қарши давлат университети ҳузуридаги илмий даражалар берувчи PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 рақамли илмий кенгашнинг 2021 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 180119, Қарши шаҳри, Кўчабоғ кўчаси, 17-уй. Тел./факс: (99875) 225–34–13, email: kardu@mail.ru, Қарши давлат университети мажлислар зали).

Диссертация билан Қарши давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 180119, Қарши шаҳри, Кўчабоғ кўчаси, 17-уй. Тел./факс: (99875) 225 34 13.

Диссертация автореферати 2021 йил “___” _____ куни тарқатилди.
(2021 йил “___” _____ даги №___ рақамли реестр баённомаси).

М.Т. Нормурадов

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

Ғ.Х. Халимов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
илмий котиби, ф.-м.ф.н.,
катта илмий ходим

А.К. Ташатов

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги вақтда дунёда замонавий диагностик техникалар, нанотехнологиялар ва наноқурилмалар кескин ривожланмоқда. Наносоҳада электроника элементлари ўлчамларининг кичрайиши ҳисобига уларнинг кристалл ва электрон тузилиши сезиларли даражада ўзгаради. Хусусан, ион-имплантация қилинган кремнийда аралашма атомларининг концентрациясига боғлиқ равишда юзавий ва ҳажмий плазмонларнинг энергияси камайиши кузатилган. Бу жиҳатдан исталган шаклга ва таркибга эга бўлган нанозаррачаларни синтез қилиш, нанозарра ва наноструктураларнинг хоссаларини батафсил ўрганиш, компьютерда моделлаштириш ҳамда оптималлаштириш учун юзавий, ҳажмий ва локаллашган плазмонлар хоссаларини ўрганиш замонавий электрониканинг долзарб вазифаларидан бири ҳисобланади.

Жаҳон миқёсида замонавий технологияларни яратишнинг асосларидан бири бўлиб кремний монокристалларига кичик энергия ва юқори дозада металл ионларини имплантация қилиш усули билан ҳосил қилинган юпқа наноўлчамли силицид плёнкалар ҳисобланади. Юқори термик стабиллиги ва кимёвий ишлов беришларга бардошлилиги, кремний билан технологик мослиги туфайли яримўтказгичли силицид пленкалардан амалда наноэлектроника соҳасида кенг қўлланилмоқда. Шу билан бирга ноёб физик хусусиятларга эга бўлган наноплёнка ва наноматериалларни ишлаб чиқариш технологияларини ўрганишга алоҳида эътибор берилмоқда.

Республикамизда силицид плёнкалар асосида ишлайдиган янги электрон қурилмаларнинг ишлаш тамойилини, юпқа наноўлчамли қатламларда ионлар, электронлар ва фотонлар таъсирида ток ўтишида кузатиладиган электрон жараёнларни ўрганиш учун кенг қамровли илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда ва муайян натижаларга эришилмоқда. Белгиланган шаклга ва таркибга эга бўлган нанозаррачаларни синтез қилиш, нанозарра ва наноструктураларни яратиш **физик электрониканинг долзарб муаммоси** ҳисобланади. Бироқ ҳозирги вақтгача ион-имплантация қилинган кремний ва юпқа силицид плёнкаларда валент электронларнинг плазмали тебранишларининг уйғониш механизми экспериментал тўлиқ ўрганилмаган ва назарий жиҳатдан адабиётларда деярли ёритилмаган. Шунинг учун ушбу диссертация иши юқорида кўрсатилган долзарб муаммоларни ҳал қилишга бағишланган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”¹, 2017 йил 17 февралдаги № ПҚ-2789 сон “Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги ва 2019 йил 22 августдаги № ПҚ-4422 сон “Иқтисодий ва

¹Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони

ижтимоий соҳаларнинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежайдиган технологияларни жорий этиш ва қайта тикланадиган энергия манбаларини ривожлантириш бўйича тезкор чора тadbирлар тўғрисидаги” Қарор ва Фармонлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳукуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация иши муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот иши Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг: II. “Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик” ва III. “Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши” устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Металл ва яримўтказгичларда электронларнинг юзавий ва ҳажмий плазмали тебранишларини ўйғониш хусусиятларини ўрганиш соҳасидаги илмий тадқиқот ишлари дунёнинг кўплаб илмий текшириш марказларида олиб борилмоқда. Валент электронларнинг ҳажмий ва юзавий тебранишларининг ўйғониши ҳамда каттик жисмларда электрон системасининг унда ёки унинг юза яқинида ҳаракатланаётган ташқи электронга реакция қилиш муаммосини ечишда Д. Пайнс (D. Pines), Р. Ритчи (R. Ritchie), Ж. Линдхард (J. Lindhard) ва Х. Райзерлар (H. Raether) асосий ҳиссаларини қўшган. Бунда энг муҳим экспериментал натижалари N. Lieske ва R. Hezel (Германия), H. Ibach (АҚШ), А.Ю. Митягин, В.Ф. Дворянкин (Россия) ҳамда назарий натижалар D. Pines ва R. Ritchie (АҚШ), H. Raether (Германия), В.В. Румянцев ва Б.Н. Либенсон (Россия) каби олимлар томонидан олинган. Электронларни каттик жисмда характерли энергия йўқотиши плазмонларни ўйғотишга ва валент электронларни зоналараро ўтишлари билан боғлиқ бўлиши кўрсатилган. Плазмонларнинг энергияси бир ва икки компонентли каттик жисмларда валент электронларнинг концентрациясига тўғри пропорционалиги аниқланган. Етакчи назариётчи олимларнинг ишларида муҳит диэлектрик сингдирувчанлигининг мавҳум қисми электронлар плазмали тебранишларнинг сусайишини характерлаши кўрсатилган.

Ўзбекистон (Ион-плазма ва лазер технологиялари институти) олимлари А.А. Алиев ва М.К. Рузибаева томонидан юпқа мис ва кумуш плёнкаларидан қайтган ва ўтган электронларнинг характерли энергия йўқотишининг дисперсияси ўрганилган. Бунда бирламчи электронлар кичик индексли кристаллографик ўқлар бўйича ўтганда валент электронларнинг плазмали тебраниш частотасининг камайиши аниқланган. М.Т. Нормурадов ва А.С. Рисбаевлар илк бор Si(111) га катта дозали, 0,5 кэВ энергияли Na⁺ ионлари имплантация қилинганда ҳажмий ва юзавий кремний плазмонлари энергиясининг камайишини аниқлашган. Бу ҳодиса муаллифлар томонидан кремний юзасида диэлектрик сингдирувчанлиги тоза кремний диэлектрик сингдирувчанлигидан фарқланадиган кучли тартибсизланган қатлам ҳосил бўлиши билан тушунтирилган. Бироқ ион-имплантация қилинган

кремнийдаги плазмонларнинг уйғониш хусусиятлари ҳозиргача экспериментал тўлиқ ўрганилмаган ва назарий томондан тушунтириб берилмаган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети Ф–2–31-сонли “Наноўлчамли металл силицид плёнкаларнинг структураси ва физик хоссаларини ўрганиш ва термосезгир структуралар ҳосил қилиш” (2012–2016) фундаментал лойиҳаси доирасида ва “Умумий физика” кафедрасининг 2018 - 2021 йилларда режалаштирилган “Ҳар хил табиатли материалларнинг (металл, яримўтказгич, диэлектрик) электрон ва кристалл тузилиши ҳамда хоссаларини кичик энергия ва катта дозали ион имплантация ва кейинги термик, ИҚ ва лазер нурланишлар билан термоишлов бериш орқали мақсадли ўзгартириш” мавзусидаги илмий ишлар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кремнийнинг ион-имплантация қилинган қатламларида ҳамда натрий ва барий силицид плёнкаларида плазмонларнинг уйғониш хусусиятларини модели ва назарий тушунтириш.

Тадқиқотнинг вазифалари:

металл ва яримўтказгичларда, хусусан кремнийда, юзавий ва ҳажмий валент электронларнинг плазмали тебранишларини уйғониши бўйича адабиётлардаги маълумотларни таҳлил қилиш;

кичик энергия, катта дозали Va^+ ва Na^+ ионлар имплантациясини Si(111) ва Si(100) монокристаллар валент электронларининг юзавий ва ҳажмий плазмали тебранишларини уйғонишига таъсирини тажрибада аниқлаш;

ион имплантацияланган кремнийда тоза Si га нисбатан юзавий ва ҳажмий плазмонларнинг частотаси камайишини назарий тушунтириш;

турли энергиялар учун кремнийнинг ион имплантация қилинган юзавий қатламларини аморфизацияга олиб келадиган Va^+ ва Na^+ ионларини критик дозаларини ва ион имплантация қилинган қатламларнинг рекристаллизация бўлиши ва $VaSi$ ($NaSi$) силицид плёнкаларини ҳосил бўлиши учун зарур бўлган термоишлов бериш температураларини аниқлаш;

ион имплантация қилинганда ҳосил бўладиган нуқсонларнинг (кристалл структураларнинг бузилиш даражаси) кремнийнинг валент электронлари тақсимотининг максимумларини силжишига таъсирини ўрганиш;

Тадқиқотнинг объекти солиштирма қаршилиги $\rho=3000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, p ва n – типли Si(111) ва Si(100) монокристаллари.

Тадқиқотнинг предмети ион-имплантацияланган кремний валент электронларининг юзавий ва ҳажмий плазмали тебранишлари.

Тадқиқотнинг усуллари. Электрон оже-спектроскопияси (ЭОС), эластик сочилган электронлар спектроскопияси (ЭСЭС), характерли энергия йўқотган электронлар спектроскопияси (ХЭЙЭС), фотоэлектронлар спектроскопияси (ФЭС), кичик энергияли электронлар дифракцияси (КЭЭД) ва растрли электрон микроскопия (РЭМ).

Тадқиқотнинг илмий янгиллиги қуйидагилардан иборат:

одатий термик қиздириш йўли билан тозаланган кремний намунага Na^+ ва Ba^+ ионларини катта дозада киритиб, кейинчалик икки поғонада: $T=900\text{ K}$ 30 минут давомида ва $T=1550\text{ K}$ 30-60 сония давомида қиздириб Si монокристалларининг юзасини аралашма (S , O ва C) атомлардан тўлиқ тозалаш усули ишлаб чиқилган;

ионлар имплантацияси давомида кремний юза қатламлари тартибсизланиб тўлиқ аморфланиши кузатилди. Na^+ ва Ba^+ ионлари учун аморфланиш критик дозалари миқдори D_{cr} аниқланди. Ионларнинг энергияси ортиши билан D_{cr} нинг қиймати камайиши аниқланган: $E_0=0,5\text{ кэВ}$ да $D_{\text{cr}}=7\cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ (Na^+ учун), $D_{\text{cr}}=4\cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ (Ba^+ учун); $E_0=5,0\text{ кэВ}$ да $D_{\text{cr}}=0,3\cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ (Na^+ учун), $D_{\text{cr}}=0,08\cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ (Ba^+ учун);

катта дозали ионлар имплантациясида Si валент электронларининг ҳолат зичлиги кескин ўзгариши, тақиқланган зонада донорли аралашма подзона ҳосил бўлиши ва ўтказувчанлик зонасига қўшилиши натижасида тақиқланган зонанинг $0,6\text{ эВ}$ гача (барий учун) ва $0,7\text{ эВ}$ гача (натрий учун) кичрайиши, BaSi_2 ва NaSi_2 бирикмаларининг ҳосил бўлиши асосида тушунтирилган;

биринчи марта кремний монокристалл юза қатламларининг аморфланиши натижасида ҳажмий ва юзавий плазмонлар энергиясининг 15% гача камайиши аниқланган ва камайиш эффекти электрон газнинг иккисуюқлик модели асосида назарий тушунтирилган;

кичик энергияли ва катта дозали Na^+ ва Ba^+ ионлар имплантацияси таъсирида ЭСЭС максимумларининг силжишини қониқарли даражада ифодалайдиган назарий формула яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

ион-имплантация қилинган кремний плазмонлари уйғонишидаги йўқотилган энергия чўққиларини силжишига аралашма атомлари негиз электронларининг статик қутбланишининг таъсири аниқланди;

кремний валент электронлари ҳолат зичлиги максимумларининг силжиши Na^+ ва Ba^+ ионлари катта дозада имплантация қилинганда ҳосил бўладиган нуқсонлар концентрациясига боғлиқ эканлигини яхши тушунтира оладиган назарий формула яратилди;

Na^+ ва Ba^+ ионларини катта дозада имплантация қилиб, кейин юқори температурада қиздириш натижасида актив Na ва Ba атомлари кремний юза қатламларида O , S , C ва бошқа аралашма атомлари билан кимёвий боғ ҳосил қилиб биргаликда буғланиб кетишдан иборат бўлган кремний юзасини қўшимча тозалашнинг янги усули ишлаб чиқилди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий электрон спектроскопия ва кичик энергияли электронлар дифракция усуллари қўлланилганлиги, кремнийда кичик энергияли ва юқори дозали ион-имплантация қилиш давомида кузатиладиган жараёнларни Келдиш ва Фейман диаграммалари техникасидан фойдаланилганлиги, бундан ташқари ташқи заряд таъсирига қаттиқ жисм электрон газининг диэлектрик акс таъсирини назарий ҳисоблашларни замонавий усуллари билан тасдиқланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, ион-имплантация қилинган кремнийнинг юзавий ва ҳажмий плазмонларининг уйғониши ва юқори дозали ион-имплантация қилишнинг кремний валент электронлари ҳолат зичлигига таъсирини тушунтириш учун яратилган янги модел ва назариялар амалиётда кузатилган ҳодисаларни тушунтириш имконини беради;

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, Si юзасини тозалашнинг мавжуд бўлган усулларига қараганда яхшироқ тозалайдиган янги тозалаш усули ишлаб чиқилган ҳамда ишлаб чиқилган назарий модел ва формулалар тоза кремний юзасини ҳосил қилишга ва эксперимент натижаларини тўғри тасвирлашга имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши. Si монокристаллар юза ҳолатларини ва кичик энергияли Na⁺ ва Ba⁺ ионларининг имплантациясини кремнийнинг валент электронлар ҳолат зичлигига, юзавий ва ҳажмий плазмонларнинг уйғониш частотасига таъсирини ўрганиш асосида:

кичик энергия ва юқори дозали Na⁺ ва Ba⁺ ионларининг имплантациясини Si нинг юзавий ва ҳажмий плазмонлар уйғониш частотасига ва валент электронларнинг зичлик ҳолатига таъсири бўйича олинган натижалар ОТ-Ф2-53 рақамли “А³В⁵ ва А²В⁶ плёнкаларнинг сирти ва сирт ости соҳаларида ҳосил қилинган икки қатламли наноўлчамли тизимларнинг квант ўлчамли эффектлари ва электрон хоссалари” фундаментал лойиҳасини бажаришда қўлланилди (Ўзбекистон республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 18.12.2020 йилдаги №89-03-5337 сонли маълумотномаси). Яратилган ион-имплантация қилинган Si плазмонлари билан электронларнинг ўзаро таъсирлашиш модели ва Si валент электронлар ҳолати максимумларини силжиши ион-имплантация давомида ҳосил бўладиган нуқсонлар концентрациясига боғлиқлиги бўйича аниқланган назарий ҳисоблаш натижалари, кремний юзасида наноўлчамли структуралар ҳосил бўлганда экспериментда кузатилган тақиқланган зона кенглигининг камайишини тушунтириш имконини берган;

кремний монокристалли юзасини вакуумда тозалашнинг янги усули бўйича патент олинди (Кремний монокристаллари юзасини тозалаш усули. Патент № IAP 05720). Тоза, силлиқ ва мукамал Si(111) юзасини ҳосил қилиш имконини берадиган технологик режимлар ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 13 та халқаро ва 2 та Республика илмий-амалий конференцияларида муҳокама қилинди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 27 та илмий ишлар чоп этилди, шу жумладан: 1 та монография, 1 та патент, 10 та мақола, шундан 3 таси Web of Science Core Collection, Scopus базасидаги журналлардаги мақолалардир.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 40 та расм, 6 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 119 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида илмий тадқиқот ишининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, ишнинг ўрганилганлик даражаси, диссертация ишининг мақсад ва вазифалари келтирилган, объект ва предметлари тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилигини кўрсатади, натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти келтирилган. Республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган илмий ишлар, диссертация ҳажми ва тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Биринчи боб **“Кремний монокристалларидаги плазмонлар уйғониш жараёнларини тадқиқ қилиш ва тушунтириш адабиётлар таҳлили”**га бағишланган. Унда тоза ва ион-имплантация қилинган кремний валент электронларининг юзавий ва ҳажмий плазмали тебранишлари, кремний юзасида ҳар хил усуллар билан ҳосил қилинган силицид плёнкаларнинг структура ва хоссаларини ўрганишга бағишланган адабиётлар тадқиқ қилинган. Тоза яримўтказгичларда электронлар плазмали тебранишларни уйғотиш бўйича мавжуд бўлган назарий моделларга, қаттиқ жисм ичида ва юзага яқин муҳитда ҳаракатланаётган электронга, қаттиқ жисмнинг электрон системасининг акси ва электронларни энергия йўқотиш функциясини ҳисоблашга бағишланган мавжуд бўлган назарий моделларга алоҳида эътибор қаратилган.

Бобнинг охирида келиб чиқадиган хулосалар берилган, тадқиқот мақсадлари ва вазифалари қўйилган.

Иккинчи боб **“Экспериментал тадқиқот методикаси”** деб номланган бўлиб ўта юқори вакуум олиш методикаси Si монокристалли юзаларига ишлов бериш: юзани тозалаш, ион-имплантация қилиш ва кейинги термоишлов бериш усулларини намоён қилишга, ишда қўлланилган замонавий диагностик (характерли энергия йўқотган электронлар спектроскопияси, электрон оже спектроскопия, эластик сочилган электронлар спектроскопияси ва кичик энергияли электронлар дифракцияси) усулларнинг ишлаш принципи тўғрисида қисқача маълумот берилган.

Учинчи боб **“Na ва Ba ионлари билан имплантация қилинган Si юзавий қатламларининг элементли таркиби, электрон ва кристалл тузилишини тадқиқ қилиш”** деб номланган бўлиб Na^+ ва Ba^+ ионларини имплантация қилиш ва кейинги термоишлов бериш жараёнларида кузатиладиган Si(111) ва Si(100) юзасидаги кристалл тузилишининг ўзгаришлари, кремний валент электронларининг ҳажмий ва юзавий тебраниш частоталарига таъсирини ўрганиш натижаларини баён қилишга бағишланган.

Электрон асбобларни ишлаб чиқариш замонавий технологиялари тоза кремний юзасини ҳосил қилишни талаб қилади, чунки қаттиқ жисмнинг кўпгина хусусиятлари унинг юза ва юза ости қатламларининг хоссаларига: электрон ва кристалл тузилишига бевосита боғлиқ бўлади. Кремний юзасининг тозалик даражасига қуйидаги йўллар билан: кремнийни дастлабки

ишлов бериш муҳити ва кристаллнинг ўзи дастлабки тайёрлаш давомида ҳажмида мавжуд бўлган аралашма атомларининг юза қатламларига диффузия бўлиши натижасида амалга ошади. Кремний юза қатламларида энг кўп кузатиладиган аралашма атомларига қуйидагилар киради: назорат қилиб бўлмайдиган аралашма S, O, C, N атомлари ва SiO₂ плёнкаси. Юзани улардан тозалашнинг мураккаблиги ва талаб қилинадиган меҳнат даражасига қараб Si юзасининг тозаланганлик даражаси билан фарқ қиладиган, юзани тозалашнинг ҳар хил усуллари мавжуд.

Мазкур ишда кремний монокристалли юзасини ўтаюқори вакуум шароитида икки босқичда амалга ошириладиган: узоқ вақт давомида T=900 K ва қисқа вақтда 1550 K температурада қиздириб тозалашнинг амалда мавжуд бўлган тозалаш усулидан фарқ қиладиган, Si юза қатламларига Na⁺ ёки Ba⁺ ионларини имплантация қилиш орқали кремний юза қатламларида аралашма атомлари кремний ва назорат қилинмайдиган (O, N, S, C ва бошқалар) атомлари билан кимёвий боғланиб гетер қатлам ҳосил қилади ва T=1550 K ҳароратда қисқа вақт давомида қиздирилганда ўзи билан олиб кетадиган кремний монокристалли юзасини қўшимча яхши тозалайдиган янги термик тозалаш усули ишлаб чиқилди.

Si(111) ва Si(100) монокристалли юзасига 0,5 – 5 кэВ энергия билан Ba⁺ ва Na⁺ ионлари имплантация қилиш жараёнида кремний юза қатламларини кристалл тузилишини КЭЭД усули билан ўрганиш натижасида маълум бир D_{cr} критик дозадан ошганда кремний юзасининг тўлиқ аморфланиши кузатилди. Бу ҳолда КЭЭД расмида бутунлай ёруғ диффузион фон ҳосил бўлди. Ушбу турдаги ионлар учун имплантация қилинаётган ионларнинг энергияси ортиши билан белгиланган энергиядан бошлаб D_{cr} дозанинг қиймати камайиши кузатилди ва маълум бир аниқ энергиялар учун D_{cr} дозанинг қиймати Si(111) га қараганда Si(100) да катта бўлиши аниқланди. Ҳар хил энергияда Na⁺ ва Ba⁺ ионлари имплантация қилинганда Si(111) ва Si(100) намуналар юзасини аморфланиш критик дозалари D_{cr} қиймати 1-жадвалда келтирилган.

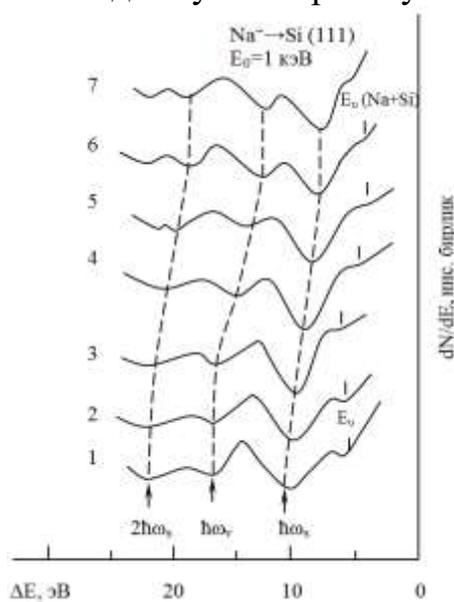
Жадвалда суратда Si(111) нинг аморфлашиш D_{cr} критик дозаси, маҳражда Si(100) нинг аморфлашиш D_{cr} критик дозаси келтирилган.

1-жадвал

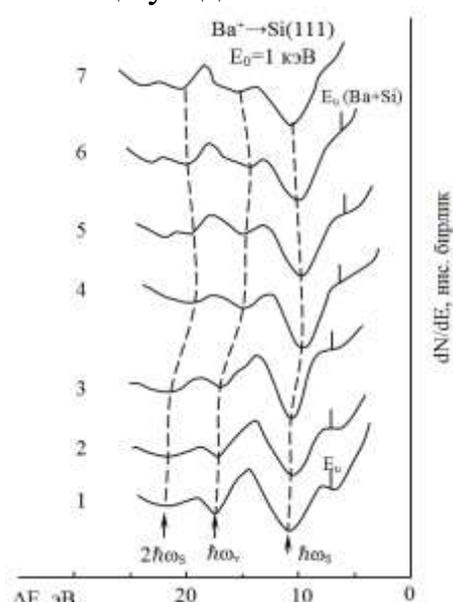
Si(111) / Si(100) юзаларининг аморфлашиш критик дозалари

Ионлар энергияси E ₀ , кэВ	Si(111) / Si(100) юзаларининг аморфлашиш критик дозалари, (D_{cr} , × 10 ¹⁵ см ⁻²).	
	Na ⁺	Ba ⁺
0,5	7 / 9	4 / 5
1,0	5 / 7	1 / 3
2,0	3 / 5	0,7 / 1
3,0	1 / 3	0,6 / 0,9
4,0	0,8 / 1,2	0,3 / 0,6
5,0	0,3 / 0,6	0,08/0,1

Na ва Ba ионларининг имплантациясини кремнийнинг валент электронларини юзавий ва ҳажмий плазмали тебраниш частотасига таъсирини аниқлаш учун хар хил энергияли E_p бирламчи электронлар нурланиши таъсирида тоза ва ион имплантация қилинган кремний намуналарининг ХЭЙЭ спектрлари олинди. Энергияси 1 кэВ хар хил доза билан D , см⁻²: 0 (1-эгри чизик), $5 \cdot 10^{13}$ (2), $5 \cdot 10^{14}$ (3), $7 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5), $8 \cdot 10^{16}$ (6) ва $2 \cdot 10^{17}$ (7), Na⁺ ва Ba⁺ ионлари билан имплантация қилинган намуналарнинг ХЭЙЭ спектри 1- ва 2- расмларда келтирилган. Спектрлар бирламчи электронларнинг энергияси $E_p = 100$ эВ да олинган. Тоза кремнийнинг ХЭЙЭ спектрида (1- эгри чизик) куйидаги энергияли чўққилар кузатилади: 7, 11, 16.5 ва 22 эВ. Бу ХЭЙЭ чўққилар валент электронларнинг юзавий ва ҳажмий плазмали тебранишларни уйғотиш ҳамда электронларни зоналараро ва зона ичидаги ўтишларини уйғотиш билан боғлиқ бўлади.



1-расм. Тоза Si(111) (1 - эгри чизик) ва $E_0 = 1$ кэВ хар хил дозада D , см⁻²: $5 \cdot 10^{13}$ (2), $5 \cdot 10^{14}$ (3), $7 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5), $8 \cdot 10^{16}$ (6), $2 \cdot 10^{17}$ (7) Na⁺ ионлари билан имплантация қилинган кремний учун ХЭЙЭ спектрлари



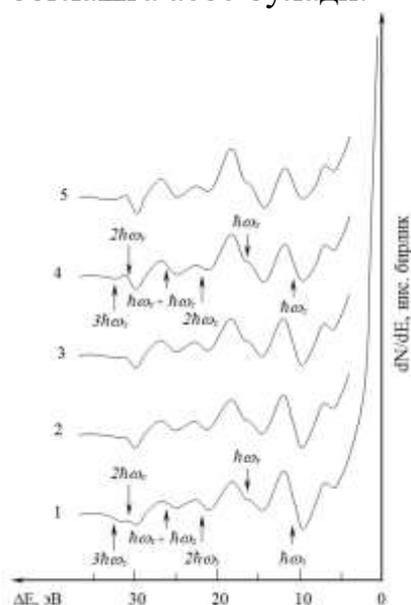
2-расм. Тоза Si(111) (1 - эгри чизик) ва $E_0 = 1$ кэВ хар хил дозада D , см⁻²: $5 \cdot 10^{13}$ (2), $5 \cdot 10^{14}$ (3), $5 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5), $8 \cdot 10^{16}$ (6), $2 \cdot 10^{17}$ (7) Ba⁺ ионлари билан имплантация қилинган кремний учун ХЭЙЭ спектрлари

Спектрларда кузатилган чўққиларнинг нима билан боғлиқ эканлигини аниқлаш учун тоза кремнийга бирламчи электронларнинг энергияси ($E_p = 30 - 300$ эВ) ва тушиш бурчаги ($\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$) ўзгартирилиб ХЭЙЭ спектрлари олинди. 3-расмда тоза кремний учун хар хил E_p : 30 эВ (1- эгри чизик), 60 эВ (2), 100 эВ (3), 200 эВ (4), 300 эВ (5) энергияларда олинган ХЭЙЭ спектрлари кўрсатилган.

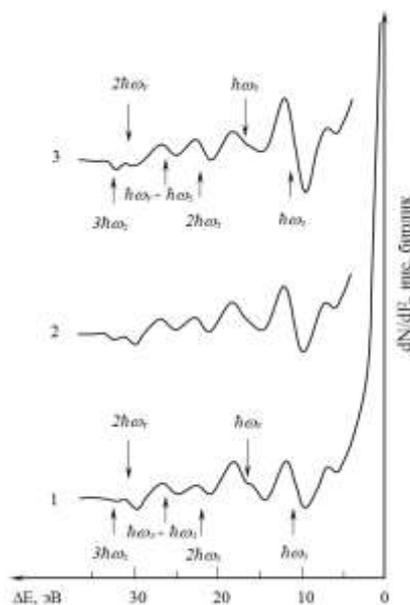
Кўриниб турибдики $E_p = 11$ эВ да кузатиладиган чўққининг интенсивлиги бирламчи электронлар энергияси ортиши билан камаяди, $E_p = 16,5$ эВ да кузатиладиган чўққининг интенсивлиги эса ортади (3-расм). Бирламчи электронларнинг тушиш бурчаги ортиши билан биринчи чўққининг интенсивлиги ортади, иккинчи чўққининг интенсивлиги эса

камаяди (4-расм). Тоза кремний ХЭЙЭ спектрида кузатилган бундай ўзгаришлар 11 эВ даги чўққини юзавий плазмонларни уйғониши билан, 16,5 эВ да кузатиладиган чўққини эса ҳажмий плазмонларни уйғониши билан боғлашга далолат бўлади. 7 эВ да кузатиладиган чўққи эҳтимол кремний валент электронларини зоналараро ўтишини уйғотиш билан боғлиқдир.

Ион имплантация қилинган кремнийнинг ХЭЙЭ спектрида 9,2 ва 13 эВ даги пикларнинг E_p энергиянинг 30 дан 300 эВ гача ортишида ва электронларнинг тушиш бурчаги ортишида кузатиладиган интенсивликларнинг ўзгариши биринчи чўққини юзавий плазмонларни уйғониши билан иккинчи чўққини эса ҳажмий плазмонларни уйғониши билан боғлашга асос бўлади.



3-расм. Тоза Si(111) учун бирламчи электронлар энергияси E_p , эВ: 30 эВ (1-эгри чизик), 60 эВ (2), 100 эВ (3), 200 эВ (4), 300 эВ (5) хар хил бўлганда олинган ХЭЙЭ спектрлари



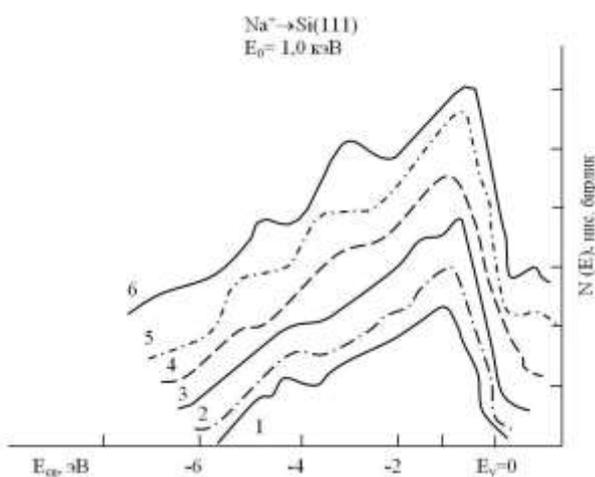
4-расм. Тоза Si(111) учун бирламчи электронлар юза нормалига нисбатан хар хил бурчакда φ , град.: 0° (1-эгри чизик), 15° (2), 30° (3) тушганда олинган ХЭЙЭ спектрлари

Шундай қилиб А.С. Рисбаев ва М.Т. Нормурадовлар томонидан илк бор аниқланган Ва ва На ионлари имплантация қилиниши натижасида кремнийнинг плазмонлари частотасининг камайиш эффекти бизнинг экспериментларда тасдиқланди.

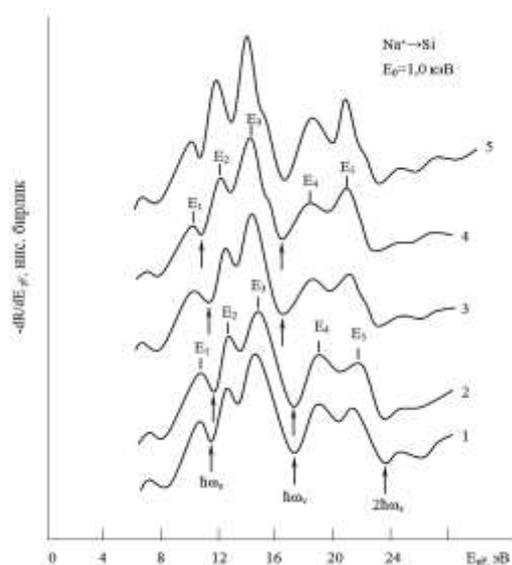
Тўртинчи боб “**Na ва Ва ионларининг кичик энергия ва юқори дозаларда имплантацияси кремний юза ҳолатига таъсири бўйича олинган экспериментал натижаларни модели ва назарий таҳлили**” деб номланган бўлиб, унда кремнийга ион-имплантация қилинган наноўлчамли қатламларнинг электрон тузилиши тўғрисидаги изланишлар натижалари тақдим қилинган. Экспериментда кузатилган юқори дозаларда Si(111) монокристаллига имплантация қилинган ионлар таъсирида плазмонлар энергиясининг камайиш эффекти назарий тушунтирилган, бундан ташқари Si валент электронларининг ҳолат зичликлари максимумининг силжишига, нуқсонлар концентрациясининг таъсири бўйича ҳисоблаш натижалари келтирилган.

1 кэВ энергияли Na^+ ионларини Si юзасига ҳар хил дозаларда имплантация қилингандаги ФЭС ва ЭСЭС спектрлари 5- ва 6- расмларда кўрсатилган. 5-расмдан кўриниб турибдики, кремний юзасига ионлар имплантация қилиниши, валент зонадаги электронлар ҳолат зичлиги ва ўтказувчанлик зоналарининг сезиларли ўзгаришига олиб келади. Валент электронлар ҳолат зичлигининг максимумлари силжиши, унинг шакли ўзгариши, янги максимумлар пайдо бўлиши кузатилади. Кремний электронларида эркин ҳолатлар зичлиги ва валент электронларнинг плазмали тебранишида ўзгариш содир бўлади, бундан ташқари кремнийнинг зонавий структура катталикларида сезиларли ўзгаришлар кузатилади.

6-расмда *n*-типтаги Si(111) га Na^+ ионлари $E_0 = 1.0$ кэВ энергия билан имплантация қилинганда ЭСЭС яъни $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ боғлиқлиги келтирилган, ионлар 0 – (1-эгри чизик), $5 \cdot 10^{14}$ см^{-2} (2), $7 \cdot 10^{15}$ см^{-2} (3), $1 \cdot 10^{16}$ см^{-2} (4) ва $8 \cdot 10^{16}$ см^{-2} (5) дозаларда киритилган. E_{pF} – кремнийнинг Ферми даражасида ўлчанган бирламчи электронлар энергияси. Расмдан кўриниб турибдики натрий ионлари дозаси ортиши билан $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ эгри чизиклари минимуми ва максимумнинг ҳолати босқичма-босқич ўзгариб боради. Тоза Si учун валент электронлар зичлик ҳолати функцияси $\rho(E)$ максимумлари, $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ эгри чизиклари максимумлари тоза кремнийдаги E_1, E_2, E_3, E_4 ва E_5 ҳолатига мос келади. Na^+ ионлари имплантацияси натижасида E_{pF} нинг кичик энергиялар соҳасига томон максимумларнинг силжиши кузатилади. Маълумки, қаттиқ жисмларнинг $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ эгри чизиги максимумлари шартли равишда валент электронларнинг зоналараро ғалаёнланишига, минимумлари эса валент электронларнинг коллектив плазмали тебранишларининг ғалаёнланишига боғлиқ бўлади. Бинобарин, Na^+ ионлари имплантацияси кремнийнинг валент электронлари ҳолатининг ўзгаришига олиб келади.



5-расм. *p* – типдаги Si(111) юзасига Na^+ ионлари $E_0 = 1.0$ кэВ энергия ва турли дозаларда имплантация қилинганда ФЭС спектри. $D, \text{см}^{-2}$: 0 – (1), $5 \cdot 10^{13}$ (2), $5 \cdot 10^{14}$ (3), $7 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5), $8 \cdot 10^{16}$ (6)



6-расм. Si(111) га Na^+ ионлари $E_0 = 1.0$ кэВ ва турли дозаларда имплантация қилинганда $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ боғлиқлиги. $D, \text{см}^{-2}$: 0 – (1), $5 \cdot 10^{14}$ (2), $7 \cdot 10^{15}$ (3), $1 \cdot 10^{16}$ (4), $8 \cdot 10^{16}$ (5)

Бундан шундай хулоса қилиш мумкинки, Va^+ ва Na^+ ионлари кичик энергия $E_0 < 5$ кэВ ва юқори дозада имплантация қилинганида, дастлабки кремнийнинг ўтказувчанлик типига боғлиқ бўлмаган ҳолда, тақиқланган зонада донор аралашмали зона ости ҳосил бўлади, ўтказувчанлик зонаси билан қопланади, яъни кучли айниган донор типдаги ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгич ҳосил бўлади. Буларнинг барчаси валент электронларнинг коллектив тебраниш энергиясининг сезиларли ўзгаришига олиб келади.

Na^+ ва Va^+ ионларини $E_0 = 1$ кэВ энергия билан юқори дозада имплантация қилиш натижасида (1 ва 2-расм) кремнийдаги ҳажмий ва юзавий плазмонларнинг энергиясини камайиш эффектини изоҳлашда электрон газнинг икки суюқликли моделидан фойдаландик. 7-расмда a қалинликдаги тоза Si билан чегараланган бузилган қатлам кўрсатилган, муҳитнинг қолган ярим қисми бузилмаган кремнийдан иборат бўлади. Расмдаги $a > z > 0$ – соҳа бузилган қатлам, $z > a$ – соҳа тоза материал.

$$\varepsilon_0(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pv}^2}{(\omega - i\nu)^2} \quad (1)$$

(1) ифода орқали тоза материалнинг ҳажмий диэлектрик сингдирувчанлигини характерлаш мумкин, бу ерда ω_{pv}^2 – тоза Si даги валент электронларнинг плазмали частотасининг квадрати, ν – системадаги тебранаётган валент электронларнинг сўниши, ω – ташқи таъсирларга муҳитда жавобан ҳосил бўладиган тебранишлар частотаси.

Ион имплантация қилинган кремний учун диэлектрик сингдирувчанликни узун тўлқинлар соҳасида қуйидагича йиғинди кўринишида ёзишимиз мумкин:

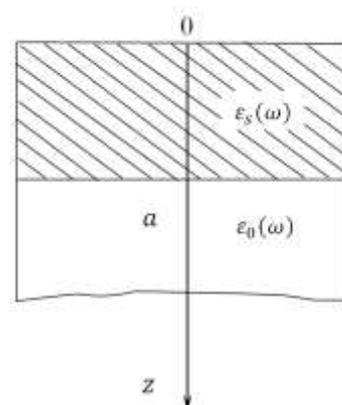
$$\varepsilon(\omega, z) = \varepsilon_0(\omega) + \varepsilon_s(z), \quad (2)$$

бу ерда $\varepsilon_0(\omega)$ – тоза кремнийнинг диэлектрик сингдирувчанлиги,

$$\varepsilon_s(z) = \frac{4\pi e^2}{m} \cdot N_{imp}(z) \cdot \sum_{l>v} \frac{Z_{эфф,l}}{(\omega_{lc}^2 - \omega_{pv}^2)} \quad (3)$$

эса, аралашма ионлари негиз электронларининг статик қутбланишини ифодалайди. Ифодадаги сумма $\sum_{l>v}$ валент зонаси остида жойлашган

аралашма ионининг барча тўлдирилган қобикларига тааллуқлидир, яъни бу ерда $\omega_{lc}^2 \gg \omega_{pv}^2$; $\omega_{pv}^2 = 4\pi e^2 N_v / m$ – кремний валент электронларининг плазмали частотасининг квадрати, ω_{lc}^2 – аралашма ионлари негиз электронларининг l – қобиғидан Si нинг ўтказувчанлик соҳасига ўтиш частотасининг квадрати, $N_{imp}(z)$ – киритилган ионларнинг чуқурлик бўйича



7-расм. Электрон газининг икки суюқликли модели.

таксимланиш профили, $Z_{\text{эфф},l} - l \rightarrow c$ ўтишда иштирок этаётган электронларнинг эффе́ктив сони.

Бу ерда кўриб чиқилган ҳолат учун плазмонлар кўзғалишининг спектрал интенсивлиги қуйидаги кўринишда бўлади:

$$I_{\omega} = -\frac{2}{(2\pi)^3 \hbar^2 v^2} \int_{-\infty}^{+\infty} dq \int_{-\infty}^{+\infty} dz \int_{-\infty}^{+\infty} dz' \exp\left[-i\frac{\omega}{v}(z-z')\right] \text{Im}D(z, z', q, \omega), \quad (4)$$

Si га ион-имплантация қилинган ички электронлар электр майдонининг Грин функцияси $D(z, z', q, \omega)$ маълум бўлса, интенсивликни аниқлаш мумкин. (4) формуладаги $\hbar\omega$ ва q – муҳитга берилган энергия ва тўлқин вектори, v – тушаётган электроннинг тезлиги.

Черенковнинг электрон билан муҳитда ҳажмий плазмонни ҳосил бўлиш жараёнини таҳлил қилиш натижасида спектрнинг чўққиси интегрални ўз ичига олган ифода кўринишида ифодаланган, бу ерда χ муҳитда учиб келаётган электрон тўлқин майдонининг фазовий сўниши ҳисобланади:

$$\begin{aligned} \text{Im} \int_0^{\infty} dz \exp(-2\chi z) \frac{1}{\varepsilon(\omega, z)} = \\ = \frac{\pi\theta[-\varepsilon_0(\omega)]\theta[\varepsilon_0(\omega) + \varepsilon_s(z_{max})]}{\left|\frac{d\varepsilon_s(z)}{dz}\right|_{z=z_0(\omega)}} \exp[-2\chi z_0(\omega)], \end{aligned} \quad (5)$$

Ион-имплантацияланган кремнийдаги ҳажмий плазмали резонанс чўққининг ҳолати, $-\varepsilon_s(z_{max}) \leq \varepsilon_0(\omega) \leq 0$ тенгсизлик билан аниқланган ғалаёнланган частоталар диапазонининг паст частоталар қисмига тўғри келади. $\varepsilon_s(z_{max})$ нинг қиймати нурланиш дозаси ортиши билан ортиб борганлиги сабабли, чўққининг кичик энергиялар томон силжиши ҳам тоза кремнийдаги $\hbar\omega_{\text{рез}}$ ҳолатига нисбатан ортади.

Бузилган қатламдаги диэлектрик сингдирувчанлик $\varepsilon(\omega)$ $\varepsilon_0(\omega)$ дан икки омил билан фарқ қилади. Биринчидан, қўлланилган Na (ёки Ba) ионлари Si билан бирикмалар ҳосил қилиб, плазмали тебранишларга $\omega_p < \omega_{pv}$ частота ва $\gamma \ll \omega_p$ сўнишига ҳисса қўшади. Иккинчидан, бузилган қатлам соҳасидаги валент электронлар соҳасида сўниш кучаяди, шунинг учун

$$\varepsilon_s(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pv}^2}{(\omega - i\gamma)^2} - \frac{\omega_p^2}{(\omega - i\gamma)^2} \quad (6)$$

бу ҳолда $\gamma > \nu$, яъни секин электронлар дифракцияси бўйича тажрибаларда мавжуд бўлиши тасдиқланадиган аморфизация натижаси ҳисобланади (1-жадвалга қаранг). Бундай аморфизация натижасида аралашмалар концентрацияси кескин ортади ва валент электронларнинг плазмали сўнувчи тебранишларига олиб келувчи бузилишлар кучли номоён бўлади.

8-расмда $A = \frac{\omega^2}{\omega_p^2} = 0,6$ ва мос равишда $\frac{\gamma}{\omega_p} = 0,5; 1,0; 1,5; 2$; учун $\text{Im} \frac{1}{\varepsilon(\omega)}$ спектрлари келтирилган. $\frac{\gamma}{\omega_p}$ нисбат 0,5 га тенг. $\frac{\gamma}{\omega_p} \geq 1$ бўлганда спектр максимумининг $\omega < \omega_p$ соҳасига силжиши кузатилади, яъни структура етарлича кучли бузилганда бузилган қатлам соҳасига томон. Шундай қилиб,

бузилган қатламдаги ҳажмий плазмон учун ХЭЙ спектрига хос бўлган характерли хусусият тоза кремний ва Ва, Na металллардаги плазмон частоталари нисбати билан бир хил тартибда бўлган валент элетронлар системасидаги кучли сўнишлар ҳисобланади.

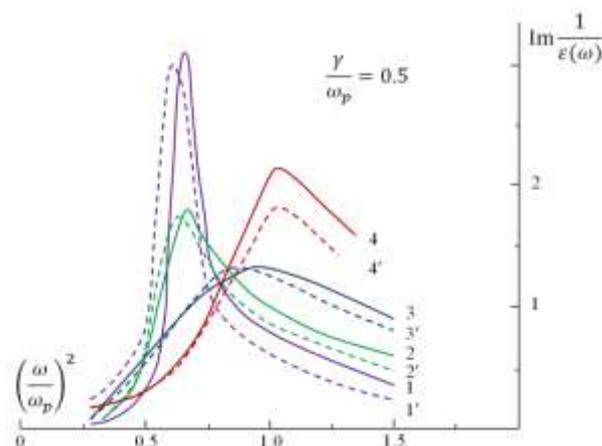
Сиртий плазмон ғалаёнланиши интенсивлигининг спектрал тақсимоти илгари маълум бўлган ифода орқали аниқланади. Ушбу ифоданинг таҳлили шуни кўрсатадики, ион легирлаш билан боғлиқ максимал қўшимча $\varepsilon_s(z_{max})$ бирдан етарлича кичик бўлганда, спектрнинг сиртий резонанс чўққиси

$$\varepsilon_0(\omega) + 1 \cong -\frac{3}{8} \frac{\omega_{pv}^2}{v^2} \left[\int_0^\infty dz \varepsilon_s(z) \right]^2, \quad (7)$$

бўлган ҳолда кузатилади.

(7) дисперсион тенгламадан келиб чиқадики сиртий резонанс чўққиси ҳолати киритилган аралашма тақсимоти профилига ўта сезгир бўлар экан. Худди шунга ўхшаш тасдиқ юқорида кўрсатиб ўтилган ҳажмий плазмон чўққиси ҳолати учун ҳам ўринлидир. Нурланиш дозасининг ортиши, яъни $\varepsilon_s(z_{max})$ катталиқнинг ортиши билан сиртий плазмон чўққисининг силжиш қонунияти худди ҳажмий плазмондаги каби паст энергиялар томон силжир экан.

2 - жадвалда $Na^+ \rightarrow Si$ ва $Ba^+ \rightarrow Si$ структураларда улар орқали уйғотиладиган электронларнинг энергия йўқотишлари спектридаги энергетик чўққиларнинг экспериментал ва ҳисоблашларда олинган қийматлари келтирилган. Нурланиш дозасининг ортиши билан чўққилар силжишининг солиштирилишидан кўринадики, ҳисоблашлар натижасида олинган қийматлар тажрибада кузатиладиган ҳажмий плазмонлар энергия чўққилари силжиши катталиқлари 10^{15} см^{-2} дозада 99 % ва 10^{16} см^{-2} дозада эса 76 % ини ташкил қилар экан. Ҳисоблаш ва экспериментал қийматлар ўртасидаги спектрдаги чўққилар силжишлари қийматлари орасидаги бундай фарқнинг сабаби валент электронлар плазмон тебранишларининг энергиялари камайишига олиб келадиган аралашма ионлари имплантацияси жараёнларида панжара доимийсининг катталашиши деб қараш мумкин. Лекин бундай эффектни назарий баҳолаш қийин масала ҳисобланади.



8-расм. $E_0 = 1$ кэВ энергияли Ba^+ ва Na^+ ионлари билан имплантация қилинган Si учун $\text{Im} \frac{1}{\varepsilon(\omega)}$ ни $\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2$ га боғланиши (4-1 ва 4'-1' эгри чизиклари мос равишда 10^{14} , 10^{15} , 10^{16} ва 10^{17} см^{-2} дозада Na^+ ва Ba^+ ионлари учун, $\frac{\gamma}{\omega_p} = 0, 5; 1, 0; 1, 5; 2$ ва $A = \frac{\omega^2}{\omega_p^2} = 0, 6$ га тенг бўлган ҳолатда).

Шундай қилиб, тавсия қилинаётган назарий модель тўла аморфизациягача олиб келадиган Si(111) кристалл структурасининг тартибсизланишига сабаб бўладиган валент электронлар тебранишларининг кучли сўниши туфайли Ва ва Na ионларининг катта дозалар билан имплантация қилиш жараёнида тажрибада кузатиладиган кремний плазмонларининг $\hbar\omega_v$ ва $\hbar\omega_s$ энергиялари камайиши эффектларини яхши тушунтиради. Айни вақтда назарий ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, ион легирланган яримўтказгиларда плазмонлар уйғотилишидаги энергия йўқотиш чўққиларининг силжишига аралашма ионлари негиз электронларининг статик кутбланиш эффекти кучли таъсир кўрсатади.

2-жадвал

Si даги ҳажмий плазмон ғалаёнланишига мос келувчи энергия чўққиларининг 1 кэВ энергияли Na⁺ ва Ва⁺ ионлари билан нурлантириш дозасига боғлиқлиги

	D, см ⁻²	C(z _{max})	z _{max} , Å	ε _s (z _{max})	ħω _{рез} , эВ	
					эксперимент	ҳисоблаш
Na ⁺	0	-	-	0	17.0	17.1
	10 ¹⁴	0.12	33	0.092	16.75	16.72
	10 ¹⁵	0.18	27	0.079	16.0	16.4
	10 ¹⁶	0.32	21	0.141	15.0	16.0
	10 ¹⁷	0.42	20	0.234	14.0	14.1
Ва ⁺	0	-	-	0	17.0	17.1
	10 ¹⁴	0.10	29	0.042	16.8	16.9
	10 ¹⁵	0.16	25	0.84	16.6	16.7
	10 ¹⁶	0.28	21	0.154	15.7	15.4
	10 ¹⁷	0.45	21	0.273	13.8	13.4

Катта дозадаги Na⁺ ионлари билан имплантацияланган кремнийни ҳам киритиш мумкин бўлган тартибланишмаган системалар энергетик спектрини назарий ифодалаш (баён қилиш) ни аралашма атомлари тасодифий майдондаги электронлар учун Келдиш диаграмма техникаси ёрдамида амалга ошириш қулайдир. Имплантацияланган қаттиқ жисмларнинг хусусиятлари кучли легирланган монокристаллар хусусиятларига яқин деб ҳисоблаб ушбу масалани етарлича соддалатиришга эришиш мумкин. Бизнинг экспериментларда ион-имплантацияда кейин кузатиладиган кремний валент электронлари ҳолати зичлиги максимумларининг силжишини (9-расмда келтирилган) умумий операторлар учун биринчи ва иккинчи тартибли ғалаёнланиш назариялари $\Sigma^{(1)}$, $\Sigma^{(2)}$ ни қўллаш орқали сифат жиҳатдан тушунтириш мумкин. Биринчи тартибли ҳад аралашманинг ўртача потенциали ҳисобига барча сатҳларнинг бир хил силжишига олиб келади. Ҳолатлар зичлиги функциясининг ўзгариши $\Sigma^{(2)}$ иккинчи тартибли ҳад билан аниқланади:

$$\rho(E, n) = 2 \int \frac{d^3\bar{k}}{(2\pi)^3} \left\{ \frac{Im\Sigma^{(2)}(\omega, \bar{k}, n)}{[\varepsilon - \varepsilon_0(\bar{k}, n - \Sigma^{(1)}(\varepsilon, \bar{k}, n)) - R_c\Sigma^{(2)}(\varepsilon, \bar{k}, n)]^2} \right\} \quad (8)$$

$$\Sigma^{(1)} = n < \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}, n >;$$

$$\Sigma^{(2)} = (\varepsilon, \bar{k}, n) = n_d \sum_{\bar{k}', n'} \frac{\langle \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}', n' \rangle}{\varepsilon - \varepsilon_0(\bar{k}', n') + i_0} \langle \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}, n \rangle \quad (9)$$

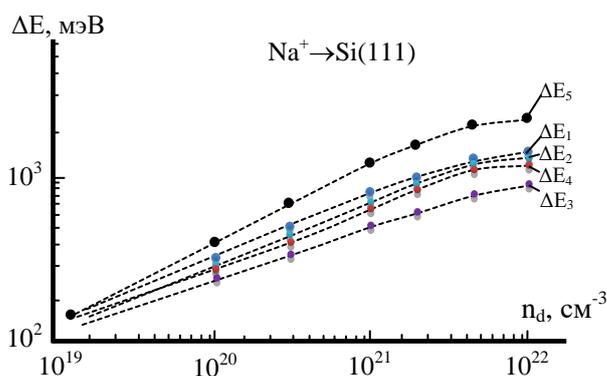
бу ерда n_d – натрий ионлари дозаси D га пропорционал бўлган дефектларнинг ўртача концентрацияси, $\langle \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}', n' \rangle$ - Блох функциялари орасидаги аралашма атомлари потенциалнинг матрик элементи. Бу ифодадан имплантлашган қаттиқ жисм ҳолатлари зичлигини аралашма атомлари концентрациясига боғлиқ ҳолда ҳисоблаш учун фойдаланиш мумкин. Шунингдек $\langle \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}', n' \rangle = \text{const}$ деб ҳисоблаб $\Sigma^{(2)}$ нинг ҳақиқий ва мавҳум қисмини тақрибан баҳолаш мумкин. Бу ердан электронларнинг ҳолат зичликлари функцияси энергетик ҳолати максимумининг силжиш катталиги ΔE ни қуйидаги ифода орқали аниқланишимиз мумкин:

$$\Delta E = R_e \Sigma^{(2)}(\varepsilon, \bar{k}, n) \cdot \frac{n_d}{(k^2 + cn_d^{1/3})^2}, \quad (10)$$

бу ерда $c = \text{const}$. Шундай қилиб сатҳлар силжиши n_d^α га пропорционал деб ҳисоблаш мумкин, бу ерда даража кўрсаткичи n_d нинг катта қийматлари учун $1/3$ дан n_d кичик қийматлари учун 1 гача оралиқда ётиши мумкин. Ҳолатлар зичлиги максимумларининг силжиши бўйича олинган экспериментал катталиклар ушбу хулосалар билан етарлича катта аниқликда мос келади.

Шундай қилиб тажрибада аниқланган катта дозадаги паст энергияли Na^+ ионлари билан имплантация қилинган кремнийнинг ЭСЭС максимумларининг силжишини $\text{Si}(111)$ нинг ион-имплантацияланган кристалл структурасининг кучли

тартибсизланишидаги аралашма атомлари тасодифий майдондаги электронлар учун Келдишнинг диаграмма техникаси асосида назарий тушунтириш мумкин. Назарий ҳисоблашлар шуни кўрсатадики ЭСЭ спектридаги энергия максимумлари силжиши $\Delta E_i \sim n_d^\alpha$ (натрий имплантацияси жараёнида ҳосил бўладиган дефектлар концентрацияси), тажриба натижалари билан яхши мос келади.



9-расм. ΔE_i максимумлар силжиши катталикларининг $E_0 = 1$ кэВ энергияли Na^+ ионлари билан имплантация қилиш жараёнида $\text{Si}(111)$ да ҳосил бўладиган дефектлар концентрациясига боғлиқлиги.

ХУЛОСА

1. Кремний монокристаллари юзасини ўтаюқори вакуум шароитида икки босқичда: Si узоқ вақт давомида $T = 900$ К ва қисқа вақт ичида $T = 1550$ К қиздирилгандан кейин, Ва ионлари ёки ишқорий элементларни имплантация қилиш орқали сирт олди кремний ва назорат қилинмайдиган аралашма атомлари (O, N, S, C ва бошқалар) билан барқарор кимёвий

- бирикмалар ҳосил қиладиган гетер қатлам ҳосил қилинади ва $T = 1550$ К да қисқа муддатли қиздирилиб улар билан бирга олиб ташланади, амалга ошириладиган термик тозалашнинг янги усули ишлаб чиқилди, бу Si юзасини кўшимча тозалаш имконини беради;
2. 0,5-5 кэВ энергияли Ba^+ ва Na^+ ионлари билан имплантациялаш жараёнида Si(111) ва Si(100) сиртлари кристалл тузилишидаги ўзгаришларни КЭЭД усули билан ўрганилганда маълум бир D_{cr} критик дозадан бошлаб кремний юзаси тўлиқ аморф ҳолатга ўтиши кўрсатиб берилди. Ушбу турдаги ионлар учун имплантация қилинаётган ионлар энергиясининг ортиши билан белгиланган энергиядан бошлаб D_{cr} нинг қиймати камайиши ва маълум бир аниқ энергиялар учун D_{cr} нинг Si(100) учун қиймати Si(111) дагига қараганда катта бўлиши аниқланди;
 3. Ba ва Na ионларининг D_{cr} критик имплантациялаш дозаларидан бошлаб асосий қуйи энергияли $SiL_{2,3VV}$ чўққининг сингленд шаклдан дуплет шаклга босқичма-босқич ўтиши ва $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (Na ҳолида) ҳамда $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (Ba ҳолида) тугалланадиган силицидлар ҳосил бўлиши жараёни бошланиши кўрсатиб берилди;
 4. Катта дозадаги ($6 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) 1 кэВ энергияли Ba^+ ва Na^+ ионлари имплантацияси жараёнида кремнийнинг сирт олди қатламларида 45 – 50 Å аморф структура қалинлигидаги барий силицид пленкаларининг ҳосил бўлиши аниқлаб берилди. Ион-имплантацияланган кремнийни 1100 К (Ba) ва 900 К (Na) температураларда қисқа муддатли қиздириш Si(100)- 2×2 Ba, Si (111)- 1×1 Ba ва Si(100)- 4×4 Na, Si(111)- 4×4 Na янги ўта сиртий структурали барий ва натрий силицидларнинг металл наноўлчамли плёнкалари шаклланишига олиб келар экан;
 5. Биринчи марта эластик сочилган электронлар ва фотоэлектронлар спектрлари таҳлили асосида наноўлчамли барий ва натрий силицид плёнкаларининг энергетик параметрлари (термо-, фотоэлектрон чиқиш иши, электронга мойиллиги ва таъқиқланган зона кенлиги) аниқланди;
 6. Назарий ҳисоблашлар айти вақтда шуни кўрсатадики, ион легирланган яримўтказгичларда плазмонлар уйғотилишидаги энергия йўқотиш чўққиларининг силжишига аралашма ионлари негиз электронларининг статик кутбланиш эффекти кучли таъсир кўрсатар экан, тўла аморфизациягача олиб келадиган Si(111) кристалл структурасининг тартибсизланишига сабаб бўладиган валент электронлар тебранишларининг кучли сўниши туфайли Ba ва Na ионларининг катта дозалар билан имплантация қилиш жараёнида тажрибада кузатиладиган кремний плазмонларининг $\hbar\omega_v$ ва $\hbar\omega_s$ энергиялари камайиш эффектларини яхши тушунтирадиган назарий модель ишлаб чиқилди;
 7. Тажрибада аниқланган катта дозадаги паст энергияли Na^+ ионлари билан имплантация қилинган кремнийнинг ЭСЭС максимумларининг силжишини Si(111) нинг ион-имплантацияланган кристалл структурасининг кучли тартибсизланишидаги аралашма атомлари тасодифий майдондаги электронлар учун Келдишнинг диаграмма техникаси асосида назарий тушунтирилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ КАРШИНСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ХУЖАНИЁЗОВ ЖУМАНАЗАР БОБОКУЛОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
ЭЛЕКТРОНОВ В ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОМ КРЕМНИИ И В
СИЛИЦИДНЫХ ПЛЕНКАХ**

01.04.04 – Физическая электроника

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

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрировано в высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2018.2.PhD/FM245.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.qarshidu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Рысбаев Абдурашит Сарбаевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сабиров Леонард Мухаммеджанович**
доктор физико-математических наук, профессор

Рахманов Ганибой Тоджиевич
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: **Институт ионно – плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 г. в ___ часов на заседании Научного совета PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 по присуждению ученых степеней при Каршинском государственном университете. Адрес: 180119, г. Карши, ул. Кучабог, 17. Тел./Факс: (99875) 225–34–13, e-mail: kardu@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Каршинском государственном университете (зарегистрирована за № ___). Адрес: 180119, г. Карши, ул. кучабог, 17. Тел./Факс: (99875) 225–34–13, e-mail: kardu@mail.ru.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2021 г.
(реестр протокола рассылки №__ от «___» _____ 2021 г.)

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

Г.Х. Халимов
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, к.ф.-м.н., с.н.с.

А.К. Ташатов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире интерес к исследованию поверхностных, объемных и локализованных плазмонов все более и более возрастает с каждым годом. Это связано, в первую очередь, с бурным развитием современных нанотехнологий, которые позволяют синтезировать и создавать наночастицы фактически любой формы и состава. Во вторых, с достижениями современной диагностической техники, которая позволяет детально характеризовать свойства отдельных наночастиц и наноструктур. И в третьих, с развитием компьютерных методов, позволяющих предсказывать и оптимизировать свойства наночастиц и основанных на них наноустройств. Поэтому, изучение свойств поверхностных, объемных и локализованных плазмонов является одной из актуальных задач современной электроники.

На сегодняшний день в мировой науке и технологии одним из наиболее перспективных технологических способов создания нанопленок и наноматериалов, обладающих уникальными физическими свойствами является низкоэнергетическая, высокодозная имплантация ионов металлов в монокристаллы кремния, позволяющая создавать тонкие наноразмерные пленки силицидов металлов. Благодаря высокой термической стабильности и стойкости к химическим обработкам, технологической совместимости с кремнием, практическое использование физических свойств полупроводниковых силицидов лежит в области наноэлектроники.

В нашей Республике активно проводятся научно-исследовательские работы по изучению электронных процессов, возникающих при протекании электрического тока в электронных приборах, на основе тонких пленок силицидов, вызванных воздействием заряженных частиц и фотонов и получены некоторые результаты. Синтез наночастиц и наноструктур с заданными формами, составом и свойствами и их всестороннее исследование является **актуальной проблемой физической электроники**. Однако, до настоящего времени механизм возникновения плазменных колебаний валентных электронов в ионно имплантированном кремнии и в тонких силицидных пленках не достаточно изучены экспериментально, а теоретически в литературе практически отсутствуют такие данные. Поэтому, данная диссертационная работа посвящена решению вышеуказанных актуальных проблем.

Данное диссертационное исследование в достаточно определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении и Указе Президента Республики Узбекистан №УП-4947 «[О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан](#)» от 7 февраля 2017 года², №ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года и № ПП-4422 «Об

²Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «[О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан](#)».

ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» от 22 августа 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в Республике за последние годы в данной сфере.

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан: II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и III. Развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Научные исследования в области изучения особенностей возбуждения поверхностных и объемных плазменных колебаний электронов в металлах и полупроводниках проводятся во многих мировых научных центрах. основополагающий вклад в решение задачи о возбуждении объемных и поверхностных колебаний валентных электронов и об отклике электронной системы твердого тела на движущийся в нем или вблизи его поверхности внешний электрон внесли исследования Д. Пайнс (D. Pines), Р. Ритчи (R. Ritchie), Дж. Линдхард (J. Lindhard) и Х. Райзер (H. Raether). При этом наиболее значительные экспериментальные результаты получены: N. Lieske и R. Hezel (Германия), H. Ibach (США), А.Ю. Митягин и В.Ф. Дворянкин (Россия), а теоретические результаты получены: D. Pines и R. Ritchie (США), H. Raether (Германия), В.В. Румянцев и Б.Н. Либенсон (Россия). Показано, что пики характеристических потерь энергии электронов обусловлены возбуждением плазмонов и междужонных переходов валентных электронов, а энергия плазмонов пропорциональна концентрации электронов, как в однокомпонентных, так и в двухкомпонентных твердых телах. В теоретических работах ведущих ученых показано, что мнимая часть диэлектрической проницаемости среды характеризует затухание плазменных колебаний.

Учеными Узбекистана, в частности, А.А. Алиевым и М.К. Рузибаевой (Институт ионно-плазменных и лазерных технологий) исследована дисперсия характеристических потерь энергии при отражении и прохождении электронов через тонкие пленки меди и серебра. Обнаружено уменьшение частоты плазменных колебаний валентных электронов в случаях, когда первичный электрон проходит кристалл вдоль кристаллографической оси с малыми индексами. М.Т. Нормурадовым и А.С. Рысбаевым впервые было обнаружено уменьшение энергии возбуждения объемных и поверхностных плазмонов Si(111) при имплантации ионов Na с энергией 0,5 кэВ с большой дозой, которое объясняется возникновением достаточно толстого нарушенного слоя, диэлектрическая проницаемость которого отличается от диэлектрической проницаемости чистого материала. Однако, особенности возбуждения плазмонов в ионно-имплантированном кремнии до сих пор полностью экспериментально не изучены и теоретически не объяснены.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Ташкентском государственном техническом университете им. Ислама Каримова в рамках фундаментального проекта Ф – 2-31 «Исследование структуры и физических свойств наноразмерных пленок силицидов металлов и разработка термочувствительных структур» (2012-2016 гг.) и в рамках научного плана кафедры «Общая физика» на 2018-2021 гг. «Модификация электронной, кристаллической структуры и свойств материалов различной природы (металл, полупроводник, диэлектрик) имплантацией ионов с низкой энергией, большой дозой и последующим термическим, ИК и лазерным отжигом».

Целью исследования является модельная и теоретическая интерпретация особенностей возбуждения плазмонов в ионно-имплантированных слоях кремния и в пленках силицидов натрия и бария.

Задачи исследования:

проанализировать существующие литературные данные о возбуждении поверхностных и объемных плазменных колебаний валентных электронов в металлах и полупроводниках, в частности в кремнии;

экспериментально установить влияние имплантации низкоэнергетической высокодозной имплантации ионов Ba^+ и Na^+ на возбуждение поверхностных и объемных плазменных колебаний валентных электронов в монокристаллах Si(111) и Si(100);

теоретически объяснить эффект уменьшения частоты поверхностных и объемных плазмонов в ионно-имплантированном Si по сравнению с чистым кремнием;

установить критические дозы облучения ионов Ba^+ и Na^+ , приводящие к аморфизации приповерхностного ионно-имплантированного слоя Si для различных энергий ионов и температуру последующего отжига, приводящего к рекристаллизации и образованию силицидной пленки BaSi (NaSi);

определить влияние дефектов, образующихся при ионной имплантации (степени разупорядоченности кристаллической структуры) кремния на сдвиг максимумов плотности состояний валентных электронов Si.

Объектами исследования были монокристаллы Si(111) и Si(100), *p* и *n* – типа.

Предметом исследования являются особенности возбуждения поверхностных и объемных плазменных колебаний валентных электронов в ионно-имплантированном кремнии.

Методы исследований. Электронная оже-спектроскопия (ЭОС), спектроскопия упруго-рассеянных электронов (СУРЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС), дифракция медленных электронов (ДМЭ) и растровая электронная микроскопия (РЭМ).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан новый способ вакуумной очистки поверхности монокристаллов Si от атомов примесей (S, O и C), который заключается сначала в проведении имплантации ионов Ba^+ и Na^+ с большой дозой в очищенные традиционным термическим прогревом образцы кремния и последующем термическом прогреве в два этапа: длительно в течении 30 минут при температуре $T=900$ К и кратковременно в течении 30-60 секунд при $T=1550$ К;

обнаружено, что начиная с некоторой критической дозы D_{cr} имплантации ионов Ba^+ и Na^+ происходит полная аморфизация поверхностного слоя Si. Значение D_{cr} уменьшается с увеличением энергии ионов: при $E_0=0,5$ кэВ $D_{cr}=7 \cdot 10^{15}$ см⁻² (для Na^+), $D_{cr}=4 \cdot 10^{15}$ см⁻² (для Ba^+); при $E_0=5,0$ кэВ $D_{cr}=0,3 \cdot 10^{15}$ см⁻² (для Na^+), $D_{cr}=0,08 \cdot 10^{15}$ см⁻² (для Ba^+);

показано, что при больших дозах ионной имплантации Si наблюдается существенное изменение плотности состояний валентных электронов, в запрещенной зоне образуется донорная примесная подзона, которая перекрываясь с зоной проводимости Si, приводит к сужению запрещенной зоны до 0,6 эВ (в случае имплантации Ba) и до 0,7 эВ (в случае имплантации ионов Na), что объясняется образованием соединений типа $BaSi_2$ и $NaSi_2$;

впервые, на основе двухжидкостной модели электронного газа, дана теоретическая интерпретация наблюдаемому в эксперименте эффекту уменьшения до 15% энергии поверхностных и объемных плазмонов в приповерхностных слоях кремния вызванного их аморфизацией;

получено теоретическое выражение удовлетворительно описывающее обнаруженное экспериментально смещение максимумов СУРЭ кремния при имплантации низкоэнергетических ионов Na^+ и Ba^+ с большой дозой.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

установлено влияние эффекта статической поляризации остовных электронов примесных атомов на сдвиг энергий пиков потерь на возбуждение плазмонов в ионно-имплантированном кремнии;

получена теоретическая формула хорошо описывающая сдвиг максимумов плотности состояний валентных электронов кремния в зависимости от концентрации дефектов вносимых имплантацией ионов Na^+ и Ba^+ с большой дозой;

разработан новый способ очистки поверхности кремния, заключающийся в имплантации ионов Na^+ и Ba^+ с большой дозой и последующем прогреве при высокой температуре в результате которого активные атомы Na и Ba удаляются из приповерхностной области Si образуя соединения с атомами неконтролируемых примесей (O, S, C и др.).

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных методов электронной спектроскопии и дифракции медленных электронов, а также теоретическим рассмотрением процессов, происходящих в кремнии при низкоэнергетической и высокодозной имплантации с применением диаграммной техники Келдыша и Феймана и современных теоретических подходов расчета диэлектрического отклика электронного газа твердого тела на действие внешнего заряда.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость исследований заключается в создании модели и новых теоретических представлений об особенностях возбуждения поверхностных и объемных плазмонов в ионно-имплантированном Si и о влиянии высокодозной ионной имплантации на плотность состояний валентных электронов кремния.

Практическая значимость исследований заключается в разработке нового способа очистки поверхности кремния, позволяющего достигнуть более глубокой очистки поверхности Si по сравнению с существующими способами очистки, а также в создании теоретической модели и формул, хорошо описывающих экспериментальные результаты.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов исследований состояния поверхности монокристаллов Si и воздействия низкоэнергетических ионов Na^+ и Ba^+ на плотность состояний валентных электронов и частоту возбуждения поверхностных и объемных плазмонов Si:

результаты исследования влияния низкоэнергетической высокодозной имплантации ионов Na^+ и Ba^+ на энергию возбуждения плазмонов и на плотность состояний валентных электронов Si использованы при выполнении фундаментального проекта ОТ-Ф2-53 «Квантово-размерные эффекты и электронные свойства двухслойных наноразмерных структур на поверхности и в приповерхностной области пленок A^3B^5 и A^2B^6 » (Справка № 89-03-5337 Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 18.12.2020 г.). Разработанная теоретическая модель взаимодействия электронов с плазмонами ионно-имплантированного Si и результаты теоретического расчета сдвига максимумов плотности состояний валентных электронов от концентрации дефектов, образующихся в процессе ионной имплантации позволили объяснить экспериментально обнаруженное увеличение ширины запрещенной зоны Si при образовании на поверхности наноразмерных структур;

получен патент на новый способ вакуумной очистки поверхности монокристаллов кремния (Способ очистки поверхности монокристаллов кремния / Патент № IAP 05720). Использование разработанных технологических режимов обработки и очистки позволяет получить чистую, гладкую и совершенную поверхность Si(111).

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были обсуждены на 13 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По материалам диссертации опубликованы 27 научных трудов, 1 монография, 1 патент, 10 статей, из них 3 статьи в журналах, входящих в базу Web of Science Core Collection, Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 119 страницах текста, набранного на компьютере, включая 40 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описана степень изученности проблемы, приводится связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, приводится научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

Первая глава **«Обзор литературы по исследованию и интерпретации процесса возбуждения плазмонов в монокристаллах кремния»** посвящена краткому литературному обзору работ, посвященных исследованию особенностей возбуждения поверхностных и объемных плазменных колебаний валентных электронов в чистом и ионно-имплантированном кремнии, структуры и свойств пленок силицидов металлов на кремнии, полученных различными способами. Большое внимание уделяется существующим теоретическим моделям возбуждения плазменных колебаний в чистых полупроводниках, об отклике электронной системы твердого тела на движущийся в нем или вблизи его поверхности внешний электрон и о расчете функции потерь энергии электронами.

В конце главы приводятся выводы из обзора, цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава **«Методика экспериментальных исследований»** посвящена описанию методики получения сверхвысокого вакуума, методов обработки поверхности: очистки поверхности монокристалла Si, ионной имплантации и последующего отжига, а также краткому описанию принципа работы, использованных современных методов диагностики поверхности и приповерхностной области монокристаллов Si: спектроскопии характеристических потерь энергии электронов, электронной оже-спектроскопии, спектроскопии упруго рассеянных электронов и дифракции медленных электронов.

Третья глава **«Исследование элементного состава, электронной и кристаллической структуры приповерхностной области Si, имплантированного ионами Na и Ba»** посвящена исследованию изменения кристаллической поверхности Si(111) и Si(100), наблюдаемых в процессе имплантации ионов Na^+ , Ba^+ и последующего термического отжига, на частоту объемных и поверхностных плазменных колебаний валентных электронов кремния.

Современные технологии изготовления электронных приборов требуют получения чистой поверхности кремния. Это связано с тем, что многие свойства твердых тел определяются состоянием их поверхности и приповерхностной области: электронной и кристаллической структурой. Источниками загрязнения поверхности могут быть: окружающая среда либо среда, используемая для предварительной обработки и сам кристалл, примесные атомы которого из объема могут диффундировать в

приповерхностную область. Наиболее часто встречающимися примесями в Si являются: пленка SiO₂, неконтролируемые примеси C, O, S, N. Известны различные способы очистки поверхности Si, отличающиеся степенью достижения чистоты поверхности, сложностью и трудоёмкостью выполнения.

Нами разработан новый способ очистки поверхности монокристаллов кремния, заключающийся в проведении термической очистки кремния в условиях сверхвысокого вакуума в два этапа: длительно при T=900 К и кратковременно при T=1550 К и отличающийся последующем созданием приповерхностном слое геттерирующего слоя имплантацией ионов Na⁺ или Ba⁺ в Si, которые образуют устойчивые химические соединения с кремнием и атомами неконтролируемых примесей (O, N, S, C и др.) и удаляются вместе с ними после кратковременного прогрева при T=1550 К, приводя к дополнительной очистке поверхности Si.

При исследовании изменения кристаллической структуры поверхности Si(111) и Si(100) методом ДМЭ в процессе имплантации ионов Ba⁺ и Na⁺ с энергией 0,5 – 5 кэВ было установлено, что начиная с некоторой критической дозы ионов D_{cr} , поверхность кремния полностью аморфизуется. При этом на картине ДМЭ наблюдается полностью диффузный фон. Обнаружено, что для данного типа ионов величина D_{cr} уменьшается с ростом энергии имплантируемых ионов и при фиксированной энергии, D_{cr} для Si(100) больше, чем для Si(111). В таблице 1 приведены значения D_{cr} для поверхности Si(111) и Si(100) при имплантации ионов Na⁺ и Ba⁺ с разной энергией.

Значение величины D_{cr} в числителе дроби в таблице соответствует дозе аморфизации Si(111), а значение в знаменателе соответствует дозе аморфизации Si(100).

Таблица 1

Значения критической дозы аморфизации поверхности Si(111) / Si(100)

Энергия ионов E ₀ , кэВ	Значения дозы аморфизации поверхности Si(111) / Si(100), (D_{cr} , × 10 ¹⁵ см ⁻²).	
	Na ⁺	Ba ⁺
0,5	7 / 9	4 / 5
1,0	5 / 7	1 / 3
2,0	3 / 5	0,7 / 1
3,0	1 / 3	0,6 / 0,9
4,0	0,8 / 1,2	0,3 / 0,6
5,0	0,3 / 0,6	0,08/0,1

Для исследования влияния имплантации ионов Na и Ba на частоту объемных и поверхностных плазменных колебаний валентных электронов кремния были сняты спектры ХПЭЭ для чистого и ионно-имплантированных образцов Si при различных энергиях E_p. На рисунках 1 и 2 приведены

спектры ХПЭ для Si(111) имплантированных ионами Na^+ и Ba^+ с энергией $E_0 = 1$ кэВ с различной дозой облучения D , см^{-2} : 0 (кривая 1), $5 \cdot 10^{13}$ (2), $5 \cdot 10^{14}$ (3), $7 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5), $8 \cdot 10^{16}$ (6) и $2 \cdot 10^{17}$ (7), снятые при энергии первичных электронов $E_p = 100$ эВ. На спектре ХПЭЭ чистого кремния (кривая 1) наблюдаются пики с потерями энергии: 7, 11, 16.5 и 22 эВ. Эти пики ХПЭЭ могут быть обусловлены возбуждением поверхностных и объёмных плазменных колебаний валентных электронов, а также возбуждением междузонных и внутризонных переходов.

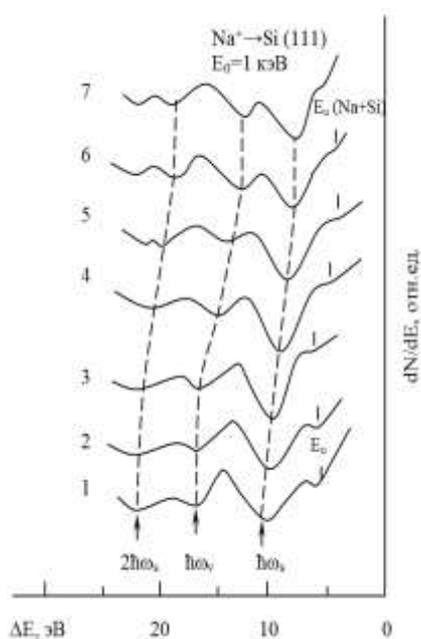


Рис. 1. Спектры ХПЭ для чистого Si(111) (кривая 1) и Si, имплантированного ионами Na^+ с $E_0 = 1$ кэВ с различной дозой D , см^{-2} : $5 \cdot 10^{13}$ (2), $5 \cdot 10^{14}$ (3), $7 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5), $8 \cdot 10^{16}$ (6), $2 \cdot 10^{17}$ (7)

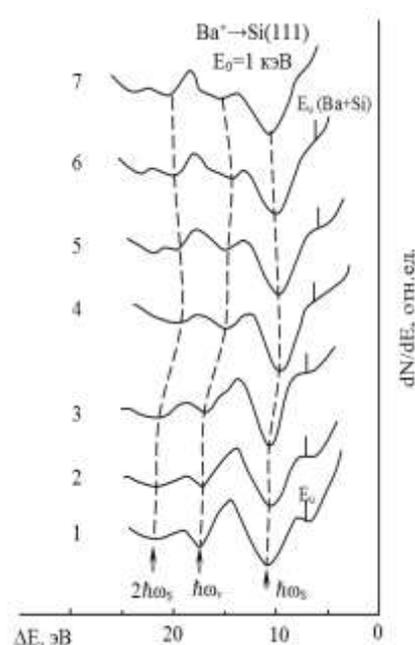


Рис. 2. Спектры ХПЭ для чистого Si(111) (кривая 1) и Si, имплантированного ионами Ba^+ с $E_0 = 1$ кэВ с различной дозой D , см^{-2} : $5 \cdot 10^{13}$ (2), $5 \cdot 10^{14}$ (3), $5 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5), $8 \cdot 10^{16}$ (6), $2 \cdot 10^{17}$ (7)

Для идентификации пиков нами были сняты спектры ХПЭ для чистого Si(111) при различных энергиях ($E_p = 30 - 300$ эВ) и углах ($\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$) падения первичных электронов. На рис. 3 приведены спектры ХПЭЭ для чистого Si, снятые при различных E_p : 30 эВ (кривая 1), 60 эВ (2), 100 эВ (3), 200 эВ (4), 300 эВ (5).

Видно, что интенсивность пика при $E_p = 11$ эВ с ростом энергии первичных электронов уменьшается, а интенсивность пика при $E_p = 16,5$ эВ увеличивается (рис. 3), а также интенсивность первого пика с увеличением угла падения первичных электронов увеличивается, а интенсивность второго пика уменьшается (рис. 4). Подобные изменения говорят о том, что пик при 11 эВ в спектре ХПЭЭ чистого кремния обусловлен возбуждением поверхностных плазмонов, а пик при 16,5 эВ обусловлен возбуждением объёмных плазмонов. Пик при 7 эВ вероятно связан с возбуждением межзонных переходов валентных электронов Si.

А характер изменения интенсивностей пиков при 9,2 и 13 эВ с увеличением энергии E_p от 30 до 300 эВ и угла падения первичных электронов позволил нам считать первый пик обусловленным с возбуждением поверхностного плазмона, а второй - возбуждением объемного плазмона в ионно - имплантированном Si.

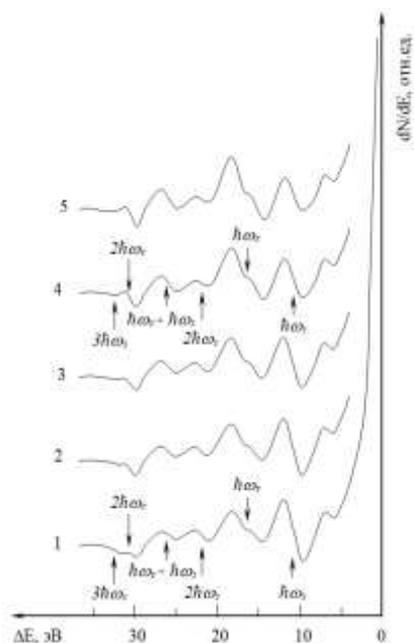


Рис. 3. Спектры ХПЭЭ для чистого Si(111), снятые при различных энергиях первичных электронов E_p , эВ: 30 эВ (кривая 1), 60 эВ (2), 100 эВ (3), 200 эВ (4), 300 эВ (5)

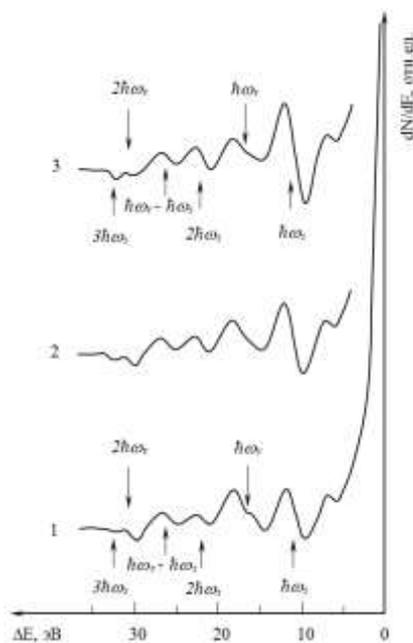


Рис. 4. Спектры ХПЭЭ для чистого Si(111), снятые при различных углах падения первичных электронов относительно нормали к поверхности φ , град.: 0° (кривая 1), 15° (2), 30° (3)

Таким образом, в наших экспериментально подтвержден, эффект уменьшения частоты плазмонов кремния при имплантации ионов Ва и Na, впервые обнаруженный А.С. Рысбаевым и М.Т. Нормурадовым.

В четвертой главе «**Модельная и теоретическая интерпретация экспериментальных результатов по влиянию низкоэнергетической и высокодозной имплантации ионов Na и Ва на состояние поверхности кремния**» приводятся результаты исследований особенностей электронной структуры наноразмерных ионно – имплантированных слоев в кремнии, дано теоретическое объяснение наблюдаемому экспериментально эффекту уменьшения энергии плазмонов Si(111) при имплантации ионов с большой дозой, а также приводятся результаты расчета влияния концентрации дефектов на сдвиг максимумов плотности состояний валентных электронов Si.

На рис. 5 и 6 приведены спектры ФЭС и СУРЭ Si, снятые в процессе имплантации ионов Na^+ с энергией 1 кэВ с различной дозой облучения. Видно что, имплантация ионов приводит к существенному изменению плотности электронных состояний в валентной зоне и зоне проводимости кремния: наблюдается сдвиг максимумов плотности состояний валентных электронов, изменяется их форма, появляются новые максимумы, изменяется

плотность свободных состояний и частота плазменных колебаний валентных электронов Si, а также происходит существенное изменение параметров зонной структуры (рис. 5).

На рис. 6 приведены спектры СУРЭ т.е. зависимости $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ для чистого Si(111), *n*-типа (кривая 1) и Si(111), имплантированного ионами Na⁺ с $E_0 = 1.0$ кэВ с различными дозами D : $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² (кривая 2), $7 \cdot 10^{15}$ см⁻² (3), $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² (4) и $8 \cdot 10^{16}$ см⁻² (5). E_{pF} – энергия первичных электронов, отсчитанная от уровня Ферми кремния. Видно, что с ростом дозы ионов натрия постепенно меняются форма и положения максимумов и минимумов кривой $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$. Положения максимумов кривой $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ для чистого Si, обозначенные через E_1, E_2, E_3, E_4 и E_5 хорошо совпадают с максимумами функции плотности состояний валентных электронов $\rho(E)$ для чистого Si. В результате имплантации ионов Na⁺ наблюдается сдвиг положений максимумов в область меньших энергий E_{pF} . Известно, что максимумы на кривой зависимости $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ обусловлены возбуждением межзонных переходов валентных электронов, а минимумы - возбуждением коллективных плазменных колебаний валентных электронов твердого тела. Следовательно, имплантация ионов Na⁺ приводит к изменению электронных состояний в кремнии.

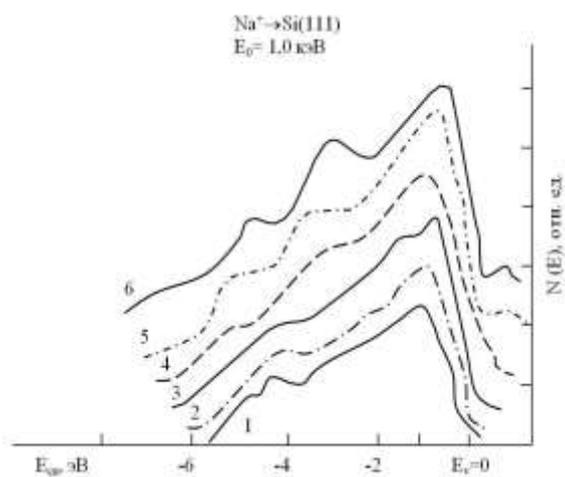


Рис. 5. Спектры ФЭС для Si(111), *p*-типа, имплантированного ионами Na⁺ с $E_0 = 1.0$ кэВ с различной дозой D , см⁻²: 0 – (кривая 1), $5 \cdot 10^{13}$ (2), $5 \cdot 10^{14}$ (3), $7 \cdot 10^{15}$ (4), $1 \cdot 10^{16}$ (5), $8 \cdot 10^{16}$ (6)

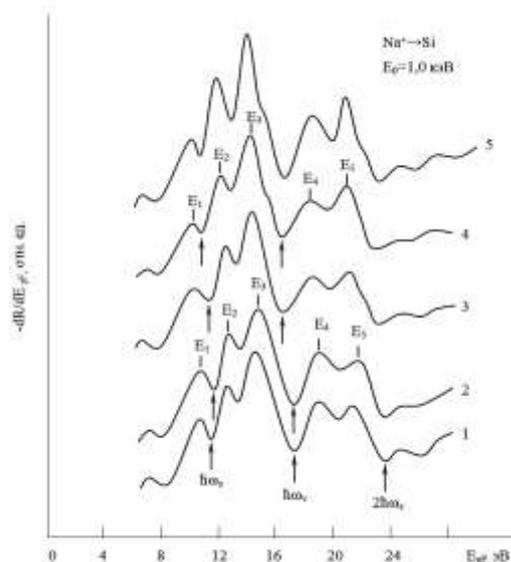


Рис. 6. Зависимости $-dR(E_{pF})/dE_{pF}$ для Si(111), имплантированного ионами Na⁺ с $E_0 = 1.0$ кэВ с различной дозой D , см⁻²: 0 – (кривая 1), $5 \cdot 10^{14}$ (2), $7 \cdot 10^{15}$ (3), $1 \cdot 10^{16}$ (4), $8 \cdot 10^{16}$ (5)

Таким образом, можно сделать вывод, что при имплантации ионов Ba⁺ и Na⁺ с низкой энергией $E_0 < 5$ кэВ и большой дозой независимо от типа проводимости исходного кремния в запрещенной зоне образуется примесная донорная подзона, которая перекрывается с зоной проводимости, т.е. образуется сильно вырожденный полупроводник с донорным типом

проводимости. Все это приводит к существенному изменению энергии возбуждения коллективного колебания валентных электронов.

Для интерпретации эффекта уменьшения энергии объемных и поверхностных плазмонов кремния при имплантации ионов Na^+ и Ba^+ с энергией $E_0 = 1$ кэВ с большой дозой облучения (рис. 1 и 2) мы при этом пользовались моделью двухжидкостного электронного газа. Имеется нарушенный слой толщиной a , который граничит с ненарушенным чистым Si, занимающим остальное полупространство (рис. 7).

На рисунке область $a > z > 0$ – область нарушенного слоя, $z > a$ – область чистого материала.

$$\varepsilon_0(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pv}^2}{(\omega - i\nu)^2} \quad (1)$$

Чистый материал можно характеризовать объемной диэлектрической проницаемостью (1) в которой ω_{pv}^2 – квадрат плазменной частоты валентных электронов чистого Si, ν – затухание в системе колеблющихся валентных электронов, ω – текущая частота, на которой исследуется отклик среды на внешнее воздействие.

В длинноволновом пределе, диэлектрическая проницаемость ионно-имплантированного кремния может быть записана в виде суммы:

$$\varepsilon(\omega, z) = \varepsilon_0(\omega) + \varepsilon_s(z), \quad (2)$$

где $\varepsilon_0(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость исходного чистого кремния, а

$$\varepsilon_s(z) = \frac{4\pi e^2}{m} \cdot N_{imp}(z) \cdot \sum_{l>\nu} \frac{Z_{эфф,l}}{(\omega_{lc}^2 - \omega_{pv}^2)} \quad (3)$$

представляет собой статическую поляризацию остовных электронов примесных ионов. Сумма $\sum_{l>\nu}$ распространяется на все заполненные

оболочки примесного иона, расположенные ниже валентной зоны, т.е. предполагается, что $\omega_{lc}^2 \gg \omega_{pv}^2$; $\omega_{pv}^2 = 4\pi e^2 N_v / m$ – квадрат плазменной частоты валентных электронов кремния, ω_{lc}^2 – квадрат частоты перехода остовных электронов с l -й оболочки примесного иона в зону проводимости Si, $N_{imp}(z)$ – координатный профиль распределения внедренной примеси по глубине, $Z_{эфф,l}$ – эффективное число электронов, принимающих участие в переходе $l \rightarrow c$.

Для рассматриваемой здесь ситуации спектральная интенсивность возбуждения плазмонов имеет вид:

$$I_\omega = -\frac{2}{(2\pi)^3 \hbar^2 v^2} \int_{-\infty}^{+\infty} dq \int_{-\infty}^{+\infty} dz \int_{-\infty}^{+\infty} dz' \exp\left[-i\frac{\omega}{v}(z - z')\right] \text{Im}D(z, z', q, \omega), \quad (4)$$

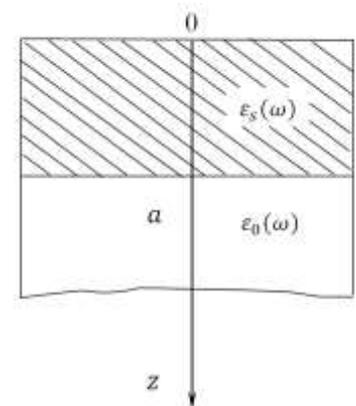


Рис. 7. Двухжидкостная модель электронного газа.

так что эта интенсивность может быть определена, если известна функция Грина $D(z, z', q, \omega)$ электрического поля внутренних электронов ионно-имплантированного Si. В формуле (4) $\hbar\omega$ и q – переданные среде энергия и волновой вектор, v – скорость налетающего электрона.

Анализ черенковского процесса генерации объемного плазмона электроном, находящимся в среде, показал, что пик спектра описывается выражением, содержащим интеграл в котором χ есть пространственное затухание волнового поля налетающего электрона в среде:

$$\text{Im} \int_0^{\infty} dz \exp(-2\chi z) \frac{1}{\varepsilon(\omega, z)} = \frac{\pi\theta[-\varepsilon_0(\omega)]\theta[\varepsilon_0(\omega) + \varepsilon_s(z_{max})]}{\left| \frac{d\varepsilon_s(z)}{dz} \right|_{z=z_0(\omega)}} \exp[-2\chi z_0(\omega)], \quad (5)$$

Положение пика объемного плазменного резонанса в ионно-имплантированном кремнии приходится на низкочастотный край диапазона возбуждаемых частот, определяемых неравенством $-\varepsilon_s(z_{max}) \leq \varepsilon_0(\omega) \leq 0$. Поскольку с ростом дозы облучения величина $\varepsilon_s(z_{max})$ увеличивается, сдвиг пика в сторону меньших энергий также возрастает по отношению к положению $\hbar\omega_{рез}$ в чистом кремнии.

В нарушенном слое диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\omega)$ отличается от $\varepsilon_0(\omega)$ двумя факторами. Во-первых, внедренные ионы Na (или Ba), образующие соединение с Si, дают вклад в плазменные колебания с частотой $\omega_p < \omega_{pv}$ и затуханием $\gamma \ll \omega_p$. Во-вторых, в системе валентных электронов в области нарушенного слоя увеличивается затухание, так что

$$\varepsilon_s(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pv}^2}{(\omega - i\gamma)^2} - \frac{\omega_p^2}{(\omega - i\gamma)^2} \quad (6)$$

причем $\gamma > \nu$, что является следствием аморфизации, существование которой подтверждают опыты по дифракции медленных электронов (см.1 табл.). В результате такой аморфизации сильно возрастает концентрация примесей и нарушений, приводящих к затуханию плазменных колебаний валентных электронов.

На рис. 8 показаны спектры $\text{Im} \frac{1}{\varepsilon(\omega)}$ для $A = \frac{\omega^2}{\omega_p^2} = 0,6$ и величины $\frac{\gamma}{\omega_p} = 0,5; 1,0; 1,5; 2;$ - соответственно. Величина $\frac{\gamma}{\omega_p} = 0,5$. Сдвиг максимума спектра в область $\omega < \omega_p$ происходит при $\frac{\gamma}{\omega_p} \geq 1$, т.е. при достаточно сильном разрушении структуры в области нарушенного слоя. Таким образом, характерной чертой, присущей спектру ХПЭ для объемного плазмона в нарушенном слое, является сильное затухание в системе валентных электронов, которое одного порядка с отношением плазменных частот в металлическом Ba, Na и в чистом Si.

Спектральное распределение интенсивности возбуждения поверхностного плазмона определяется уже известным выражением. Анализ

этого выражения показал, что пик спектра поверхностного резонанса имеет место при

$$\varepsilon_0(\omega) + 1 \cong -\frac{3}{8} \frac{\omega_{pv}^2}{v^2} \left[\int_0^\infty dz \varepsilon_s(z) \right]^2, \quad (7)$$

если иметь в виду, что максимальная добавка $\varepsilon_s(z_{max})$, связанная с ионным легированием много меньше единицы.

Из дисперсионного уравнения (7) следует, что положение пика поверхностного резонанса оказывается чувствительным к профилю распределения внедренной примеси. Аналогичное утверждение справедливо, и для положения пика объемного плазмона, что было показано ранее. Закономерности сдвига пика поверхностного плазмона с ростом дозы облучения, т.е. с увеличением величины $\varepsilon_s(z_{max})$, в сторону меньших энергий близки к таковым для объемного плазмона.

В таблице 2 приведены экспериментальные и расчетные данные о значениях энергии пиков спектра потерь энергии электронов, обусловленных возбуждением ими объемных плазмонов в структуре $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Si}$ и $\text{Ba}^+ \rightarrow \text{Si}$. Из сравнения сдвигов пика с ростом дозы облучения видно, что расчетные значения составляют 99 % при дозе 10^{15} см^{-2} и 76 % при дозе 10^{16} см^{-2} от значений экспериментально наблюдаемых величин сдвигов энергий пиков объемных плазмонов. Можно предположить, что причиной расхождения между расчетными и экспериментальными значениями сдвигов пиков спектра является увеличение постоянной решетки при имплантации ионов примеси, что приводит в свою очередь к уменьшению энергии плазменных колебаний валентных электронов. Однако теоретическая оценка такого эффекта представляет собой сложную задачу.

Таким образом представленная теоретическая модель достаточно хорошо объясняет наблюдаемый в эксперименте эффект уменьшения энергии $\hbar\omega_v$ и $\hbar\omega_s$ плазмонов Si при имплантации больших доз ионов Ba и Na сильным затуханием колебаний валентных электронов в следствии с разупорядочением кристаллической структур Si(111) вплоть до полной аморфизации. В то же время результаты теоретических расчетов показывают,

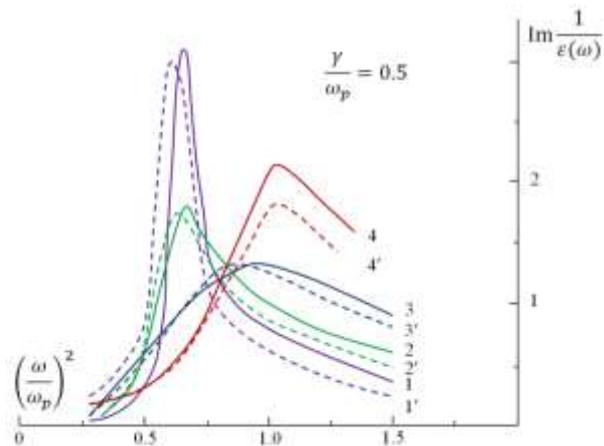


Рис. 8. Зависимости $\text{Im} \frac{1}{\varepsilon(\omega)}$ от $\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2$ для Si, имплантированного ионами Ba^+ и Na^+ , с $E_0 = 1 \text{ кэВ}$. (Кривым 4-1 соответствуют значения $\frac{\gamma}{\omega_p} = 0, 5; 1, 0; 1, 5; 2$ и $A = \frac{\omega^2}{\omega_p^2} = 0, 6$. Кривые 4'-1' соответствуют Si, имплантированному ионами Na^+ , а 4-1 ионами Ba^+ с дозой $10^{14}, 10^{15}, 10^{16}$ и 10^{17} см^{-2} , соответственно)

что эффект статической поляризации остовных электронов примесных ионов существенно влияет на сдвиг энергий пиков потерь на возбуждение плазмонов в ионно - легированном полупроводнике.

Таблица 2

Зависимость энергии пика, соответствующего возбуждению объемного плазмона в Si, от дозы облучения ионами Na⁺ и Ba⁺ с энергией 1 кэВ

	D, см ⁻²	C(z _{max})	z _{max} , Å	ε _s (z _{max})	ħω _{рез} , эВ	
					эксперимент	расчёт
Na ⁺	0	-	-	0	17.0	17.1
	10 ¹⁴	0.12	33	0.092	16.75	16.72
	10 ¹⁵	0.18	27	0.079	16.0	16.4
	10 ¹⁶	0.32	21	0.141	15.0	16.0
	10 ¹⁷	0.42	20	0.234	14.0	14.1
Ba ⁺	0	-	-	0	17.0	17.1
	10 ¹⁴	0.10	29	0.042	16.8	16.9
	10 ¹⁵	0.16	25	0.84	16.6	16.7
	10 ¹⁶	0.28	21	0.154	15.7	15.4
	10 ¹⁷	0.45	21	0.273	13.8	13.4

Теоретическое описание энергетического спектра неупорядоченных систем, к которым можно отнести и Si, имплантированными ионами Na⁺ с большой дозой, удобно проводить с помощью диаграммной техники Келдыша для электрона в случайном поле примесных атомов. Существенное упрощение в решении этой задачи может быть достигнуто, на основе предложения о том, что свойства имплантированных твердых тел близки к свойствам сильно легированных монокристаллов. Сдвиг максимумов плотности состояний валентных электронов кремния, наблюдаемый после ионной имплантации в наших экспериментах (приведенных на рис. 9) можно качественно объяснить, применяя выражения для массовых операторов в первом и во втором порядках теории возмущения Σ⁽¹⁾, Σ⁽²⁾.

Член первого порядка приводит к одинаковому смещению всех уровней за счет среднего потенциала примеси. Изменение функции плотности состояний определяется членом второго порядка Σ⁽²⁾:

$$\rho(E, n) = 2 \int \frac{d^3\bar{k}}{(2\pi)^3} \left\{ \frac{J_m \Sigma^{(2)}(\omega, \bar{k}, n)}{[\varepsilon - \varepsilon_0(\bar{k}, n - \Sigma^{(1)}(\varepsilon, \bar{k}, n)) - R_c \Sigma^{(2)}(\varepsilon, \bar{k}, n)]^2} \right\} \quad (8)$$

$$\Sigma^{(1)} = n \langle \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}, n \rangle;$$

$$\Sigma^{(2)} = (\varepsilon, \bar{k}, n) = n_d \sum_{\bar{k}', n'} \frac{\langle \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}', n' \rangle}{\varepsilon - \varepsilon_0(\bar{k}', n') + i_0} \langle \bar{k}', n' | U_1 | \bar{k}, n \rangle \quad (9)$$

где n_d – средняя концентрация дефектов, пропорциональная дозе ионов натрия D , $\langle \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}', n' \rangle$ - матричный элемент потенциала атома примеси между Блоховскими функциями. Эти выражения можно использовать для расчета плотности состояний имплантированного твердого тела в зависимости от концентрации примесных атомов. Можно дать также приближенную оценку для действительной и мнимой части $\Sigma^{(2)}$, считая, что $\langle \bar{k}, n | U_1 | \bar{k}', n' \rangle = \text{const}$. Отсюда получаем, что величина смещения энергетического положения максимума функции плотности состояний электронов ΔE , определяется выражением

$$\Delta E = R_e \Sigma^{(2)}(\varepsilon, \bar{k}, n) \cdot \frac{n_d}{(k^2 + cn_d^{1/3})^2}, \quad (10)$$

где $c = \text{const}$. Таким образом, можно предположить, что смещение уровней будет пропорционально n_d^α , где показатель степени лежит в пределах от 1/3 при больших значениях n_d и до 1 при малых значениях n_d . Экспериментальные данные по смещению максимумов плотности состояний хорошо согласуются с этим выводом.

Таким образом, обнаруженное экспериментально смещение максимумов СУРЭ кремния при имплантации низкоэнергетических ионов Na^+ с большой дозой объясняется теоретически на основе диаграммной техники Келдыша для электрона в случайном поле примесных атомов сильным разупорядочением кристаллической структуры ионно-имплантированной области Si(111). Теоретические расчеты показали что, сдвиг энергии максимумов спектра СУРЭ $\Delta E_i \sim n_d^\alpha$ (концентрации образующихся при имплантации натрия дефектов), что хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

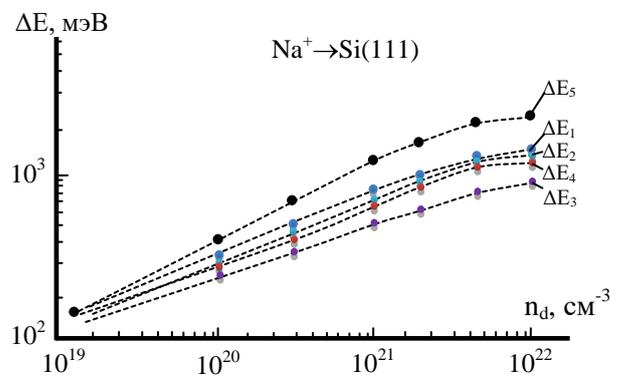


Рис. 9. Зависимости величины смещения максимумов ΔE_i от концентрации дефектов, образующихся в Si(111) при имплантации ионов Na^+ с $E_0 = 1$ кэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан новый способ очистки поверхности монокристаллов кремния, заключающийся в проведении термической очистки кремния в условиях сверхвысокого вакуума в два этапа: длительно при $T=900$ К и кратковременно при $T=1550$ К и отличающийся последующем созданием приповерхностном слое геттерирующего слоя имплантацией ионов Ва или щелочных элементов в Si, которые образуют устойчивые химические соединения с кремнием и атомами неконтролируемых примесей (O, N, S, C и др.) и удаляются вместе с ними после кратковременного прогрева при $T=1550$ К, приводя к дополнительной очистки поверхности Si;

2. Исследованиями изменения кристаллической структуры поверхности Si(111) и Si(100) методом ДМЭ в процессе имплантации ионов Ba^+ и Na^+ с энергией 0,5 – 5 кэВ было установлено, что начиная с некоторой критической дозы ионов D_{cr} , поверхность кремния полностью аморфизуется. Обнаружено, что для данного типа ионов величина D_{cr} уменьшается с ростом энергии имплантируемых ионов и при фиксированной энергии, D_{cr} для Si(100) больше, чем для Si(111);
3. Показано, что начиная с критической дозы имплантации D_{cr} ионов Ba и Na, начинается процесс силицидообразования, который сопровождается постепенным превращением основного низкоэнергетического пика $\text{SiL}_{2,3VV}$ из синглетной формы в дуплетную и завершается при дозе $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (в случае Na) и $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (в случае Ba);
4. Установлено, что при имплантации ионов Ba^+ и Na^+ с энергией 1 кэВ с большой дозой облучения ($6 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) в приповерхностной области кремния образуется пленка силицида бария (силицида натрия) с аморфной структурой толщиной 45 – 50 Å. Последующий кратковременный прогрев ионно-имплантированного Si при 1100 К (Ba) и 900 К (Na) приводит к формированию монокристаллических наноразмерных пленок силицидов бария и натрия с новыми поверхностными сверхструктурами Si(100)-2×2 Ba, Si (111)-1×1 Ba и Si(100)-4×4 Na, Si (111)-4×4 Na;
5. Впервые на основе анализа фотоэлектронных спектров и спектров упруго рассеянных электронов определены зонно-энергетические параметры (термо-, фотоэлектронная работа выхода, сродство к электрону и ширина запрещенной зоны) наноразмерных пленок силицидов бария и натрия;
6. Разработана теоретическая модель, которая достаточно хорошо объясняет наблюдаемый в эксперименте эффект уменьшения энергии $\hbar\omega_v$ и $\hbar\omega_s$ плазмонов Si при имплантации больших доз ионов Ba и Na сильным затуханием колебаний валентных электронов в следствии с разупорядочением кристаллической структур Si(111) вплоть до полной аморфизации. В то же время результаты теоретических расчетов показывают, что эффект статической поляризации остовных электронов примесных ионов существенно влияет на сдвиг энергий пиков потерь на возбуждение плазмонов в ионно - легированном полупроводнике;
7. Обнаруженное экспериментально смещение максимумов СУРЭ кремния при имплантации низкоэнергетических ионов Na^+ с большой дозой объясняется теоретически на основе диаграммной техники Келдыша для электрона в случайном поле примесных атомов сильным разупорядочением кристаллической структуры ионно-имплантированной области Si(111).

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 OF KARSHI STATE UNIVERSITY**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER
ISLAM KARIMOV**

KHUJANIYOZOV JUMANAZAR BOBOKULOVICH

**FEATURES EXCITATION OF PLASMA OSCILLATIONS OF
ELECTRONS IN THE ION-IMPLANTED SILICON AND THE SILICIDE
FILMS**

01.04.04 – Physical electronics

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

Tashkent – 2021

The subject of doctor of philosophy dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2018.2.PhD/FM245.

Dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University named after Islam Karimov.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (rasume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.qarshidu.uz) and on Information-education portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific consultant:

Rysbaev Abdurashit Sarbaevich

doctor of physical and mathematical sciences,
professor

Official opponents:

Sabirov Leonard Muxammedjanovich

doctor of physical and mathematical sciences,
professor

Rakhmanov Ganiboy Todjievich

Candidate of physical and mathematical sciences,
docent

Leading organization:

Institute ion – plasma and laser technology named after U.A. Arifov

The defense will take place on «__» _____ 2021 at _____ at the meeting of scientific council number PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 for the award of academic degrees at Karshi State University (Address: 180119, Uzbekistan, Karshi, 17 Kuchabag Street. Phone/fax: (99875) 225–34–13, e-mail: kardu@mail.ru).

The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at Karshi state university (is registered № _____) (Address: 180119, Uzbekistan, Karshi, 17 Kuchabag Street. Phone/fax: (+99875) 225-34-13, e-mail: kardu@mail.ru).

The Abstract of the dissertation sent out on «__» _____ 2021.
(Mailing report №__ on «__» _____ 2021).

M.T. Normuradov

Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

G.Kh. Khalimov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher

A.K. Tashatov

Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is a model and theoretical interpretation of the features of the excitation of plasmons in ion-implanted layers of silicon and in films of sodium and barium silicides.

The objects of research work are monocrystals were Si(111) and Si(100), p and n – type.

Scientific novelty of the research work:

a new method has been developed for vacuum cleaning the surface of Si single crystals from impurity atoms (S, O, and C), which consists first in implanting Ba^+ and Na^+ ions with a large dose into silicon samples purified by traditional thermal heating and subsequent thermal heating in two stages: within 30 minutes at a temperature of $T = 900$ K and for a short time within 30-60 seconds at $T = 1550$ K;

It was found that starting from a certain critical dose D_{cr} of implantation of Ba^+ and Na^+ ions, complete amorphization of the Si surface layer occurs. The D_{cr} value decreases with increasing ion energy: at $E_0=0,5$ keV, $D_{cr}=7 \cdot 10^{15}$ cm⁻² (for Na^+), $D_{cr}=4 \cdot 10^{15}$ cm⁻² (for Ba^+); at $E_0=5,0$ keV $D_{cr}=0,3 \cdot 10^{15}$ cm⁻² (for Na^+), $D_{cr}=0,08 \cdot 10^{15}$ cm⁻² (for Ba^+);

It is shown that at high doses of ion implantation of Si, a significant change in the density of states of valence electrons is observed, a donor impurity subband is formed in the forbidden band, which overlaps with the conduction band of Si, leads to a narrowing of the forbidden band to 0.6 eV (in the case of Ba implantation) and to 0,7 eV (in the case of Na ion implantation), which is explained by the formation of compounds such as $BaSi_2$ and $NaSi_2$;

first, based on biliquid electron gas model, given the theoretical interpretation of the experimentally observed effect reduction to 15% of the energy of surface and bulk plasmons in surface layers of the silicon amorphization caused by them;

a theoretical expression has been obtained that satisfactorily describes the experimentally found shift of the maxima of ESES silicon upon implantation of low-energy Na^+ and Ba^+ ions with a high dose.

Implementation of the research results. Based on the results of studies of the surface state of Si monocrystals and the effect of low-energy Na^+ and Ba^+ ions on the density of states of valence electrons and the excitation frequency of surface and bulk Si plasmons:

the results of studying the effect of low-energy high-dose implantation of Na^+ and Ba^+ ions on the excitation energy of plasmons and on the density of states of valence electrons Si were used in the implementation of the fundamental project OT-F2-53 “Quantum-size effects and electronic properties of two-layer nanoscale structures on the surface and in the near-surface region of films A^3B^5 and A^2B^6 ” (Certificate № 89-03-5337 of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan dated December 18. 2020). The developed theoretical model of the interaction of electrons with plasmons of ion-implanted Si and the results of theoretical calculation of the shift of the maxima of the density of states of valence electrons from the concentration of defects formed

during ion implantation made it possible to explain the experimentally found increase in the Si band gap during the formation of nanoscale structures on the surface;

received a patent for a new method of vacuum cleaning the surface of silicon monocrystals (Method for additional cleaning of the surface of silicon monocrystals. Patent № IAP 05720). The use of the developed technological modes of processing and cleaning makes it possible to obtain a clean, smooth, and perfect Si(111) surface.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion and a list of references. The text of the thesis is presented on 119 pages of typewritten text, including 40 figures and 6 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Ж.Б. Хужаниёзов, А.С. Рысбаев, И.Р. Бекпулатов. Особенности возбуждения плазменных колебаний электронов в неупорядоченных полупроводниках / Монография. Ташкент: типография ТГТУ, 2014, 168 с.
2. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Рахимов А.М., Бекпулатов И.Р. Способ очистки поверхности монокристаллов кремния / Патент №IAP 05720, 30.11.2018 г.
3. A.S. Rysbaev, J.B. Khujaniyozov, M.T. Normuradov, A.K. Tashatov, B.D. Igamov, S.T. Abraeva. Theoretical explanation of the effect of a decrease in the Si(111) plasmon energy during the implantation of ions with a large dose // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. Vol. 14, №4, 2020. -PP. 816-822.
4. A.S. Rysbaev, S.U. Irgashev, A.S. Kasimov, D.Sh. Juraeva, J.B. Khujaniyazov, M.I. Khudoyberdieva. Optimal technological modes of ion implantation and following annealing for forming thin nanosized films of silicides // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. № 4(1), 2020. -PP. 50-60.
5. М.Т. Нормурадов, Д.А. Нормуродов, Ж.Б. Хужаниёзов, А.С. Рысбаев. Влияние разупорядоченности кристаллической структуры ионно-имплантированного кремния, на плотность состояний валентных электронов // Узбекский физический журнал, 2019., № 4, Т. 21, с. 229-234.
6. A.S. Risbaev, J.B. Khujaniyazov, I.R. Bekpulatov, A.M. Rakhimov. Method for additional purification of the surface of Si(111) single crystal // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, Vol. 11, №5, 2017. -PP. 994–999.
7. Халиков Ю.Д., Хужаниязов Ж.Б., Бекпулатов И.Р., Саидахмедова З.Р. Экспериментальные и теоретические исследования влияния ионной имплантации на частоту возбуждения плазмонов в кремнии // Журнал «Молодой учёный» РАН. №5 (109) ч. II, 2016. -С. 154-159.
8. Ж.Б. Хужаниязов, А.С. Рысбаев, И.Р. Бекпулатов, Р.Ф. Файзуллаев. Теоретическое объяснение эффекта уменьшения энергии плазмонов в Si(111) при имплантации ионов с большой дозой // Узбекский физический журнал. №1, Вып. 20, 2018. -С. 43-50.
9. Ж.Б. Хужаниёзов, А.С. Рысбаев, С.С. Насриддинов, А.М. Рахимов, И.Р. Бекпулатов, Р.Ф. Файзуллаев. Теоретическое объяснение эффекта уменьшения энергии плазмонов Si (111) при имплантации ионов с большой дозой // Вестник ТГТУ, 2015. №1, с. 27-33.
10. А.С. Рысбаев, А.А. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниёзов, А.М. Рахимов, Л.Х. Рахимова. Об образовании новых поверхностных сверхструктур при

формировании тонких наноразмерных пленок силицидов // Uzbek Journal of Physics. Vol. 15, №1-2, 2013. -PP. 26-32.

11. А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниязов, Ю.Ю. Юлдашев А. Рахимов. Особенности электронной структуры наноразмерных ион-имплантированных слоев в кремнии // Uzbek Journal of Physics. Vol. 9, №2, 2007. -PP. 111-116.
12. А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниязов, Ю.Ю. Юлдашев, А. Рахимов, А.Х. Каршиев. Влияние различных факторов на состояние поверхности силицидных пленок // Вестник ТГТУ. 2006. №3. -С. 34-37.

И бўлим (II часть, part II)

13. Комилов Т.С., Ключковская В.В., Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Игамов Б.Д. Получение нанопленок силицидов Ва и щелочных металлов низкоэнергетической ионной имплантацией в Si(111) и Si(100) // Тезисы докладов VII Всероссийская конференция по наноматериалам "НАНО 2020", Москва 2020. -С. 126-127.
14. Рысбаев А.А., Хужаниёзов Ж.Б., Рысбаев А.С., Нормурадов М.Т., Бекпулатов И.Р., Нормурадов Д.А., Саидахмедова З.Р. Формирование наноразмерных пленок силицидов на поверхности Si(111) и Si(100) методом низкоэнергетической ионной имплантации // Тезисы докладов XXIX Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела», Севастополь, Россия. 2019. -С. 308-315.
15. A.S. Rysbaev, I.R. Bekpulatov, J.B. Khujaniyozov. Theoretical explanation of effect of reduction of energy plasmons Si(111) at implantation of ions with the big dose // III International conference on modern problems in physics of surfaces and nanostructures, Yaroslavl, Russia. 2017. -P.103.
16. А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниязов, Ш.А. Талипова, З.Р. Саидахмедова, А.М. Рахимов, Д.М. Шукурова. Особенности спектров характеристических потерь энергии электронов в ионно-имплантированных слоях Si // Тезисы докладов XXIII Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» ВИП-2017, Москва, Россия. Т. 2, 2017. -С. 218-221.
17. А.С. Рысбаев, Т.С. Комилов, И.Р. Бекпулатов, Ж.Б. Хужаниязов, Ш.А. Талипова. Анализ процессов происходящих в кремнии при ионной имплантации // Республика VII – Илмий-назарий анжуман «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» Термиз, 2017. 19-20-май. 20-22 б.
18. А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниязов, И.Р. Бекпулатов, А.М. Рахимов. Способ дополнительной очистки поверхности монокристаллов кремния // Тезисы докладов XXII Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» ВИП-2015, Москва, Россия. 2015. Т. 2, -С. 190-192.
19. А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниёзов, А.М. Рахимов, Р.Ф. Файзуллаев, И.Р. Бекпулатов. Особенности спектров характеристических потерь энергии электронов в ионно имплантированных слоях кремния // Тезисы докладов X Международной конференции «Кремний 2014», Россия, Иркутск. 2014. -С. 173.

20. Rysbaev A.S, Djuraev Sh.H., Rahimov A.M., Khudjanliyazov J.B., Tashatov A.K. Thin Silicide Films: Producing and Properties // Тезисы докладов Международной конференции “Nuclear Science and its Application”, Самарканд 25-28 сентябрь 2012. -С. 262-264.
21. Рысбаев А.С., Жураев Ш.Х., Хужаниязов Ж. Б., Каримов Б.Т. Рахимов А.М., Мирбобоев М.М., Насриддинов С.С. Влияние разупорядочения и образования химических соединений на частоту возбуждения плазмонов в наноразмерных пленках силицидов // 8-th International Conference NUCLEAR AND RADIATION PHYSICS September 20-23, 2011. Almaty, Kazakhstan, p. 299
22. А.С. Рысбаев, М.Т. Нормурадов, А.К. Ташатов, Ш.Х. Джураев, Ж.Б. Хужаниёзов, Ю.Ю. Юлдашев, А. Рахимов. Исследование структуры и свойств тонких наноразмерных силицидных пленок, полученных методом низкоэнергетической ионной имплантации // Взаимодействие ионов с поверхностью. Труды XIX международной конференции ВИП-2009, Москва, Россия. 2009. Т. 2. -С. 142-143.
23. Рысбаев А.С., Ташатов А.К., Джураев Ш.Х., Хужаниёзов Ж.Б., Рахимов А.М. О некоторых практических аспектах применения низкоэнергетических ионной имплантации // Физика ва физик таълимнинг замонавий муаммолари. Республика конференцияси. Самарканд 2009. 11-12 декабрь. 13-14 б.
24. А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниязов, Ю.Ю. Юлдашев, А. Рахимов, М. Мирбобоев, Р. Файзуллаев, А. Каршиев. Электронная структура наноразмерных ионно-имплантированных слоев в кремнии // 6-th International Conference NUCLEAR AND RADIATION PHYSICS, June 4-7, 2007, Almaty, Kazakhstan, -PP. 436-438.
25. Рысбаев А.С., Нормурадов М.Т., Насриддинов С.С., Хужаниёзов Ж.Б., Рахимов А.М. Влияние разупорядочения кристаллической решетки Si(111) на частоту объемных и поверхностных колебаний валентных электронов // Тезисы докладов XVII международной конференции ВИП-2005, Москва. 2005. Т. 1, -С. 566-568.
26. А.С. Рысбаев, Ж.Б. Хужаниёзов, А.М. Рахимов, Р.Ф. Файзуллаев. Особенности спектров характеристических потерь энергии электронов в ионно-имплантированных слоях кремния // Тезисы докладов IV Международная конференция по Актуальным проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред, Самарканд. 2013. -С.124-125.
27. Рысбаев А.С., Хужаниёзов Ж.Б., Арзикулов Г.П., Буназаров Д.Б., Рахимов А., Файзуллаев Р.Ф. Эффект уменьшения энергии плазменных колебаний валентных электронов Si при имплантации ионов щелочных и щелочно – земельных элементов // Тезисы докладов II Международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах, Фергана. 2011. -С. 233-234.

Бичими 60x84^{1/16}. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма тобоғи: 4. Адади 100 нусха. Буюртма № 100.
Гувоҳнома № _____
“_____” босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: _____
