ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАР ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018. FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ЮСУПЖОНОВА МАХСУНА БАХОДИРОВНА

ЮЗАСИ ИМПЛАНТАЦИЯ УСУЛИ БИЛАН МОДИФИКАЦИЯЛАНГАН ДИЭЛЕКТРИК ПЛЁНКАЛАРНИНГ ЭЛЕКТРОН ВА ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2019

УДК 535.371:535.016:538.975

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

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

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

Юсупжонова Махсуна Баходировна
Юзаси имплантация усули билан модификацияланган диэлектрик плёнкаларнинг электрон ва оптик хусусиятлари …… 3

Юсупжонова Махсуна Баходировна
Электронные и оптические свойства поверхности диэлектрических пленок модифицированных ионной имплантацией …… 21

Yusupjonova Makhsuna Bakhodirovna
Electronic and optical properties of the surface of dielectric films modified by ion implantation …… 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works……..... 42

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАР ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018. FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ЮСУПЖОНОВА МАХСУНА БАХОДИРОВНА

ЮЗАСИ ИМПЛАНТАЦИЯ УСУЛИ БИЛАН МОДИФИКАЦИЯЛАНГАН ДИЭЛЕКТРИК ПЛЁНКАЛАРНИНГ ЭЛЕКТРОН ВА ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B 2017.2.PhD / FM99 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати учта тилда (ўзбек, рус ва инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.iplt.uz) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	**Ташмухаммедова Дилноза Артикбаевна** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий опоннентлар:	**Исаханов Зинаобидин Абилпейзович** физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим
	Рахмонов Ганибай Таджиевич физика-математика фанлари номзоди, доцент
Етакчи ташкилот:	**Фарғона политехника институти**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 рақамли илмий кенгашнинг 2019 йил «____» сентябрь соат 14^{00} даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-32-54, email: info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел: (99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2019 йил «____» _____ куни тарқатилди.

(2019 йил «____» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси)

Х.Б.Ашуров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

Д.Т.Усманов
Илмий даражалар берувчи илмийкенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

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

КИРИШ(фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда жадал ривожланаётган физик электроника соҳасида наноматериал-ларни олиш ва уларнинг магнит, электр, оптик ва бошқа хусусиятларини ўрганиш истиқболли йўналишлардан биридир. SiO_2 ва MgO турдаги диэлектрик плёнкалар ва зарралар микро, нано ва оптоэлектрониканинг истиқболли материалларидир. Улар асосида юқори частотали детекторлар, транзисторлар, интеграл микросхемалар, оптик хотира қурилмалари ва турли частотадаги нурланишларни қабул қилгичларида ишлатиладиган металл – диэлектрик – яримўтказгич (МДЯ) ва яримўтказгич – диэлектрик – яримўтказгич (ЯДЯ) тузилмалари яратилади. Оксидли плёнкалар олиш учун асосан кислород муҳитида термик оксидлантириш усулларидан фойдаланилади. Юқори вакуум шароитида мазкур пленкаларнинг юзасига керакли металл ва яримўтказгич атомлари чанглатиб ўтказилади. Бунда бир жинсли пленкалар 50 – 100 нм қалинликдан бошлаб шакллана бошлайди.

Ҳозирги кунда SiO_2 ва MgO пленкаларининг иккиламчи эмиссия хоссалари ва мазкур хоссаларини фаол металл ионлари билан бомбардимон қилинганда ўзгаришлари яхши ўрганилган. Илмий-техника тараққиёти, фаол металл ионлари билан легирланган наноўлчамли оксидли плёнкаларнинг ишлатилишини кенгайтиришни талаб қилади, чунки уларнинг электрон хусусиятларидаги сезиларли ўзгаришлар янги электрон техника асбобларини яратишга ёрдам беради.

Ўзбекистон Республикасида сўнгги йилларда микро- ва наноэлектроника учун керакли бўлган материалларнинг оптик хусусиятлари, электрон тузилиши ва таркибини аниқлаш билан боғлиқ бўлган қаттиқ жисм сирт физикасининг долзарб муаммолари бўйича жадал илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Шунинг учун охирги вақтларда замонавий усуллардан фойдаланган ҳолда, кремний ва турли металлар юзасида оксид плёнкалар олиш усуллари ишлаб чиқилган. Бироқ ҳозирги кунгача қалинлиги ≤ 100 – 200 Å бўлган бир жинсли SiO_2 ва MgO наноплёнкаларни олиш бўйича ишончли маълумотлар бўлмаган. Шунингдек, уларнинг юзаларида яримўтказгич ва металларнинг наноўлчамли плёнкалари ва фазаларини олиш бўйича ҳеч қандай изланишлар олиб борилмаган. Нано ўлчамли тузилмали оксидли юпқа плёнкаларнинг таркиби, кристалли ва электрон тузилиши, эмиссион ва оптик хусусиятлари амалда ўрганилмаган. Замонавий физик-электроника ва электрон асбобсозликнинг долзарб муаммолари ушбу диссертация ишининг мақсад ва вазифаларини белгилаб берди.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа

меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Сўнгги йилларда кўпгина хорижий илмий марказларнинг саъй-ҳаракатлари табиатдаги турли материаллар асосида наноўлчамли структураларни олиш ва уларнинг электрон ва оптик хусусиятларини ўрганишга йўналтирилган. Кремний технологияси учун табиий материал сифатида SiO_2 да Si нанокристалларини ҳосил қилиш жараёнлари ва уларнинг хусусиятлари энг кўп ўрганилган. Кремний икки оксидига Si^+ ионларини имплантация қилиб, кейинчалик юқори хароратда қиздириш йўли билан олинган SiO_2 матрицасидаги Si кристалининг нанокиритмалари - SiO_2: nc-Si тизими алоҳида аҳамият касб этади. Мазкур тизим 750 – 900 нм оралиғида фотолюминесценцияга (ФЛ) эга эканлиги аниқланган (Shimizu-Iwayama T., Fujita K., Nakao S., Min K.S., Shcheglov K., Yang C.M., Atwater H.A., Cheylan S., Langford N., Elliman R.G.). Тетелбаум Д., Горшков О.Н. ва бошқалар ион имплантацияси нафақат тизимни яратишга, балки унга киришма атомларини киритишга имкон беришини кўрсатди. Масалан, маълум бир шарт-шароитларда фосфор билан ионли легирлаш ФЛ самарадорлигининг сезиларли даражада ошиши аниқланган.

Nishii J. ва бошқалар $Si_{1-x}Ge_xO_2$ асосида кўпгина истиқболли қўлланишлар учун муҳим бўлган фотосезгирликни ёруғлик чиқариш хусусиятлари билан уйғунлигига эга бўлган кўп функцияли материаллар яратиш имконини аниқлашган. Икаев А.М., Гуляев Ю.В., Чернов А.А., Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е. ва бошқа олимлар томонидан SiO_2 ва MgO нинг таркиби, тузилиши ва хоссалари бошқа материаллар билан ўзаро таъсирлашганда, хусусан, ион имплантациясида ўзгариши бўйича муҳим натижаларга эришганлар. Улар томонидан мазкур материаллардан электроника саноатида истиқболли асбобларни яратишда фойдаланиш мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университети грантлар тематик режасининг А-4-7-сонли «Микро ва оптоэлектроника, шунингдек қуёш энергетикаси асбоблари учун кремний ва арсенид галлий монокристалл плёнкаларининг сирт ости қатламларида гетероэпитаксиал наноўлчамли тузилмаларни синтез қилиш технологиясини ишлаб чиқиш» (2015 – 2017 йй.); ЁФ-2-12-сонли «W, Pd ва PdBa нинг эмиссион хусусияти ва ишчи характеристикаларига наноўлчамли структуралар ҳосил бўлишининг таъсири» (2016-2017 йй.); № ОТ-Ф2-53 «A^3B^5 ва A^2B^6 плёнкаларнинг юзаси ва юза ости соҳаларида ҳосил қилинган икки қатламли наноўлчамли тизимларнинг квант ўлчамли эффектлари ва электрон

хоссалари» (2017-2020 йй.) фундаментал ва амалий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади ион бомбардимон ва кейинги қиздиришда SiO_2 ва MgO юпқа плёнкаларининг электрон зона тузилишлари, эмиссион ва оптик хусусиятларининг ўзгариш қонуниятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

термик оксидланиш ва ионли имплантация усуллари билан олинган SiO_2/Si ва MgO/Mg юпқа плёнкалар таркибини, электрон структурасини, эмиссион ва оптик хусусиятларини ўрганиш;

SiO_2/Si системасининг бўлиниш чегарасида шаклланувчи ўтиш қатламининг физик хусусиятларини ва энергетик-зона параметрларини ўрганиш;

Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинганда SiO_2 сиртида Si ва MgO сиртида Mg наноўлчамли фазалар шаклланишининг асосий механизмларини аниқлаш;

фаол металлар ионларининг паст энергетик имплантацияси ва кейинги қиздиришда SiO_2 ва MgO сирт олди соҳасида наноструктураларнинг шаклланиш жараёнларини (морфологияси, таркиби, структураси) ва уларни оксид плёнкаларнинг электрон, эмиссион ва оптик хусусиятларига таъсирини ўрганиш;

ион имплантация билан диэлектрик плёнкалар юзасида ҳосил қилинган нанофазалар ва наноплёнкаларнинг таркиби ва физик хусусиятларига узоқ муддатли қиздириш ва электрон портлашнинг таъсирини ўрганиш;

киритилган атомларнинг Si ва юпқа оксидли плёнкаларига эга бўлган Si нинг чанглатиш коэффициентларига таъсирини баҳолашга имкон берувчи назарий ҳисобларни тадқиқ этиш.

Тадқиқотнинг объекти ион имплантация ва термик оксидлантириш усуллари билан олинган SiO_2/Si ва MgO/Mg юпқа плёнкаларидан иборат (E_0 = 0,5 - 5 кэВ).

Тадқиқотнинг предмети диэлектрик плёнкалар юза ва юза ости қатламларида нанокристалл ва наноплёнкаларнинг шаклланиш қонуниятлари ва физик механизмларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Оже - электрон спектроскопияси (ОЭС), тез электронларнинг дифракцияси (ТЭД), растрли электрон микроскоп (РЭМ), ультрабинафша фотоэлектрон спектроскопияси (УБЭС), эластик қайтган электронлар спектроскопияси (ЭҚЭС), электронларнинг характерли энергия йўқотиш спектроскопияси (ЭХЭЙС), атом кучлари микроскопи (АКМ).

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

турли усуллар билан олинган SiO_2 плёнкасининг энергетик зона параметрларининг асосий фарқлари, валент электронларнинг ҳолатлар зичлиги, эмиссион ва оптик хусусиятлари ҳамда SiO_2/Si ва MgO/Mg тизимларининг ҳақиқий иккиламчи электронлари ва фотоэлектронлари чиқиш чуқурликлари аниқланган;

илк бор SiO_2/Si ва MgO/Mg тизимлари чегарасида ҳосил бўлган ўтиш қатламининг турли чуқурликларида энергетик зона параметрлари аниқланган;

Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиниб, кейинги қиздиришлар натижасида SiO_2 ва MgO плёнкалари юзасида Si ва Mg наноструктураларини ҳосил қилишнинг асосий механизмлари ва $Si/SiO_2/Si$, $Mg/MgO/Mg$ наноплёнкали тизимларни олишнинг мақбул шартлари аниқланган;

илк бор уч компонентли $Me_xSi_{1-x}O_2/SiO_2/Si$, $Mg_{0,5}Ba_{0,5}O/MgO/Mg$ наноплёнкали тизимлар олинган ва уларнинг электрон тузилиши, эмиссия ва оптик хусусиятлари аниқланган;

ионли легирланган SiO_2 ва MgO плёнкаларининг эмиссион ва оптик хусусиятларига ҳароратли қиздиришнинг таъсири ўрганилган ҳамда ионли легирланган тизимларнинг физик хусусиятлари 100 соат ёки ундан ортиқ вақт давомида ўзгармаслиги юз берадиган қиздиришнинг мақбул режимларида аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

MgO юзасида Mg ҳамда SiO_2 плёнкаси юзасида эса Si плёнкалари ва наноўлчамли фазаларини олиш усуллари ишлаб чиқилган. Мазкур структуралар юпқа плёнкали гетеротизимларнинг эмиссион ва оптик хусусиятларини бошқариш имконини берган;

$Me_xSi_{1-x}O_2/SiO_2/Si$ ва MgBaO/MgO/Mg кўп қатламли тизимларини олиш учун ион имплантация ва қиздиришнинг мақбул режимлари аниқланган;

Олинган натижалар МДЯ ва ЯДЯ структурали асбоблар, шунингдек, кремнийли қуёш элементларини яратишда фойдаланилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги электрон диагностиканинг комплекс усулларини қўллаш ҳамда ўрганилаётган намуналарнинг характеристикаларининг, экспериментал ўлчашлар кўп маротаба текширилгандаги натижаларнинг такрорланиши, метрологик аттестация қилинган ўлчаш техникаларидан фойдаланганлиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижалари бизга гетероэпитаксиал наноўлчамли тузилмаларининг ҳосил бўлиш назарияси ва бу тузилмалардаги зарядли зарралар ҳаракатланиш назарияси ривожланишининг фундаментал базаси бўлган оксидли материалларнинг юза ва сирт қатламида яратилган наноўлчамли тузилмаларнинг шаклланиш механизмларини ва электрон хусусиятларини тушунтириш имконини беради.

$Si/SiO_2/Si$, $MeSiO/SiO_2/Si$, $Mg/MgO/Mg$ ва MgBaO/MgO/Mg наноўлчамли қатламли тузилмалар олиш учун ишлаб чиқилган усуллар ҳар хил турдаги МОП, МДЯ, ЯДЯ тузилмаларини ишлаб чиқиш қаттиқ жисм электроникаси, жумладан, қуёш энергетикаси асбоблари учун контактлар ва тўсиқли қатламлар ҳосил қилишга хизмат қилади.

Тадқиқот натижаларининг амалиётда жорий қилиниши.

Ион бомбардимон ва кейинги қиздиришда SiO_2 ва MgO юпқа плёнкаларининг электрон зона тузилишлари, эмиссион ва оптик хусусиятларининг ўзгариш қонуниятларини аниқлаш асосида:

диэлектрик плёнкаларнинг юза ва юза ости қатламларида нанокристаллар ва наноплёнкаларнинг шаклланиш қонуниятлари ва физик механизмларини ўрганиш учун «Кобальт силицидининг нанокристалларини олиш усули»

Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк агентлигининг ((IAP 05809-сонли, 04.04.2019 й.) ихтиро патенти олинган. Ишлаб чиқилган бу усул кобальт силицидининг нанокристалларини самарали олиш ва ўрганиш имконини берган;

диэлектрик плёнкаларнинг юзасида наноўлчамли фазалар ва наноплёнкаларнинг ҳосил бўлиши ва уларнинг эмиссион ва оптик хусусиятларини ўрганиш бўйича олинган натижалар Ф2-ФА-Ф161-сонли «Эркин юпқа плёнкалар (Al, Cu, Ag) ва массив кристаллар (W, WO_n, TiN, CdTe, SiO_2) юзасида ион имплантацияси усули билан ҳосил қилинган наноўлчамли гетероструктураларнинг шаклланиш механизмлари ва уларнинг физик-кимёвий хоссаларини ўрганиш» ва Ф-2-31-сонли «Наноўлчамли металлар силицид плёнкаларни структураси ва физик хоссаларини ўрганиш ва термосезгир структуралар ҳосил қилиш» давлат грантларини бажаришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 07.06.2019 й., 89-03-2398-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши наноўлчамли гетероструктураларнинг шаклланиш механизмлари, уларнинг физик-кимёвий хоссаларини ва наноўлчамли металлар силицид плёнкаларнинг структурасини самарали ўрганиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 15 та ҳалқаро ва 7 республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 27 та илмий ишлар нашр қилинган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини эълон қилиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркибига кириш, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхати, 55 та расм, 15 та жадвалдан иборат. Диссертация 130 саҳифани ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссератациянинг **«Ион имплантация ва лазер нурланиши таъсирида яримўтказгич ва диэлектрик плёнкаларнинг юзасида ҳосил қилинган наноўлчамли фазалар ва қатламлар бўйича адабиётлар таҳлили»** номли биринчи боби диэлектриклар юзаси ва юза ости қатламларида наноматериалларни олиш соҳасида дунё фанининг ривожланиш

тенденцияларига бағишланган бўлиб, юқори энергияли зарралар ва лазерли нурланиш таъсирида наноўлчамли фазаларнинг шаклланиш жараёни, оксид наноматериалларни кимёвий ва термик турғунлиги, гидрогенизирланган ва оксидланган Si ва улар асосидаги наноструктуралар хусусиятларини ўрганиш, паст энергияли ионли имплантацияда турли табиатли материаллар юзасида наноўлчамли фазалар ва қатламларнинг шаклланиши ҳамда уларни материалларининг эммисион ва оптик хусусиятларга таъсири кўрилган. Хусусан, кремний технологияси учун табиий материал сифатида SiO_2 да Si нанокристалининг шаклланиш жараёнлари ва уларнинг хусусиятлари ҳар томонлама ўрганилган.

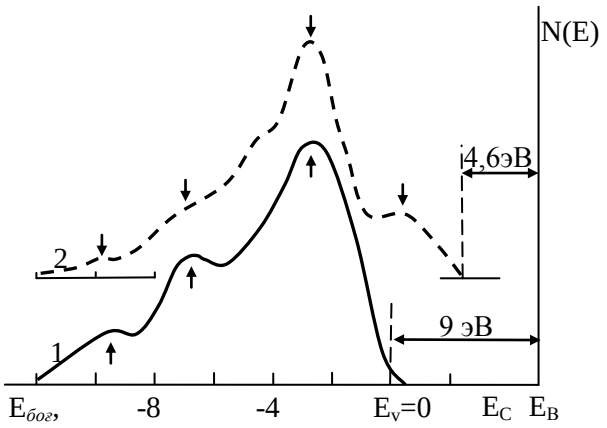
Кремний икки оксиди Si^+ ионлари билан имплантация қилиниб, кейинчалик юқори хароратда қиздириб олинган SiO_2 матрицасидаги Si кристалининг нанокритмалари - SiO_2: nc-Si тизими алоҳида аҳамият касб этади. Ҳал қилинмаган муаммолар аниқланган бўлиб, улар асосида ишнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган**.**

«Юпқа оксид плёнкалар олиш технологияси ва уларнинг таркиби, электрон, оптик хусусиятлари ўрганиш усуллари» номли иккинчи бобда ионли имплантация усулини аппаратли қисми ва материалларнинг таркиби, тузилиши, электрон ва оптик хусусиятларини ўрганиш усуллари кўриб чиқилган. Тадқиқотлар қуйидаги усулларни қўллаш орқали ўтказилган: фотоэлектронларнинг квант чиқиши ва иккиламчи электронлар эмиссияси коэффициентларининг энергетик боғлиқликлари, оже-электрон спектроскопия, электронларнинг характерли энергия йўқотишлари спектроскопияси, эластик қайтган секин электронлар спектроскопияси, ультрабинафша фотоэлектрон спектроскопияси, шунингдек, растрли электрон микроскопия (ISM – 6490), атом кучлари микроскопияси (XIA – 200) ва тез электронларни дифракцияси (LAS – 2200). Диэлектрик плёнкаларни оптик ва иккиламчи – эмиссион характеристи-каларини ўлчашга алоҳида эътибор берилган.

«Турли усуллар билан яратилган SiO_2 ва MgO ўта юпқа плёнкаларининг таркиби, электрон ва оптик хусусиятларига Ar^+ ионлари билан бомбардировканинг таъсирини ўрганиш» номли учинчи боб турли усуллар билан олинган SiO_2 ва MgO ўта юпқа плёнкаларнинг таркиби, электрон ва оптик хусусиятларига Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилишнинг таъсирини ўрганишга бағишланган. Тажриба натижалари термик оксидлаш усули билан ҳаттоки, бир хил шароитда олинган турли қалинликдаги SiO_2/Si аморф плёнкаларининг баъзи физик хусусиятлари бир - бирларидан кескин фарқ қилиши мумкинлигини кўрсатди. Бу қалин плёнкаларда ($d \geq 800 – 1000$ Å) анча сезиларли (1-расм.). $d = 200$ Å бўлган SiO_2/Si нинг валент электронлар спектрида, валент зонанинг юқори чегарасига нисбатан -2,9; -6,5 ва -9,6 эВ учта максимуми мавжуд. Бу чўққиларнинг мавжудлиги Si ва O энергия даражаларининг гибридизацияси билан изоҳланади: 2,9 эВ – 3p (Si) + 2p (O); 6,5 эВ – 3p (Si) + 2s (O); 9,6 эВ – 3s (Si) + 2s (O).

Агар SiO_2 плёнка учун $\chi \sim 1$ эВ эканлигини ҳисобга олсак, $d = 200$ Å да тақиқланган зона кенглиги $E_g = 8$ эВ ни ташкил қилади. Турли қалинликдаги SiO_2 ҳолатлар зичлигини таққосланиши, юпқа плёнкадан ($d = 200$ Å), қалин

плёнкага (d = 1000 Å) ўтишида (~ 0,5 - 1 эВ) асосий максимумни катта энергияли боғлар томонига катта бўлмаган силжиши ва асосий максимумнинг бошланғич қисмида (боғларни кичикрок энергияли соҳасида) катта бўлмаган максимумни вужудга келишини кўрсатди. Эҳтимол қалин плёнкалар юзасида SiO_2 ($1 < x < 2$) билан бир қаторда ностихометрик кремний оксидининг муайян миқдори мавжуд. Мос равишда қалин плёнка спектрининг бошланғич қисмида янги чўққини пайдо бўлиши Si – Si боғларининг мавжудлиги билан изоҳланади.



1-расм. Турли қилинликдаги аморф SiO_2 плёнкаларининг фотоэлектрон спектрлари, d, Å: 1 – 200, 2 – 1000. hν = 21,2 эВ.

Бу эса валент зона кенглигининг кенгайишига (бошланғич қисмни катта энергия томон силжиши) ва тақиқланган зона кенглигининг 3,5 - 4 эВ га торайишига олиб келади (1-расмга қаранг). Si - O боғланиш энергияси (~400 кДж/моль) Si – Si (~190 кДж/моль) боғланиш энергиясига қараганда анча юқори. Шунинг учун, яхши стихометрияга эга бўлган нисбатан қалин (d = 200 – 1000 Å) SiO_2 плёнкаларини олиш учун Si ни термик оксидлантирил-гандан сўнг, SiO_2 юзаси 10 – 15° бурчак остида E_0 = 1 кэВ энергияли Ar^+ ионлари билан емириш, қисқа вақтли юқори температурада (T = 1100 K) қиздириш билан уйғунликда амалга оширилди. Бунда SiO_2 юзанинг ~50 - 60 Å чанглатилди. Бундай ишлов беришдан сўнг ностихометрик оксидлар ва Si нинг ортиқча атомларининг концентрацияси 0 ат. % гача камайган (ОЭС сезгирлиги чегараларида) ва E_g тақиқланган соҳаси 8 – 8,5 эВ гача катталашган.

Ион имплантация усулини қиздириш билан уйғунликда олинган SiO_2 ва MgO юпқа плёнкаларда ўта яхши стихометрияли оксидлар шаклланган.

1-жадвалда қуруқ кислородли атмосферада олинган турли қалинликдаги плёнкалар MgO/Mg ва SiO_2/Si (111) тизимлари учун термо- ва фотоэлектрон чиқиш ишлари, σ_m (ИЭЭ коэффициентини максимал қийматлари), К (hν = 10,8 эВда фотоэлектронларни квант чиқиши) ва ХИЭ чиқиш зоналарининг қийматлари келтирилган. SiO_2 ва MgO плёнкалар поликристалл бўлиб, улар термик оксидлантириш усули билан олинган. 1-жадвалдан кўриниб турибдики, фотоэлектронлар ва ХИЭ чиқиш зонаси λ, SiO_2 учун 250 – 300 Å ни, MgO – учун 450 – 500 Åни ташкил этади. Плёнка қалинлиги λ дан кичик бўлса чиқиш зонаси икки қисмдан иборат бўлади: $\lambda = \lambda_{SiO2} + \lambda_{Si}$, мос равишда мазкур соҳада пленканинг d ортиши билан λ, σ_m ва К ларнинг қийматлари ортиб бормокда. d = 150 – 200 Å да φ ва Ф қийматлари деярли ўзгармайди.

Маълумки, жуда юпқа наноплёнкалар ҳолатида квант-ўлчамли эффектлар намоён бўла бошлайди, бу эса E_g ни катталашишига олиб келади. Бизнинг ҳолатда кремний оксиди плёнкасининг қалинлигини 30 Å гача кичиклаштиришда E_g нинг сезиларли ўзгариши кузатилмади. SiO_2 ни бундай

қалинликларида квант-ўлчамли эффектлар намоён бўлмайди. Юқорида кўрсатилган усуллар билан қалинлиги 25 – 30 Å дан кичик бўлган, бир жинсли яхши стихометрияли SiO_2 плёнкаларни олиш имкони бўлмади.

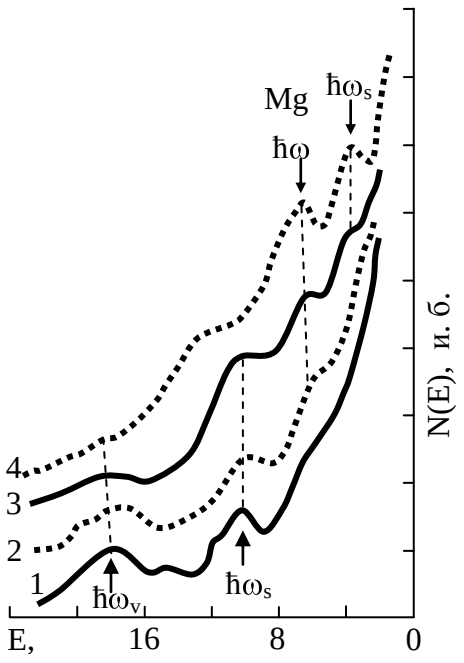
1-жадвал.

SiO_2/Si ва MgO/Mg тизимларининг эмиссион оптик хусусиятлари

Тизимлар	d, Å	φ, эВ	Ф, эВ	σ_m	γ	λ, Å
SiO_2/Si	0 (Si)	4,4	5,0	1,1	$2\cdot10^{-4}$	80–100
	200	5	5,7	2,7	–	120–150
	400	5,1	5,6	2,8	$4\cdot10^{-4}$	200–250
	500	5,1	5,6	2,8	$4\cdot10^{-4}$	250–350
MgO/Mg	0 (Mg)	2,4	2,4	0,9	–	50–60
	150	–	8,0	2,5	–	
	300	5,1	8,3	3,6	$6\cdot10^{-4}$	300–350
	600	5,1	8,5	3,9		400–450

Ar^+ ионлари билан бомбардировка натижасида SiO_2 ва MgO юзаларида ҳосил қилинган наноўлчамли фазаларнинг таркиби, морфологияси ва электрон структураси ўрганилган. 2 - расмда E_0 = 1 кэВ энергия билан турли дозаларда Ar^+ ионлари билан имплантация қилинган MgO монокристал плёнкасининг ЭХЭЙ спектрлари келтирилган. Фақат 5 - 10 Å қалинликдаги сирт қатламлари тўғрисида маълумот олиш учун E_p = 100 эВ да спектрлар олинган. Спектрларнинг таҳлилида MgO ва Mg плазмон тебраниш чўққиларининг ҳаракати кўриб чиқилган (MgO учун: $\hbar\omega_s = 10{,}5\ эВ$, $\hbar\omega_v = 17\ эВ$, Mg учун: $\hbar\omega_s = 3{,}8\ эВ$, $\hbar\omega_v = 6{,}2\ эВ$). Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилиш ЭХЭЙ спектр чўққиларининг ҳолатини ва интенсивлигини ўзгаришига олиб келади, бу Mg - O боғларни узилиши ва юзада эркин Mg ни юзага келишига олиб келади. D = 10^{15} $см^{-2}$ дан бошлаб, нурланиш дозаси ортиши билан магний оксиди $\hbar\omega_v$ ва $\hbar\omega_s$ чўққиларининг интенсивлигини камайиши, Mg учун характерли бўлган плазмали тебранишлар чўққисини пайдо бўлиши ва интенсивлигини катталашиши кузатилади. Охирги ўзгариш Mg нинг сирт концентрациясини ошишига эквивалентдир. Бу ўзгаришлар D = (2 – 4)·10^{16} $см^{-2}$ гача бўлади.

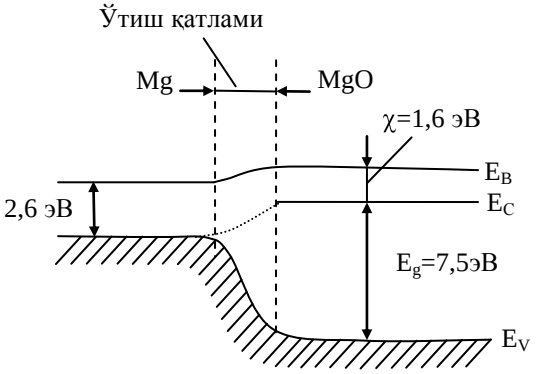
T = 1100 K ҳароратда қиздирилганда юза қатламлар тўлиқ кристалланади. Бунда MgO юзасида куб панжарага кристалланган 5–6 Å қалинликдаги Mg монокристалл плёнка шаклланади.



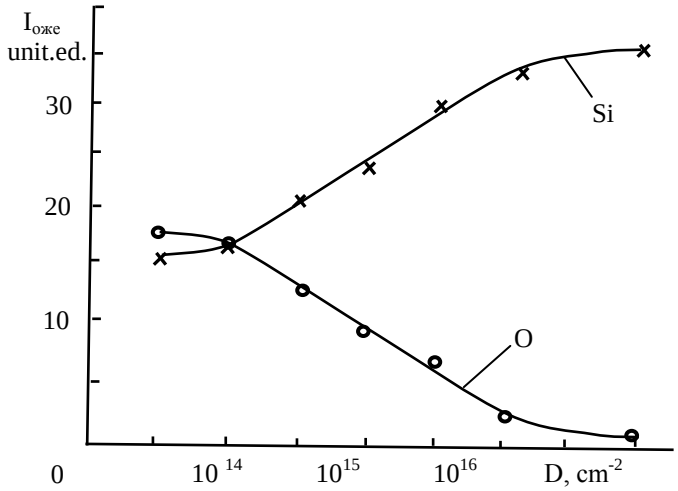
2-расм. Турли дозаларда E_0 = 1 кэВ энергияда Ar^+ ионлари билан имплантация қилинган MgO учун ЭХЭЙ спектрлари. D, $см^{-2}$: 1 – 0; 2 – 10^{15}; 3 – 6·10^{15}; 4 – 4·10^{16}.

3-расмда Mg/MgO наноплёнкали тизим учун тахминий энергетик диаграммаси келтирилган.

4-расмда E_0 = 1 кэВ энергияли Ar^+ ионлари билан нурлантирилган SiO_2 учун Si ва O атомларининг сирт концентрациясининг ионлар дозасига боғлиқлиги кўрсатилган. Кўриниб турибдики, D = 10^{14} – $5\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ оралиғида кислороднинг оже-чўққиларининг интенсивлиги монотон нолга яқинлашган ҳолда камайса, Si оже-чўққиларининг интенсивлиги ортади ҳамда D=$5\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ дан бошлаб тўйиниш нуқтасига чиқади.

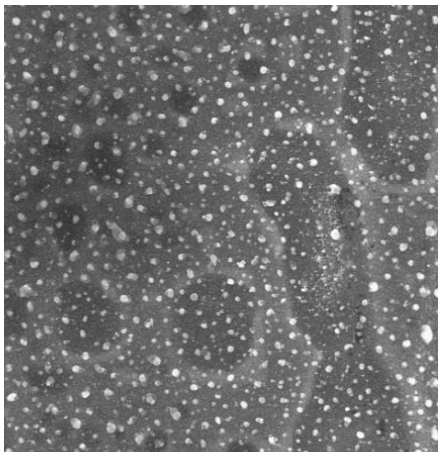


3-расм. Mg/MgO наноплёнкали тизимининг тахминий энергетик диаграммаси.



4-расм. Si ва O атомларининг сирт концентрациясининг Ar^+ ионларининг дозасига боғлиқлиги. E_0 = 1 кэВ.

5-расмда D = $5\cdot10^{14}$ $см^{-2}$ дозада E_0 = 1 кэВ энергияли Ar^+ ионлари билан нурлантирилган SiO_2/Si тузилма юзасининг (SiO_2 плёнка қалинлиги θ ≈ 600 Å) РЭМ да олинган тасвири келтирилган. SiO_2 плёнкаси кислород атмосферасида Si ни термик оксидлантириш усули билан олинган. РЭМ тасвирида SiO_2 плёнкасининг нотекис ўстириш оқибатида 1 - 10 мкм ўлчамдаги доғ кўринишидаги фон аниқланади. Бунга қарамай бомбардировкада SiO_2 юзаси бўйлаб бир текис жойлашган, кремний билан бойитилган 5 - 10 нм ўлчамли нанокластерли фазалар ҳосил бўлади. Ушбу фазалар Si + O турдаги бирикмалар ва концентрацияси 40–50 ат.% ташкил этувчи боғланмаган кремний атомларидан иборат бўлган. D=$D_{тўй}$= $6\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ дозаларда Si - O турдаги бирикмалар йўқ бўлиб кетади ва юза тўлиқ Si атомлари билан қопланади. T = 900 – 950 K ҳароратда қиздирилгандан сўнг қалинлиги

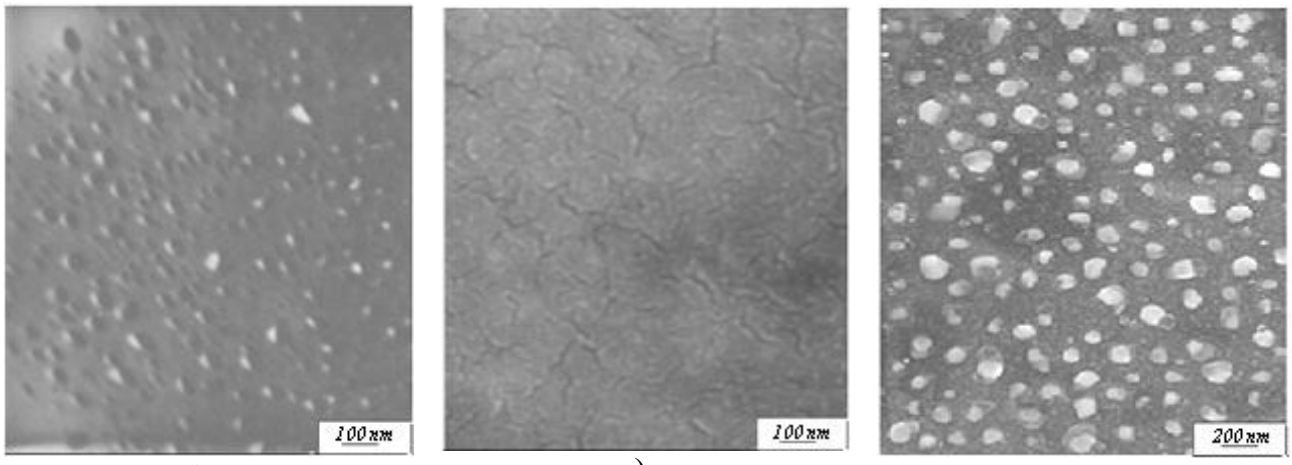


5-расм. E_0 = 1 кэВ да D=$3\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ дозада Ar^+ билан нурлантирилган SiO_2 плёнкасининг РЭМ даги тасвири.

10-15 Å бўлган Si поликрисристал плёнкаси шаклланади.

6- расмда D = 10^{15} $см^{-2}$ ва D = $6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ бўлганда Ar^+ E_0 = 1 кэВ энергияли ионлар билан нурлантирилган SiO_2 плёнкаларни T = 700 K да қиздиришгача (6-расм, а ва в) ва қиздиришдан сўнг (6 - расм, с) олинган РЭМ тасвирлари келтирилган. Ушбу тасвирларни ОЭС натижалари билан таҳлили D = 10^{15} $см^{-2}$ бўлганда SiO_2 юзасида Si атомлари билан 50 – 60 at.% гача бойитилган алоҳида наноўлчамли соҳаларни (кластерли фазалар) шаклланишини кўрсатди (6 - расм, а). Ушбу соҳаларда шунингдек ностихометрик окисли молекулалари ҳам мавжуд. Юқори дозаларда (D ≥ $D_{тўй}$= $6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$) бутун юза «тоза» Si атомлари билан қопланади, яъни юза ўлчамлари 100 – 300 нм бўлган доначалардан ташкил топган Si плёнкаси ҳосил бўлади (расм 6, в).

Имплантациядан кейин t = 30 мин давомида T = 500 K гача қиздирилганда сирт таркиби ва морфологиясида сезиларли ўзгаришлар кузатилмади, бироқ доначалар орасидаги чегаралар аниқроқ (кластерли фазалардаги плёнканинг парчаланиши) ажрала бошлайди. T = 600 K да баъзи Si атомларнинг буғланиши ва кластерли фазаларнинг йириклашиши кузатилди. T= 700 K да диаметри 50 – 100 нм бўлган 30 - 40 Å қалинликдаги Si нинг алоҳида «тоза кластерли фазалари» ҳосил бўлди (6-расм,с).



а) в) с)

6-расм. Турли дозаларда E_0 =1 кэВда Ar^+ ионлари билан нурлантирилган SiO_2 сиртининг РЭМ да олинган тасвири: а) D = 10^{15} $см^{-2}$, в) D = $6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$, с) D = $6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$, T = 700 K қиздирилганда.

«Фаол металл ионлари томонидан диэлектрик плёнкалар юзасида ҳосил қилинган наноўлчамли фазалар ва наноплёнкаларнинг таркиби, электрон ва кристал тузилиши ҳамда физик хусусиятлари» номли тўртинчи бобда SiO_2 ва MgO сирт соҳасида ион имплантация билан наноўлчамли уч қатламли фазалар ва плёнкаларнинг олиш ҳамда уларнинг эмиссион ва оптик хусусиятларини ўрганиш бўйича тажриба натижалари баён қилинган.

2-жадвалда D = $6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ да E_0 = 1 кэВ энергияли Ba^+ ионлари билан имплантация қилинган SiO_2 нинг зона-энергетик ва эмиссион параметрлари келтирилган.

2-жадвал.

$D = 6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ да $E_0 = 1$ кэВ энергияли Ba^+ ионлари билан легирланган 1000 Å қалинликдаги SiO_2 аморф плёнкасининг зона-энергетик ва эмиссион параметрлари

Параметрлар	SiO_2	$Ba^+ \rightarrow SiO_2$		
		T=300 K	T=800 K	T=1000 K
E_v, Ф, эВ	5,6	5,4	5,8	6,0
E_F, eφ, эВ	5,1	3,2	3,6	4,5
E_g, эВ	4,2	4,5	5,0	4,8
χ, эВ	1,4	0,9	0,8	1,2
σ_m	2,8	4,9	5,4	4,7
K	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	–
λ, Å	300	400	–	300

Нисбатан қалин SiO_2 (d > 500 – 1000 Å) плёнкалари учун олинган натижаларни таҳлили қуйидаги ҳулосалар чиқаришга имкон берди:

аморф кремний оксид плёнкасининг ХИЭ чиқиш чуқурлиги 250 – 300 Å ни ташкил қилади;

ион имплантацияси ИЭЭ коэффициентини ва ИВЭ чиқиш соҳасини 1,5 - 2 баробарга, кремний оксидининг таъқиқланган соҳа кенглигини 0,3 - 0,4 эВ га ортишига, сиртни легирловчи металл атомлари билан бойитилишига (~0,4 - 0,5 моноқатлам) ва сирт олди қатламининг маълум бир кристалланишига олиб келади;

ионли-легирланган SiO_2 плёнкани T = 900 – 1000 K гача қиздириш, асосан фаол метал (натрий, магний, барий) оксидларини ҳосил бўлиши билан боғлиқ бўлган λ ва σ_m ларнинг маълум бир даражада (15 – 20 % гача) ўсишига, тақиқланган зона кенглигини сезиларни ошишига (1,5 баровар) олиб келади;

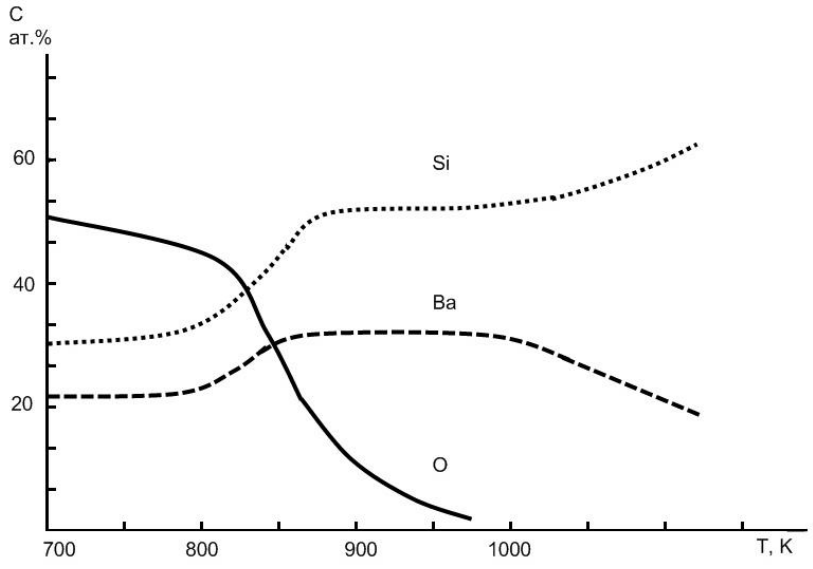
3-жадвалда уч компонентли диэлектрик наноплёнкаларни ҳосил қилиш учун керакли бўлган ион имплантация ва қиздиришнинг мақбул режимлари келтирилган.

3-жадвал.

Уч компонентли диэлектрик наноплёнкаларни ҳосил қилишнинг мақбул режимлари

Ионлар	E_0, кэВ	D, $см^{-2}$	Матрица	Мақбул қиздириш		Бирикма тури	Плёнка қалинлиги, нм
				T, K	W($Дж \cdot см^{-2}$) + T′(K)		
Ba^+	1	$6 \cdot 10^{16}$	SiO_2	700 – 750	1,6; 750	$Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$	4 – 5
Na^+	1	$6 \cdot 10^{16}$	SiO_2	700	1,5; 750	$Na_{0,5}Si_{0,5}O_2$	5 – 6
Ba^+	1	$6 \cdot 10^{16}$	MgO	800	1,6; 800	Mg+Ba+O	5 – 6

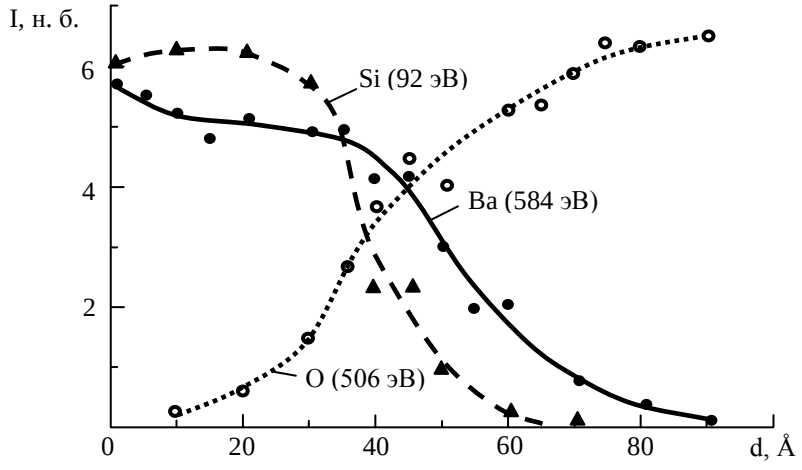
7-расмда $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2/SiO_2$ плёнка учун C_{Ba}, C_{Si}, C_O ларни ҳароратга боғлиқлиги келтирилган. Қиздириш вақти t = 30 мин. Кўриниб турибдики, T = 800 K гача қиздирилганда Si, Ba, O атомлар концентрациясининг ўзгаришига деярли



7-расм. Қиздирилганда $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$ плёнкаси сиртидаги Ba, Si ва O концентрацияларининг ўзгариши

олиб келмайди. Ҳароратни кейинги кўтарилиши кислород концентрациясини кескин камайишига ҳамда юзани Ba ҳамда Si атомлар билан тўйинишига олиб келади. T = 1000 K да $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$ юза қатламида $BaSi_2$ туридаги силицидлар ҳосил бўлади. T = 1100 K дан бошлаб $BaSi_2$ ни парчаланиши юз беради. Шунга ўхшаш тадқиқотлар уч компонентли аморф плёнкалар $Ba_{0,5}Mg_{0,5}O$ учун ҳам ўтказилган.

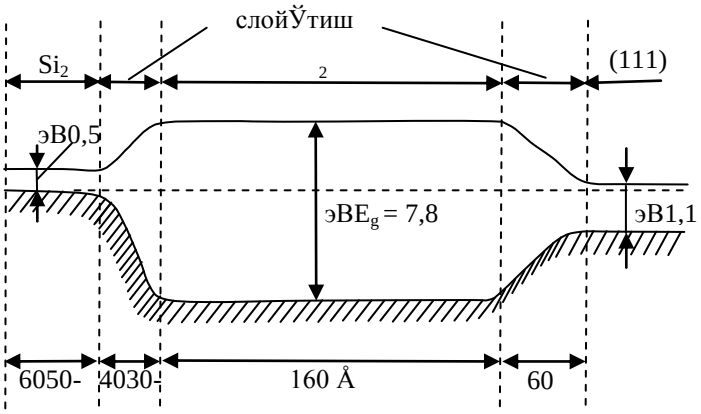
8-расмда мақбул режимда лазерли қиздиришни ($W_{мақ}$ = 1,8 Дж·см$^{-2}$ + $T_{мақ}$ = 1000 K) қисқа вақтли, юқори ҳароратли қиздириш билан уйғунлигида олинган D = 6·10^{16} см$^{-2}$ да E_0 = 1 кэВ энергияли Ba^+ ионлари билан легирланган SiO_2/Si (111) пленкасининг чуқурлиги бўйича Si (E = 91 - 94 эВ), Ba (584 эВ) ва O (506 эВ) оже–чўққилари интенсивлигининг ўзгариши келтирилган (Si ни SiO_2 билан бирикмадаги оже-чўққисининг интенсивлиги ҳисобга олинмаган). SiO_2 плёнкаси қалинлиги d=200 Å. Бунда Ba нинг сирт концентрацияси 50 - 55 ат.% ташкил қилган бўлса, Si ники эса 40 – 45 ат.%, яъни бундай қиздиришдан сўнг d = 50–60 Å қалинликдаги $BaSi_2$ эпитаксиал плёнкаси шаклланади. Натижада, учқатламли эпитаксиал наносистема $BaSi_2/SiO_2$/Si(111) шаклланди.



8-расм. $W_{мақ}$=1,8 Дж·см$^{-2}$+$T_{мақ}$=1000 K қиздиришдан сўнг, SiO_2 чуқурлиги бўйича E_0 = 1 кэВ билан D = 6·10^{16} см$^{-2}$ да Ba^+ ионлари билан имлантация қилинган Si, Ba ва O оже–чўққилари интенсивлигининг ўзгариши

9-расмда нанотизимнинг таҳминий энергетик диаграммаси келтирилган. Кўриниб турибдики, $BaSi_2$ ва SiO_2 плёнкалар орасида d = 30 – 40 Å қалинликдаги ўтиш қатлами ҳосил бўлади. SiO_2/Si орасидаги d ўтиш қатламининг қалинлиги 50 – 60 Å ташкил қилади. Шундай қилиб, мазкур ҳолатда металл ($BaSi_2$) – диэлектрик (SiO_2) – яримўтказгич (Si) туридаги тизим ҳосил бўлади. Легирланган намуналарнинг σ га ҳароратли қиздиришнинг таъсирини тадқиқ

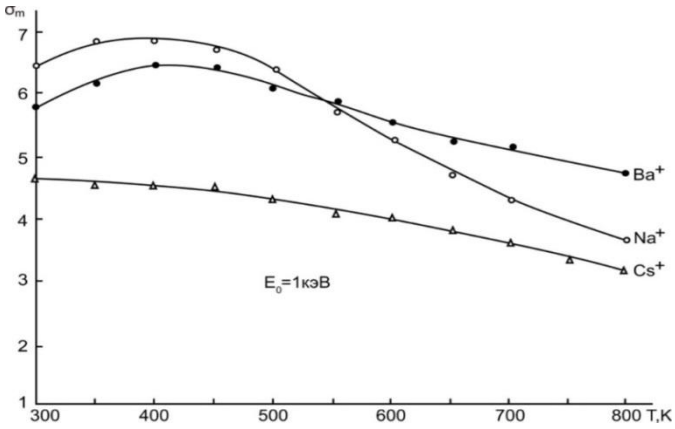
этиш учун намуналар 15 дақиқа давомида маълум бир ҳароратда қиздирилиб, $\sigma(E_p)$ боғлиқлик олинган.



9-расм. $BaSi_2/SiO_2/Si$ нанотизимининг энергетик диаграммаси

10-расмда E_0 = 1 кэВ энергияли Ba^+, Na^+ ва Cs^+ ионлари билан легирланган SiO_2 плёнкаси учун σ_m нинг қийматлари келтирилган. Кўриниб турибдики, Ba^+ билан легирланган намуналар ҳароратга бардошлироқ, цезий билан легирланганлари эса чидамсиз экан. Охирги ҳолатда ҳарорат ошиши билан $\sigma_m(T)$ монотон камаймоқда. Мазкур эффектни легирловчи ионларнинг энергиясига қандай боғлиқлигини кўриш қизиқарли бўлди.

Шундай қилиб, диэлектрикларни ионлар билан бомбардимон қилинганда нуқсонлар комплекслари, шунингдек янги бирикмаларнинг ҳосил бўлиши уларнинг иккиламчи эмиссия хусусиятларини ўзгаришида муҳим рол ўйнайди.



10-расм. E_0=1 кэВ да Ba^+, Na^+ ва Cs^+ ионлари билан легирланган кремний оксиди учун σ_m нинг T га боғлиқлик графиклари

Киритилган атомларнинг кремний ва юпка оксид плёнкали кремнийнинг чанглатиш коэффициентига таъсири ўрганиб чиқилди. Ҳисоблашлар Т.С. Пугачева томонидан ишлаб чиқилган CASNEW - D динамик монте - карло модели, статик моделлар ва алгоритмларни қўллаган ҳолда амалга оширилди. Кейинчалик сирт олди қатламидаги киритилган киришмаларнинг ўртача концентрацияси учун оддий тенглама қўйидагича ёзилади:

— — — , (1)

бу ерда, x_m-ионларнинг максимал кириш чуқурлиги, r – қиймати 0,5-1 ораликда ётадиган ўлчамсиз коэффициент, n_p/n_a - киритилган киришмалар атом зичлигини, нишоннинг атом зичлигига нисбати, k_p–аксланиш коэффициенти, J – ион токи зичлиги. Қуйидагини оламиз:

— —— —— , (2)

бу ерда, $D = J \cdot t$ –ионлар дозаси. (2) ифодадан кўриниб турибдики, юқори дозаларда — —— бўлади.

У ҳолда, киритилган киришмаларнинг чегаравий қийматини қуйидаги формула билан баҳолаш мумкин:

——— (3)

SiO_2/Si тизимида атом тўқнашувлари каскади Si - O боғларнинг узилиши, чангланиши, кислород атомларининг бир қисмини тагликка ўтиши ҳисобига оксид плёнкасининг парчаланишига олиб келади. Кремний сиртида оксид плёнка мавжуд бўлганда, сирт қатламида тезкор ионларлар йўқотаётган энергия, плёнка мавжуд бўлмаганда йўқотаётган энергияда турли массадаги атомлар орасида энергия алмашиш самарадорлиги камлиги туфайли кичик бўлади.

Компютер ҳисоблашларидан келиб чиққан ҳолда, атом тўқнашув каскадларининг ҳосил бўлиши натижасида оксид плёнкаларнинг парчаланиш самарадорлигини баҳолаш мумкин. Бир ионга тўғри келадиган парчаланган SiO_2( ) молекулаларининг ўртача сони қуйидаги йиғиндига тенг:

— (4)

Бу ерда, – кислород чангланишининг парциал коэффициенти, - плёнкадан тагликка ўтган кислород атомларининг миқдори, - кислород атомларини Si атомлари билан алмашинишлар сони, I_0 – SiO_2 плёнкасида киритма нуқсонларини ҳосил қиладиган, уриб чиқарилган кислород атомларининг сони. Мазкур атомларнинг энергияси иссиқлик ҳаракатланиш энергиясидан бир тартибга юқори бўлганлиги учун улар сиртга осонгина кўчади ва десорбцияланиши мумкин.

4-жадвалда SiO_2 плёнкаси қалинлигининг икки хил қийматида (d = 10 Å ва d = 20 Å) Si ионларининг турли энергиялари учун (4) ифоданинг алоҳида қўшилувчилари ва уларнинг R йиғиндисининг қийматлари келтирилган. Мазкур жадвалдан кўриниб турибдики, барча (4) ифодадаги қўшилувчилар оксид плёнкасининг қалинлигига боғлиқ. Юпқа оксид плёнкалари учун парчаланган молекулалар сонини — ионлар энергиясига боғлиқлиги $E_0 \geq 1$ кэВ соҳасида атрофида кучсиз бўлиши кузатилади. Каскад зонасида иссиқлик чўққисини ҳосил бўлиши SiO_2 ни термик парчаланишига ва кислородни десорбсиясига олиб келиши мумкин. Бироқ бажарилган баҳолашлар Si - O боғланиш энергиясининг катталиги ва иссиқлик чўққисини мавжуд бўлиш вақти ($\tau \leq 10$ - 12 с) кичиклиги туфайли мазкур эффектнинг хиссаси сезиларли эмас. $E_0 > 1$ кэВ да сирт қатламидаги нуқсонлар миқдори, унда ажралаётган

иссиқлик энергияси ва оксидли плёнкасининг парчаланиш даражаси энергия билан аста-секин ўсади.

4-жадвал.

Турли энергияли Si ионлари билан бомбардимон қилганда билан оксид плёнкаларини парчалашда ташкил қилувчиларнинг қўшган ҳиссаси

E, кэВ	0.5		1		2		3		5	
d, Å	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
$Z_{Si\to O}$	0.23	0.57	0,44	0.96	0.6	1.15	0.67	1.31	0.79	1.53
$F_{O\to Si}$	0.35	0.72	0.60	1.07	0.75	1.21	0,93	1.28	0,92	1.38
Y_0	0.1	0.12	0.27	0.32	0,49	0.54	0.65	0.76	0.71	0,97
I_0	0.32	1.05	0,49	1.5	0.55	1.61	0.75	2.1	0.73	2.49
$\overline{R}$	0,97	2.48	1.8	3.95	2.39	4.51	3.0	5.45	3.15	6.37

Шу билан бирга E_0 ортиши билан нишоннинг «ҳажми» да нуқтавий нуқсонлар миқдори деярли чизиқли ўсади. Шунинг учун оксид плёнкасини парчалаш учун кичик ток зичлигидаги 1 кэВ энергия мақбул ҳисобланади.

ХУЛОСА

1. Биринчи марта Si ва Mg га O_2^+ ионларнинг имплантация усули билан қиздириш уйғунлигида SiO_2/Si ва MgO/Mg наноплёнкалари (θ = 30 – 150 Å) олинган. Бунда θ = 30-40 Å қалинликдан бошлаб юқори мукаммалликдаги текис плёнкалар шаклланган. Ионли имплантация ва ҳароратли оксидлаш усуллари билан олинган SiO_2 ва MgO плёнкаларининг олинган таркиби, структураси, эмиссион ва оптик хоссаларининг қиёсий таҳлил ўтказилди. Ҳароратли оксидлаш усули билан θ = 200 Å гача олинган SiO_2 (ҳамда MgO) плёнкалар оролча характерига эга бўлса, текис SiO_2 плёнкаларининг юзасида (θ = 200 - 1000 Å) ностихиометрик кремний оксидининг маълум бир молекулалари мавжуд бўлиши аниқланди. Мос равишда мазкур оксидларнинг энергетик зона параметрлари ва валент электронларнинг ҳолат зичлиги мукаммал SiO_2 оксидлари учун хос бўлган параметрларидан фарқ қилади. Мазкур пленкаларнинг юзасини ~50 – 60 Å да Ar^+ ионлари билан емириш ва нишонни кейинчалик юқори ҳароратли қиздирилиши юқори мукаммалликка эга бўлган SiO_2 плёнкаларининг шаклланишига олиб келади.

2. Биринчи марта турли қалинликдаги SiO_2/Si ва MgO/Mg тизимлари-нинг зона-энергетик параметрлари, ХИЭ чиқиш зоналари λ, эмиссион ва оптик хоссалари батафсил ўрганилди. Хусусан, мукаммал поликристал SiO_2 пленкалари учун E_g ~ 8,2 эВ ни, MgO учун - 7,2 эВ ташкил қилган бўлса, SiO_2 ва MgO аморф плёнкалари учун λ нинг қийматлари эса мос равишда ~ 250 Å ва 400 Å ташкил қилди.

3. РЭМ ва АКМ да олинган маълумотларга кўра Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинганда SiO_2 сиртида ~ 25 – 30 Å қалинликда Si наноплёнкалар ва нанокластерли фазалар шаклланган бўлса, MgO сиртида эса Mg нанотузилмалари шаклланган. Ar^+ ионлари билан бомбардимон қилинганда SiO_2 юзасида кластерлар ҳосил бўлишининг феноменологик модели аниқлан-

ди. Мазкур ҳолда, Ar^+ ионлари билан бомбардимон натижасида SiO_2 боғлари узилиб Si ва O га ажралади, кислород бу қатламларни вакуумга тарк этади. Натижада юқори дозаларда ($D > 5\cdot10^{16}$ cm^{-2}) SiO_2 сиртида Si юпқа қатлами ҳосил бўлади.

4. Биринчи марта Ba^+ ва Na^+ ионларини имплантация усули ва кейинчалик қиздириш (лазер+ҳарорат) билан SiO_2 ва MgO юпқа плёнкаларида 40 – 60 Å қалинликдаги $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$, $Na_{0,5}Si_{0,5}O_2$ ва MgBaO наноплёнкалари олинди. Ион имплантацияси ва кейинги қиздиришнинг турли режимларида сиртнинг таркиби, сирт морфологияси ва физик хусусиятлари ўрганилди. Хусусан, ион имплантациядан сўнг σ_m ва К қийматлари 2 - 3 марта ортади. Мазкур ўзгаришлар чиқиш ишининг камайиши, хақиқий иккиламчи электронлар ва фотоэлектронларнинг чиқиш зонасининг ошиши, нисбатан катта эмиссион самарадорликдаги қатламларнинг шаклланиши билан изоҳланади.

5. Биринчи марта W = 1,8 Дж·см$^{-2}$ энергия зичлигига эга бўлган лазерли қиздириш ва T > 1000 К да қиздиришда $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$ нинг парчаланиши ва O атомларининг буғланиши ҳамда ионли-легирланган қатламда $BaSi_2$ туридаги силицидлар ҳосил бўлиши кўрсатилган. $BaSi_2/SiO_2/Si$ системаси учун энергетик-зона диаграммаси қурилган. Олинган кўпқатламли тизимларининг таркиби, тузилиши, эмиссион ва оптик хусусиятлари 100 ва ундан катта соатларда T = 700 К гача қиздирилганда, ток зичлиги j_e = 30 мкА/см^2 гача бўлган электронлар билан бомбардимон қилганда ҳамда энергия зичлиги W = 1-1,2 Дж·см$^{-2}$ гача бўлган лазерли қиздирганда амалда ўзгармаслиги кўрсатилган.

6. Киритилган атомларни Si ва юпқа оксид плёнкали Si нинг чанглатиш коэффициентларига таъсири бўйича назарий ҳисоблашлар ўтказилди. Si юзасида оксид пленка мавжуд бўлганда атомлар тўқнашувлари каскадлари Si-O боғларининг узилиши, чангланиши ва кислород атомларининг бир қисмини тагликка ўтиши ҳисобига оксидли пленкаларнинг парчаланишига олиб келиши кўрсатилган. E_0 = 1 кэВ энергияли кремний ионлари оксид плёнкаларини йўқ қилиш учун мақбул эканлиги аниқланди.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЮСУПЖОНОВА МАХСУНА БАХОДИРОВНА

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ

01.04.04 – Физическая электроника

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

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B 2017.2.PhD / FM99.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице по адресу www.iplt.uz и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» по адресу www.ziyonet.uz.

Научный руководитель:	**Ташмухамедова Дилноза Артикбаевна** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Исаханов Зинаобидин Абилпейзович** доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
	Рахмонов Ганибай Таджиевич кандидат физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	**Ферганский политехнический институт**

Защита диссертации состоится «____» сентября 2019г. в 14^{00} часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 по присуждению ученых степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (99871) 262–32–54, e-mail: info@iplt.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № ___). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.: (99871) 262–31–69).

Автореферат диссертации разослан «____» _____2019 года.

(Реестр протокола рассылки ____ от «____» _____2019 года).

Х.Б.Ашуров
председатель Научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

Д.Т.Усманов
учёный секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Б.Е.Умирзаков
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 во всем мире в быстроразвивающейся области физической электроники одним из перспективных направлений является исследование процессов формирования наноматериалов, изучение их магнитных, электрических, оптических и других свойств. Диэлектрические пленки и частицы типа SiO_2 и MgO являются перспективными материалами микро-, нано- и оптоэлектроники. На их основе создаются металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) и полупроводник – диэлектрик – полупроводник (ПДП) структуры, применяемые в сверхчастотных детекторах, транзисторах, интегральных схемах, приборах оптической памяти и приемниках излучения различной частоты. Для получения пленок оксидов в основном используются методы термического окисления в атмосфере кислорода. На поверхность этих пленок в условиях сверхвысокого вакуума напыляются атомы необходимого металла и полупроводника. При этом однородные пленки формируются начиная с толщины 50 – 100 нм.

В последние годы хорошо изучены вторично-эмиссионные свойства пленок SiO_2 и MgO и изменения этих свойств при бомбардировке ионами активных металлов. Научно-технический прогресс требует расширения использования наноразмерных оксидных пленок, легированных ионами активных металлов, так как значительное изменение их электронных свойств может способствовать созданию новых приборов электронной техники.

В последнее время в Республике Узбекистан активно проводятся научно-исследовательские работы по актуальным проблемам физики поверхности твердых тел, связанным с определением состава, электронной структуры и оптических свойств материалов, необходимых для микро- и наноэлектроники. Поэтому в последнее время разработаны методы получения оксидных пленок на поверхности кремния и различных металлов с использованием современных методов. Однако до настоящего времени не имелись достоверных сведений по получению однородных нанопленок SiO_2 и MgO толщиной $\leq 100 – 200$ Å, а также не проводились исследования по получению на их поверхности наноразмерных фаз и пленок полупроводников и металлов. Практически не были изучены состав, кристаллическая и электронная структура, эмиссионные и оптические свойства тонких пленок оксидов с наноразмерными структурами. Эти актуальные проблемы современной физической электроники и электронного приборостроения определили цели и задачи данной диссертационной работы.

Данное диссертационное исследование в определенной степени соответствует задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» и № УП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, имеющих отношение к данной области деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. В последнее время усилия многих зарубежных научных центров направлены на получение наноразмерных структур на основе материалов различной природы и изучения их электронных и оптических свойств. Наиболее изучены процессы формирования и свойства нанокристаллов Si в SiO_2 как наиболее естественного для кремниевой технологии материала. Особое внимание привлекает система SiO_2:nc-Si– нановключения кристаллического Si в матрице SiO_2, полученные имплантацией ионов Si^+ в диоксид кремния с последующим высокотемпературным отжигом. Установлено, что эта система обладает фотолюминесценцией (ФЛ) в области 750 – 900 нм **(**T. Shimizu-Iwayama, K. Fujita, S. Nakao, K.S. Min, K. Shcheglov, C.M. Yang, H.A. Atwater, S. Cheylan, N. Langford, R.G. Elliman). Т Д.И. етельбаум, О.Н. Горшков и др. показали, что ионная имплантация позволяет не только формировать систему, но и вводить в нее примесные атомы. Обнаружено, например, что ионное легирование фосфором в определенных условиях значительно повышает эффективность ФЛ.

J. Nishii и др. установлено, что на основе $Si_{1-x}Ge_xO_2$ можно создавать многофункциональные материалы, сочетающие фоточувствительность со светоизлучающими свойствами, что важно для многих перспективных применений. Были получены хорошие результаты по изменению состава, структуры и свойств SiO_2 и MgO при взаимодействии с другими материалами, в частности при ионной имплантации учеными А.М. Икаевым, Ю.В. Гуляевым, А.А. Черновым, М.Т. Нормурадовым, Б.Е. Умирзаковым и др. Ими показана возможность использования этих материалов в создании перспективных приборов электронной промышленности.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа. Работа выполнена в Ташкентском государственном техническом университете в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ Республики Узбекистан и проектов № А-4-7 «Разработка технологии синтеза гетероэпитаксиальных наноразмерных структур в приповерхностной области монокристаллических пленок кремния и арсенида галлия для приборов микро- и оптоэлектроники, в том числе солнечной энергетики» (2015 – 2017); № ЁФ-2-12 «Влияние образования наноразмерных структур на эмиссионные свойства и рабочие характеристики W, Pd и PdBa» (2016 – 2017); № ОТ-Ф2-53 «Квантово-размерные эффекты и электронные свойства двухслойных наноразмерных структур, созданных на поверхности и в приповерхностной области пленок A^3B^5 и A^2B^6» (2017 – 2020).

Целью диссертационной работы является установление закономерностей изменения электронно - зонной структуры, эмиссионных и оптических свойств тонких пленок SiO_2 и MgO при ионной бомбардировке и последующем отжиге.

Задачи исследования:

изучить состав, электронную структуру, эмиссионные и оптические свойства тонких пленок SiO_2/Si и MgO/Mg, полученных методами термического окисления и ионной имплантации;

изучить зонно-энергетические параметры и физические свойства переходного слоя, формирующегося на границе раздела системы SiO_2/Si;

выявить основные механизмы формирования наноразмерных фаз Si на поверхности SiO_2 и Mg на поверхности MgO при бомбардировке ионами Ar^+;

изучить процессы (морфология, состав, структура) формирования наноструктур в приповерхностной области SiO_2 и MgO при низкоэнергетической имплантации ионов активных металлов с последующим отжигом и их влияния на электронные, эмиссионные и оптические свойства оксидных пленок;

изучить влияние длительного прогрева и электронной бомбардировки на состав и физические свойства нанофаз и нанопленок, созданных на поверхности диэлектрических пленок ионной имплантацией;

провести теоретические расчеты, позволяющие оценить влияние внедренных атомов на коэффициенты распыления Si и Si с тонкой окисной пленкой.

Объектом исследования являлись тонкие пленки SiO_2/Si и пленки MgO/Mg, полученные методами термического окисления и имплантации ионов (E_0 = 0,5 – 5 кэВ).

Предметом исследования являлись закономерности и физические механизмы формирования нанокристаллов и нанопленок на поверхности и в приповерхностных слоях диэлектрических пленок.

Методы исследования – оже - электронная спектроскопия (ОЭС), дифракция быстрых электронов (ДБЭ), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), спектроскопия упруго-отраженных электронов (СУОЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), атомно - силовая микроскопия (АСМ), растровая электронная микроскопия (РЭМ).

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

выявлены основные причины отличия параметров энергетических зон, плотности состояния валентных электронов, эмиссионных и оптических свойств пленок SiO_2, полученных разными методами. Определена глубина выхода истинно-вторичных электронов и фотоэлектронов систем SiO_2/Si и MgO/Mg;

впервые определены зонно-энергетические параметры на различных глубинах переходного слоя, образующегося на границе систем SiO_2/Si и MgO/Mg;

выявлены основные механизмы формирования наноструктур Si и Mg на поверхности пленок SiO_2 и MgO при бомбардировке ионами Ar^+ и последующего отжига. Определены оптимальные условия получения нанопленочной системы $Si/SiO_2/Si$, Mg/MgO/Mg;

впервые получены трехкомпонентные нанопленочные системы $Me_xSi_{1-x}O_2/SiO_2/Si$, $Mg_{0,5}Ba_{0,5}O/MgO/Mg$ и определены их электронная структура, эмиссионные и оптические свойства;

изучено влияние температурного прогрева на эмиссионные и оптические свойства ионно-легированных пленок SiO_2 и MgO. Определены оптимальные режимы прогрева, при которых физические свойства ионно-легированных систем не изменяются в течение 100 и более часов.

Практические результаты исследования заключается в следующем:

разработана методика получения наноразмерных фаз и пленок Si на поверхности пленок SiO_2, а также Mg на поверхности MgO. Эти структуры позволяют управлять эмиссионными и оптическими свойствами тонкопленочных гетеросистем;

определены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения многослойных систем $Me_xSi_{1-x}O_2/SiO_2/Si$ и MgBaO/MgO/Mg. Полученные данные могут быть полезны при создании приборных МДП - и ПДП - структур, а также кремниевых солнечных элементов.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением комплекса методов электронной диагностики, а также воспроизводимостью характеристик исследуемых объектов, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений, использованием метрологически аттестованной измерительной техники.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования. Полученные результаты позволяют объяснить механизмы формирования и электронные свойства наноразмерных структур, созданных на поверхности и в приповерхностном слое оксидных материалов, которые являются фундаментальной базой для развития теории образования гетероэпитаксиальных наноразмерных структур и теории движения заряженных частиц в этих структурах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные методики получения наноразмерных слоистых структур типа $Si/SiO_2/Si$, $MeSiO/SiO_2/Si$, Mg/MgO/Mg и MgBaO/MgO/Mg весьма важны при разработке различных МОП, МДП, ПДП - структур, контактных и барьерных слоев для приборов твердотельной электроники, в том числе солнечной энергетики.

Внедрение результатов исследования. На основе установление закономерностей изменения электронно - зонной структуры, эмиссионных и оптических свойств тонких пленок SiO_2 и MgO при ионной бомбардировке и последующем отжиге:

получен патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан «Способ получения нанокристаллов силицида кобальта» (№ IAP 05809 04.04.2019) для изучения физических

механизмов и закономерностей формирования наноплёнок и нанокристалов в поверхностных и приповерхностных областях диэлектрических пленок. Разработанный метод даёт возможность изучения и эффективного получения нанокристаллов силицида кобальта;

полученные результаты по образованию наноразмерных фаз и нанопленок на поверхности диэлектрических пленок и по изучению их эмиссионных и оптических свойств использованы в научных проектах Ф2-ФА-Ф161 «Механизмы формирования свободных тонких пленок (Al, Cu, Ag и Me-Si) и наноразмерных гетероструктур, созданных на поверхности кристаллов (W, WO_n, TiN, CdTe, SiO_2) методом ионной имплантации, и изучение их физико-химических свойств» и Ф-2-31 «Исследование структуры и физических свойств наноразмерных пленок силицидов металлов и разработка термочувствительных структур» (Справка № 89-03-2398 Министерство высшего и среднего специального образования РУз от 07.06.2019). Применение научных результатов даёт возможность эффективного изучения структуры плёнок наноразмерных силицидов металла, их физико-химических свойств и механизмов формирования наноразмерных гетероструктур.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на 15 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 27 научных трудов, из них 5 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включая 55 рисунков и 15 таблиц. Объем диссертации включает 130 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследования с основными приоритетными направлениями развитии науки и технологий в республике, приведены обзор научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, определены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ литературных данных по формированию наноразмерных фаз и слоев на поверхности полупроводников и диэлектрических пленок под действием ионной бомбардировки и лазерного облучения»,** посвященной тенденциям развития мировой науки в области получения наноматериалов на поверхности и в приповерхностной области диэлектриков, рассмотрены процессы

формирования наноразмерных фаз под действием высокоэнергетических частиц и лазерного облучения, химической и термической стабильности оксидных наноматериалов, по изучению свойств гидрогенизированного и окисленного Si и наноструктур на их основе, формирования наноразмерных фаз и слоев на поверхности материалов различной природы при низкоэнергетической ионной имплантации и их влиянию на эмиссионные и оптические свойства материалов. В частности, всесторонне изучены процессы формирования и свойства нанокристаллов Si в SiO_2 как наиболее естественного для кремниевой технологии материала. Особое внимание привлекает система SiO_2:nc-Si – нановключения кристаллического Si в матрице SiO_2, полученная имплантацией ионов Si^+ в диоксид кремния с последующим высокотемпературным отжигом. Определены нерешенные проблемы, на основе которых сформулированы цель и задачи данной работы.

Во второй главе **«Технология получения тонких оксидных пленок и методы исследования их состава, структури, электронных и оптических свойств»** была рассмотрена аппаратная часть метода ионной имплантации и методов исследования состава, структуры, электронных и оптических свойств материалов. Исследования проводились с использованием методов измерения энергетических зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) и квантового выхода фотоэлектронов, оже-электронной спектроскопии, спектроскопии характеристических потерь энергии электронов, спектроскопии упруго-отраженных медленных электронов, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия, а также растровая электронная микроскопия (ISM – 6490), атомно-силовая микроскопия (XIA – 200) и дифракции быстрых электронов (LAS – 2200). Особое внимание уделено особенностям измерения вторично-эмиссионных и оптических характеристик диэлектрических пленок.

В третьей главе **«Изучение влияния бомбардировки ионами Ar^+ на состав, электронные и оптические свойства сверхтонких пленок SiO_2 и MgO созданных различными методами»** посвящена изучению влияния бомбардировки ионами Ar^+ на состав, электронные и оптические свойства сверхтонких пленок SiO_2 и MgO, созданных различными методами. Результаты экспериментов показали, что некоторые физические свойства аморфных пленок SiO_2/Si разной толщины, полученных методом термического окисления даже в одинаковых условиях могут существенно отличаться друг от друга. Это очень заметно в случаях толстых пленок ($d \geq 800$ - 1000 Å) (рис. 1). В спектре валентных электронов SiO_2/Si с d = 200 Å содержится три максимума -2,9; -6,5 и -9,6 эВ относительно потолка валентной зоны. Наличие этих пиков объясняется гибридизацией энергетических уровней Si и O: 2,9 эВ – 3p (Si) + 2p (O); 6,5 эВ – 3p (Si) + 2s (O); 9,6 эВ – 3s (Si) + 2s (O).

Если учесть, что χ для пленки SiO_2 составляет ~1 эВ, то в случае d = 200 Å ширина запрещенной зоны E_g = 8 эВ. Сравнение плотности состояний SiO_2 с разной толщиной показывает, что при переходе от тонкой (d = 200Å) пленки к толстой (d = 1000 Å) происходит небольшой сдвиг (~0,5 – 1 эВ) основного максимума в сторону больших энергий связи и появление небольшого максимума в начальной части (в области меньших энергий связи) основного

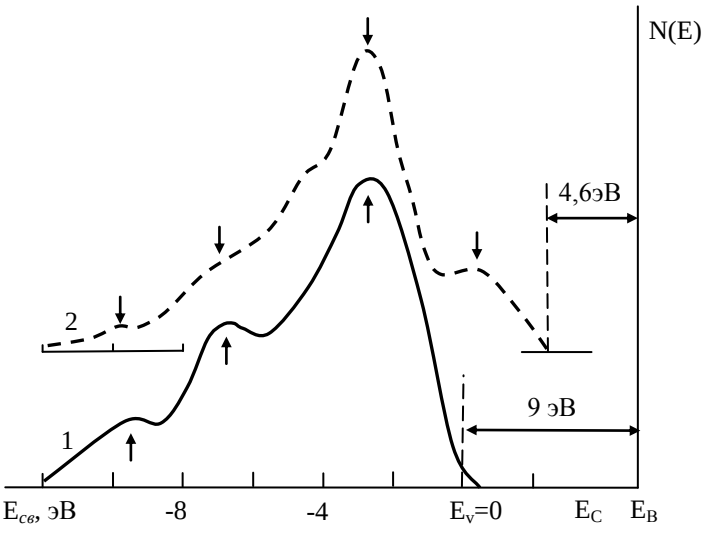


Рис. 1. Фотоэлектронные спектры аморфных пленок SiO_2 толщиной d, Å: 1 – 200, 2 – 1000. hν = 21,2 эВ

максимума. По-видимому, на поверхности толстой пленки наряду с SiO_2 содержится некоторое количество нестехиометрического окисла кремния – SiO_x ($1 < x < 2$). Соответственно появление нового пика в начальной части спектра толстой пленки объясняется наличием связей Si–Si. Последние приводят к уширению ширины валентной зоны (к смещению начальной части в сторону больших энергий) и сужению ширины запрещенной зоны на 3,5 – 4 эВ (см. рис. 1). Энергия связи Si – O (~400 кДж/моль) значительно больше, чем энергия связи Si – Si (~190 кДж/моль). Поэтому для получения сравнительно толстых (d = 200 – 1000 Å) пленок SiO_2 с хорошей стехиометрией после термического окисления Si проводилось слабое травление поверхности SiO_2 ионами Ar^+ с E_0 = 1 кэВ под углом 10 – 15° относительно поверхности в сочетании с кратковременным высокотемпературным (T = 1100 K) прогревом. При этом распылялось ~50 – 60 Å поверхности SiO_2. После такой обработки концентрация нестехиометрического окисла и избыточных атомов Si уменьшалась до 0 ат.% (в пределах чувствительности ОЭС) и E_g увеличивалась до 8 – 8,5 эВ. В случае тонких пленок SiO_2 и MgO, полученных методом ионной имплантации в сочетании с отжигом, формировались окислы с очень хорошей стехиометрией.

В табл. 1 приведены значения термо- и фотоэлектронной работы выхода, σ_m (максимальное значение коэффициента ВЭЭ), К (квантовый выход фотоэлектронов при hν = 10,8 эВ) и зоны выхода истинно-вторичных электронов (ИВЭ) для системы SiO_2/Si (111) и MgO/Mg, с пленками разной толщины, полученными в атмосфере сухого кислорода. Пленки SiO_2 и MgO были поликристаллическими, получены методом термического окисления. Из табл. 1 видно, что зона выхода ИВЭ λ и фотоэлектронов для SiO_2 составляет ~250–300 Å, а для MgO – 450 – 500 Å. При толщинах пленок меньше чем λ зона выхода состоит из двух частей: $\lambda=\lambda_{SiO2}+\lambda_{Si}$, соответственно в этой области с ростом d пленок увеличивается значение λ, σ_m и К. Значения φ и Ф с d = 150 – 200 Å практически не меняются.

Известно, что в случае очень тонких нанопленок начинают проявляться квантово-размерные эффекты, что приводит к увеличению E_g. В нашем случае заметного изменения E_g пленки окиси кремния при уменьшении ее толщины до 30 Å не наблюдалось. По-видимому, при таких толщинах SiO_2 пока еще не проявляются квантово-размерные эффекты. Указанными выше методами нам

не удалось получить однородные с хорошей стехиометрией пленки SiO_2 толщиной меньше, чем 25 – 30 Å.

Таблица 1.

Эмиссионные и оптические характеристики систем SiO_2/Si и MgO/Mg

Система	d, Å	φ, эВ	Ф, эВ	σ_m	γ	λ, Å
SiO_2/Si	0 (Si)	4,4	5,0	1,1	$2\cdot10^{-4}$	80–100
	200	5	5,7	2,7	–	120–150
	400	5,1	5,6	2,8	$4\cdot10^{-4}$	200–250
	500	5,1	5,6	2,8	$4\cdot10^{-4}$	250–350
MgO/Mg	0 (Mg)	2,4	2,4	0,9	–	50–60
	150	–	8,0	2,5	–	
	300	5,1	8,3	3,6	$6\cdot10^{-4}$	300–350
	600	5,1	8,5	3,9		400–450

В работе изучены состав, морфология и электронная структура наноразмерных фаз, созданных на поверхности SiO_2 и MgO бомбардировкой ионами Ar^+. На рис. 2 приведены спектры ХПЭ монокристаллической пленки MgO, имплантированной ионами Ar^+ с E_0 = 1кэВ разными дозами. Чтобы получить информацию только о поверхностных слоях толщиной 5 – 10 Å, эти спектры были сняты при E_p = 100 эВ. При анализе спектров рассматривали поведение пиков плазменных колебаний MgO и Mg (для MgO: $\hbar\omega_s = 10{,}5\ эВ,\ \hbar\omega_v = 17\ эВ$, для Mg: $\hbar\omega_s = 3{,}8\ эВ,\ \hbar\omega_v = 6{,}2\ эВ$). Бомбардировка ионами Ar^+ приводит к изменению интенсивности и положения пиков спектра ХПЭ, что связано с разложением связи Mg – O и появлением свободного Mg на поверхности.Начиная с D = 10^{15} $см^{-2}$, с ростом дозы облучения наблюдается уменьшение интенсивности пиков $\hbar\omega_v$ и $\hbar\omega_s$ окиси магния, появление и увеличение интенсивности пиков плазменных колебаний, характерных для Mg. Увеличение последних эквивалентно увеличению поверхностной концентрации Mg. Эти изменения происходят до D = $(2 – 4)\cdot10^{16}$ $см^{-2}$. После прогрева при T=1100 К поверхностные слои полностью кристаллизуются.

При этом на поверхности MgO формируется монокристаллическая пленка Mg толщиной 5 – 6 Å, кристаллизованная в кубическую решетку.

На рис. 3 представлена примерная энергетическая диаграмма для нанопленочной системы Mg/MgO.

На рис. 4 приведены зависимости поверхностной концентрации атомов Si и O от дозы ионов для SiO_2, облученного ионами

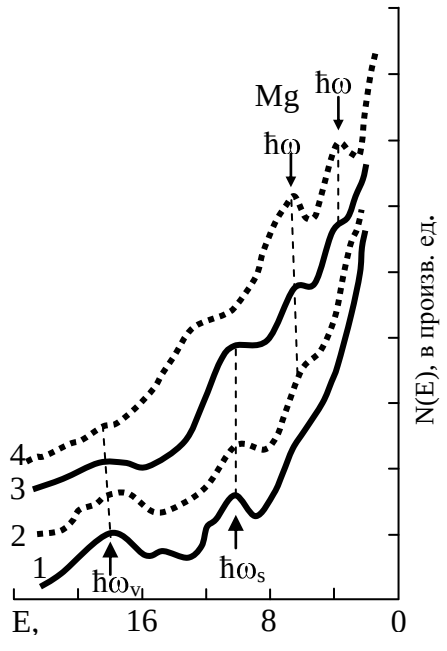


Рис. 2. Спектры ХПЭ для MgO, имплантированного ионами Ar^+ с E_0 = 1 кэВ при D, $см^{-2}$: 1 – 0; 2 – 10^{15}; 3 – $6\cdot10^{15}$; 4 – $4\cdot10^{16}$

Ar^+ с E_0 = 1 кэВ. Видно, что в интервале D = 10^{14} – $5\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ интенсивность оже-пика кислорода монотонно уменьшается, приближаясь к нулю, а интенсивность оже-пика Si увеличивается и выходит на плато, начиная с D=$5\cdot10^{16}$ $см^{-2}$. Это объясняется тем, что в результате бомбардировки ионами Ar^+ в поверхностной области SiO_2 происходит разрыв связей Si и O и кислород уходит из этих слоев в вакуум. В результате при больших (D > $5\cdot10^{16}$ $см^{-2}$) дозах на поверхности SiO_2 образуется тонкий слой Si.

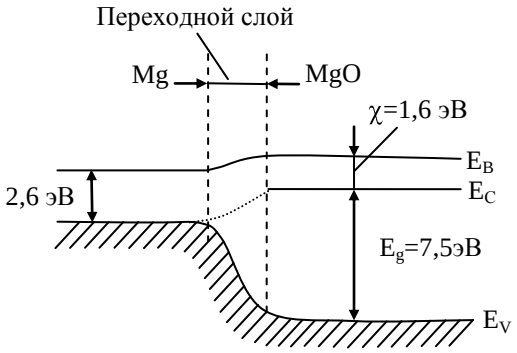


Рис. 3. Примерная энергетическая диаграмма нанопленочной системы Mg/MgO

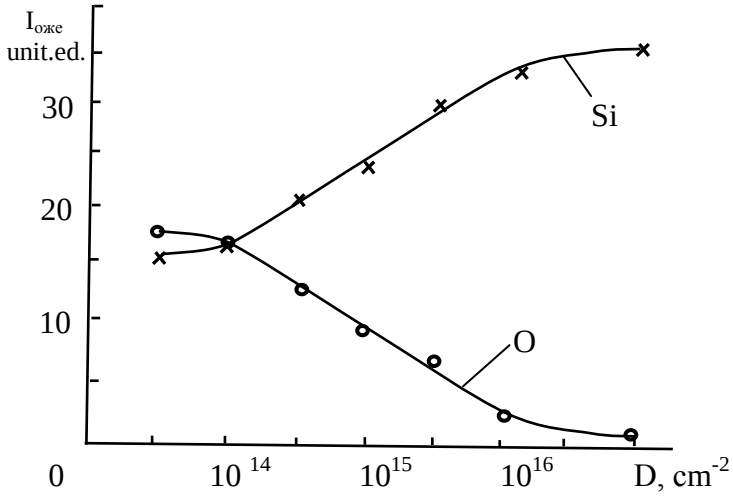


Рис. 4. Зависимости поверхностной концентрации атомов O и Si от дозы ионов Ar^+. E_0 = 1 кэВ

На рис. 5 приведено РЭМ - изображение поверхности SiO_2/Si (толщина пленки SiO_2 θ ≈ 600 Å), облученной ионами Ar^+ с E_0 = 1 кэВ при D = $5\cdot10^{14}$ $см^{-2}$. Пленки SiO_2 получены методом термического прогрева Si в атмосфере кислорода. Вследствие неравномерного роста пленки SiO_2 в РЭМ- изображении обнаруживается фон в виде пятен размерами 1 – 10 мкм.

Независимо от этого при бомбардировке образуются равномерно расположенные по поверхности SiO_2 нанокластерные фазы размерами 5 – 10 нм, обогащенные кремнием. В этих фазах содержатся соединения типа Si + O и несвязанные атомы Si, концентрация которых составляет 40 – 50 ат.%. При дозе D = $D_{нас}$ = $6\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ соединения типа Si - O исчезают и вся поверхность покрывается атомами Si. После прогрева при T = 900 - 950 K формируется поликристаллическая пленка Si толщиной 10 - 15 Å.

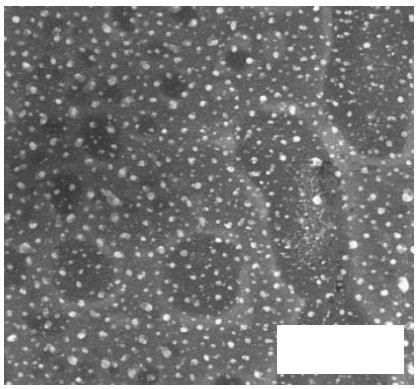
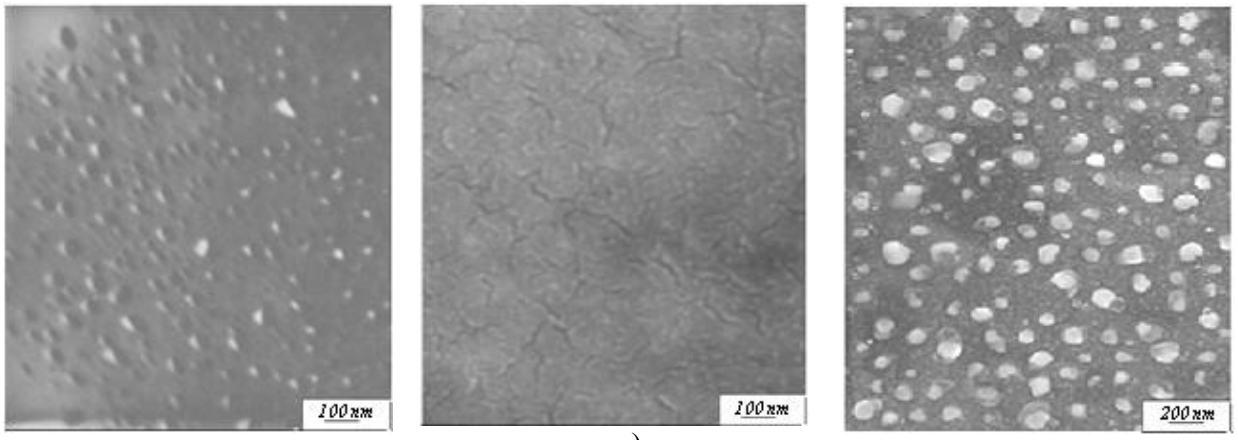


Рис. 5. РЭМ-изображение поверхности пленки SiO_2, облученной ионами Ar^+ с E_0=1 кэВ при D= $3\cdot10^{16}$ $см^{-2}$

На рис. 6 приведены РЭМ - изображения поверхности, снятые до (а и в) и после прогрева при T = 700 K (с) пленок SiO_2, облученных ионами Ar^+ с E_0 = 1 кэВ при D = 10^{15} $см^{-2}$ и D=$6\cdot10^{16}$ $см^{-2}$. Анализ этих картин совместно с результатами ОЭС показал, что при D=10^{15} $см^{-2}$ на поверхности SiO_2 формируются отдельные

наноразмерные участки (кластерные фазы), обогащенные до 50 - 60 ат.% атомами Si (рис. 6, а). На этих участках также содержатся молекулы нестехиометрического окисла. При высоких ($D \geq D_{нас} = 6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$) дозах вся поверхность покрывается атомами «чистого» Si, т.е. образуется пленка Si, состоящая из зерен с поверхностными размерами 100 – 300 нм (рис. 6, в).

Постимплантационный отжиг до Т = 500 К в течение t = 30 мин. не приводил к заметному изменению состава и морфологии поверхности, однако границы между зернами начинают выделяться более четко (распад пленки на кластерные фазы). При Т = 600 К наблюдалось некоторое испарение атомов Si и укрупнение кластерных фаз. При Т=700 К образуются отдельные кластерные фазы «чистого» Si диаметрами ~50 - 100 нм и толщиной 30 – 40 Å (рис. 6, с).



а) в) с)

Рис. 6. РЭМ - изображения поверхности SiO_2, облученной ионами Ar^+ с E_0=1 кэВ: а) D = 10^{15} см$^{-2}$, в) D = $6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, с) D = $6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, после прогрева при Т = 700 К

В четвертой главе **«Состав, электронная и кристаллическая струкура и физические свойства наноразмерных фаз и нанопленок, созданных на поверхности диэлектрических пленок ионами активных металлов»** изложены результаты экспериментов по созданию ионной имплантацией наноразмерных трехслойных фаз и пленок в поверхностной области SiO_2 и MgO и изучению их эмиссионных и оптических свойств.

В табл. 2 приведены зонно-энергетические и эмиссионные параметры SiO_2, имплантированные ионами Ba^+ с E_0 = 1 кэВ при D = $6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$.

Таблица 2.

Электронно-зонные и эмиссионные параметры аморфной пленки SiO_2 толщиной 1000 Å, легированной ионами Ba^+ с E_0 = 1 кэВ и D = $6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$

Параметр	SiO_2	$Ba^+ \rightarrow SiO_2$		
		Т=300 К	Т=800 К	Т=1000 К
E_v, Ф, эВ	5,6	5,4	5,8	6,0
E_F, eφ, эВ	5,1	3,2	3,6	4,5
E_g, эВ	4,2	4,5	5,0	4,8
χ, эВ	1,4	0,9	0,8	1,2
σ_m	2,8	4,9	5,4	4,7
К	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	–
λ, Å	300	400	–	300

Анализ результатов, полученных для сравнительно толстых пленок SiO_2 (d > 500 – 1000 Å), дает возможность сделать следующие выводы:

– глубина выхода ИВЭ аморфной пленки окиси кремния составляет 250 – 300 Å;

– ионная имплантация приводит к увеличению коэффициента ВЭЭ и зоны выхода ИВЭ в 1,5 – 2 раза, ширины запрещенной зоны окиси кремния на 0,3 – 0,4 эВ, к обогащению (~0,4 – 0,5 монослоев) поверхности атомами легирующего металла и некоторой кристаллизации приповерхностного слоя;

– прогрев ионно-легированной пленки SiO_2 до T = 900 – 1000 К приводит к некоторому (на 15 – 20 %) росту σ_m и λ, существенному увеличению (до 1,5 раза) ширины запрещенной зоны, что связано с преимущественным образованием окислов активного металла (натрия, магния, бария).

Нами установлено, что после отжига (прогрев + лазерная обработка) SiO_2 и MgO, легированных ионами Ba^+ и Na^+ низкой энергией (E_0 = 0,5 – 5 кэВ) и высокой дозой ($D \geq 10^{16}$ см$^{-2}$), формируются трехкомпонентные нанопленки.

В табл. 3 приведены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига, необходимые для образования трехкомпонентных диэлектрических нанопленок.

Таблица 3.

Оптимальные режимы создания трехкомпонентных диэлектрических нанопленок

Ионы	E_0, кэВ	D, см$^{-2}$	Матрица	Оптимальный отжиг		Тип соединения	Толщина пленки, нм
				T, К	W(Дж·см$^{-2}$) + T$^{/}$(К)		
Ba^+	1	$6\cdot10^{16}$	SiO_2	700 – 750	1,6; 750	$Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$	4 – 5
Na^+	1	$6\cdot10^{16}$	SiO_2	700	1,5; 750	$Na_{0,5}Si_{0,5}O_2$	5 – 6
Ba^+	1	$6\cdot10^{16}$	MgO	800	1,6; 800	Mg+Ba+O	5 – 6

На рис. 7 приведены зависимости C_{Ba}, C_{Si}, C_O от температуры для пленки $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2/SiO_2$. Время прогрева t = 30 мин. Видно, что до T = 800 К прогрев практически не приводит к изменению концентрации атомов Si, Ba, O. Дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому уменьшению концентрации кислорода и обогащению поверхности атомами Ba и Si. При T = 1000 К в поверхностном слое $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$ образуются силициды типа $BaSi_2$. Начиная с T = 1100 К происходит разложение $BaSi_2$. Аналогичные исследования проводились и для трехкомпонентных аморфных пленок $Ba_{0,5}Mg_{0,5}O$.

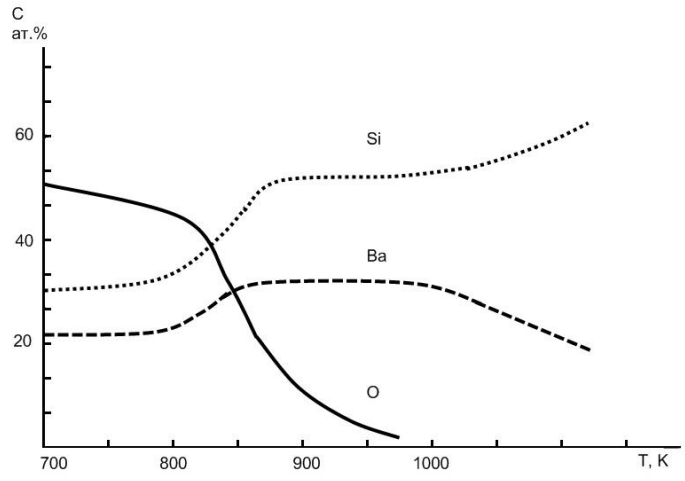


Рис. 7. Изменения концентраций Ba, Si и O на поверхности пленки $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$ при прогреве

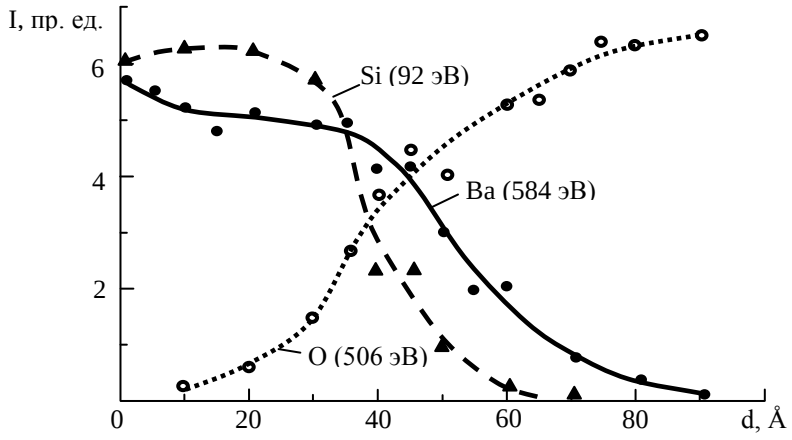


Рис. 8. Изменения интенсивностей оже-пиков Ba, Si и O по глубине SiO_2, имплантированных ионами Ba^+ с E_0 = 1 кэВ при D = $6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$, после отжига с $W_{опт}$ = 1,8 $Дж \cdot см^{-2}$ + $T_{опт}$ = 1000 К

На рис. 8 приведены изменения интенсивности оже-пиков Si (E=91-94 эВ), Ba (584 эВ) и O (506 эВ) по глубине SiO_2/Si (111), легированного ионами Ba^+ с E_0 = 1 кэВ при D = $6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ (интенсивность оже-пика Si в соединении с SiO_2 не учитывалась), полученных после лазерного отжига в сочетании с кратковременным высокотемпературным прогревом в оптимальном режиме ($W_{опт}$=1,8 $Дж \cdot см^{-2}$ + $T_{опт}$ = 1000 К). Толщина пленки SiO_2 d = 200 Å.

При этом поверхностная концентрация Ba составляла 50 – 55 ат.%, а Si - 40 - 45 ат.%, т.е. после такого отжига формируется эпитаксиальная пленка $BaSi_2$ с d = 50 – 60 Å. В целом формируется трехслойная эпитаксиальная наносистема $BaSi_2/SiO_2$/Si (111).

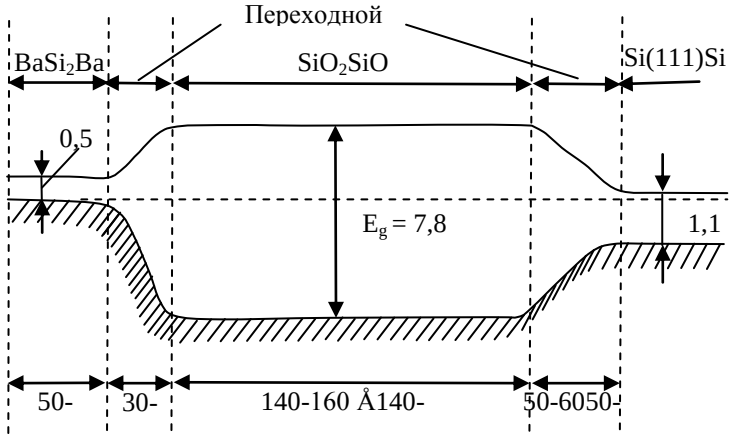


Рис. 9. Энергетическая диаграмма наносистемы $BaSi_2/SiO_2$/Si

На рис. 9 приведена примерная энергетическая диаграмма наносистемы. Видно, что между пленками $BaSi_2$ и SiO_2 образуется переходный слой с d = 30 – 40 Å. d между SiO_2/Si составляет 50 – 60 Å. Таким образом, в данном случае образуется система типа металл ($BaSi_2$) – диэлектрик (SiO_2) – полупроводник (Si).

Для исследования влияния температурного прогрева на σ легированных образцов последние нагревались в течение 15 минут при определенной температуре, а затем снимались зависимости $\sigma(E_p)$.

На рис. 10 представлены значения σ_m для пленок SiO_2, легированных ионами Ba^+, Na^+ и Cs^+ с E_0=1 кэВ. Видно, что наиболее термостойкими оказались образцы, легированные Ba^+, наименее – цезием. В последнем случае $\sigma_m(T)$ монотонно уменьшается с ростом температуры. Интересно было проследить как зависит данный эффект от энергии легирующих ионов.

Таким образом, образование комплексов дефектов при ионной бомбардировке диэлектриков, а также новых соединений играет существенную роль в изменении их вторично-эмиссионных свойств.

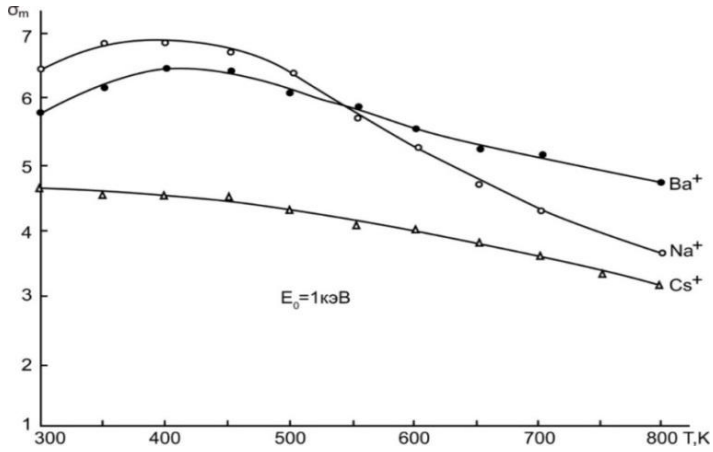


Рис. 10. Зависимости $\sigma_m(T)$ для окиси кремния, легированные ионами Ba^+, Na^+ и Cs^+ с E_0 = 1 кэВ

Нами изучено влияние внедренных атомов на коэффициенты распыления кремния и кремния с тонкой оксидной пленкой. Расчеты выполнялись с использованием статических моделей и алгоритмов, разработанных Т.С. Пугачевой, где использовалась динамическая монтекарловская модель CASNEW-D.

Записывая затем простое уравнение для средней концентрации внедрен-ной примеси в поверхностном слое:

— — — , (1)

где – максимальная глубина проникновения ионов, r – безразмерный коэффициент, значение которого лежит в пределах 0,5 – 1, n_p/n_a – отношение атомной плотности внедренной примеси к атомной плотности мишени, – коэффициент отражения, а *J* – плотность тока ионов, получаем

— — — (2)

где *D*=*J* – доза ионов.

Из (2) видно, что при больших дозах — ——.

Тогда предельное значение внедренной примеси можно оценить по формуле

——— (3)

В случае системы SiO_2/Si каскады атомных столкновений приводят к разрушению оксидной пленки за счет разрыва связей Si - O, распыления, перехода части атомов кислорода в подложку. При наличии оксидной пленки на поверхности кремния энергия, теряемая быстрым ионом в поверхностном слое, оказывается меньшей, чем в отсутствие пленки из-за менее эффективного энергообмена между атомами разной массы.

Исходя из машинных расчетов, можно оценить эффект разрушения оксидной пленки за счет образования каскадов атомных столкновений. Среднее число разрушенных молекул SiO_2 ( ) на один ион равно сумме

(4)

Здесь – парциальный коэффициент распыления кислорода, – количество атомов кислорода, перешедших из пленки в подложку, – число замещений кислорода атомами Si, I_0 – число выбитых атомов кислорода, образовавших дефекты внедрения в пленке SiO_2. Поскольку энергия этих атомов более чем на порядок может превосходить энергию теплового движения, они легко мигрируют к поверхности и могут десорбироваться.

В табл. 4 приведены значения отдельных слагаемых в выражении (6) и сумма их – для различных энергий ионов Si при двух значениях толщины пленки SiO_2: d = 10 Å и d = 20 Å. Из этой таблицы видно, что все слагаемые выражения (6) зависят от толщины оксидной пленки. Зависимость числа разрушенных молекул от энергии ионов для тонких оксидных пленок оказывается слабой в области $E_0 \geq 1$ кэВ. Образование теплового пика в каскадной зоне может привести к термическому разложению SiO_2 и десорбции кислорода.

Однако, как показывает выполненная нами оценка, вклад этого эффекта оказывается несущественным из-за большой энергии связи Si - O и малого времени существования теплового пика ($\tau \leq 10^{-12}$ с). При $E_0 > 1$ кэВ количество дефектов в поверхностном слое, тепловая энергия, выделяющаяся в нем, и степень разрушения оксидной пленки медленно растут с энергией.

Таблица 4.

Вклад различных составляющих в разрушение оксидной пленки при бомбардировке ионами Si с различной энергией

E, кэВ	**0,5**		**1**		**2**		**3**		**5**	
d, Å	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
	0,23	0,57	0,44	0,96	0,6	1,15	0,67	1,31	0,79	1,53
	0,35	0,72	0,60	1,07	0,75	1,21	0,93	1,28	0,92	1,38
	0,1	0,12	0,27	0,32	0,49	0,54	0,65	0,76	0,71	0,97
	0,32	1,05	0,49	1,5	0,55	1,61	0,75	2,1	0,73	2,49
	0,97	2,48	1,8	3,95	2,39	4,51	3,0	5,45	3,15	6,37

В то же время с ростом E_0 количество точечных дефектов в «объеме» мишени растет почти линейно. Поэтому для разрушения оксидной пленки оптимальной является энергия 1 кэВ с малой плотностью тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования и на основании полученных данных сделаны следующие выводы:

1. Впервые методом имплантации ионов O_2^+ в Si и Mg в сочетании с отжигом получены нанопленки (θ = 30 – 150 Å) SiO_2/Si и MgO/Mg. Показано, при этом начиная с толщины θ = 30 – 40 Å формируются сплошные пленки с высоким совершенством. Проведен сравнительный анализ состава, структуры, эмиссионных и оптических свойств пленок SiO_2 и MgO, полученных методами ионной имплантации и термического окисления. Установлено, что пленки SiO_2 (а также MgO), полученные методом термического окисления до θ = 200 Å, имеют островковый характер, а на поверхности сплошных пленок SiO_2 (θ = 200 – 1000 Å) содержится некоторое количество молекул нестехиометрического окисла кремния, следовательно, параметры энергетических зон и плотность состояния валентных электронов этих окислов отличаются от таковых для совершенных окислов SiO_2. Травление поверхности этих пленок ионами Ar^+~50 – 60 Å и последующий высокотемпературный прогрев мишени приводят к формированию пленок SiO_2 с высоким совершенством.

2. Впервые детально изучены зона-энергетические параметры, зона выхода ИВЭ λ, эмиссионные и оптические свойства систем SiO_2/Si и MgO/Mg с разной толщиной. В частности показано, что значение E_g для совершенных поликристаллических пленок SiO_2 составляет ~8,2 эВ, для MgO – 7,2 эВ, а значение λ для аморфных пленок SiO_2 и MgO соответственно составляет ~250 Å и 400 Å.

3. По данным РЭМ и АСМ установлено формирование нанокластерных фаз и пленок Si толщиной ~ 25 – 30 Å на поверхности SiO_2 при бомбардировке ионами Ar^+, а в случае MgO – формировались наноструктуры Mg. Выявлена феноменологическая модель образования кластеров кремния при распылении SiO_2 ионами Ar^+. Это объясняется тем, что в результате бомбардировки ионами Ar^+ в поверхностной области SiO_2 происходит разрыв связей Si и O и кислород уходит из этих слоев в вакуум. В результате при больших дозах ($D > 5\cdot10^{16}$ см$^{-2}$) на поверхности SiO_2 образуется тонкий слой Si. Чтобы оценить толщину пленки Si, снимались профили распределения атомов Si по глубине для пленки SiO_2, облученной ионами Ar^+ с E_0 = 1 кэВ при $D = 6\cdot10^{16}$ см$^{-2}$.

4. Впервые методом имплантации ионов Ba^+ и Na^+ и последующим отжигом (лазерный + температурный) в тонкие пленки SiO_2 и MgO получены нанопленки $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$, $Na_{0,5}Si_{0,5}O_2$ и MgBaO толщиной 40 – 60 Å. Изучены состав, морфология поверхности и физические свойства поверхности при различных режимах ионной имплантации и последующего отжига. В частности, показано, что после ионной имплантации значение σ_m и К увеличивается более чем в 2 – 3 раза. Эти изменения объясняются уменьшением работы выхода, увеличением зоны выхода истинно-вторичных и фотоэлектронов, формированием слоев сравнительно большой эмиссионной эффективности.

5. Впервые показано, что при лазерном отжиге с плотностью энергии W=1,8 Дж·см$^{-2}$ и прогреве при T > 1000 К происходит разложение $Ba_{0,4}Si_{0,6}O_2$ и преимущественное испарение атомов кислорода и в ионно-легированном слое образуется силицид типа $BaSi_2$. Построена зонно-энергетическая диаграмма систем $BaSiO/SiO_2/Si$ и $BaSi_2/SiO_2/Si$. Показано, что состав, структура, эмиссионные и оптические свойства полученной многослойной системы практически не меняются 100 и более часов при прогреве до T = 700 К, при электронной бомбардировке до плотности тока j_e = 30 мкА/см^2 и при лазерном отжиге до плотности энергии W = 1 - 1,2 Дж·см$^{-2}$.

6. Проведены теоретические расчеты по влиянию внедренных атомов на коэффициенты распыления Si и Si с тонкой окисной пленкой. Показано, что при наличии на поверхности Si оксидной пленки каскады атомных столкновений приводят к разрушению оксидной пленки за счет разрыва связей Si-O, распыления и перехода части атомов кислорода в подложку. Установлено, что для разрушения оксидной пленки оптимальной является энергия ионов кремния с E_0 = 1 кэВ.

SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

YUSUPJONOVA MAKHSUNA BAKHODIROVNA

ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES OF THE SURFACE OF DIELECTRIC FILMS MODIFIED BY ION IMPLANTATION

01.04.04 – Physical electronics

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

TASHKENT – 2019

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B 2017.2.PhD / FM99.

Dissertation has been prepared at the Institute of Ion-plasma and laser technologies, Uzbekistan Academy of Sciences.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the scientific council website (www.iplt.uz) and on the website of «Ziyonet» Information and educational portal www.ziyonet.uz.

Research supervisors:	**Tashmukhamedova Dilnoza Artikbaevna** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	**Isakhanov Zinaobidin Abilpeyzovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher
	Rakhmonov Ganibay Tadzhievich Candidate of Physical and Mathematical Sciences, dotsent
Leading organization:	**Ferghana polytechnic institute**

Defense will take place on «___» september 2019 at _____ at the meeting of scientific council number DSc.30.05.2018. FM/T.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physical-technical institute (is registered № ____) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-31-69).

Abstract of dissertation sent out on «___» _____ 2019.

(Mailing report № _____on «___» _____ 2019).

Kh.B.Ashurov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical science, professor

D.T.Usmanov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, doctor physical and mathematical science, senior researcher

B.E.Umirzakov
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees doctor of physical and mathematical science, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the dissertation is to establish the laws of change in the electron-band structure, the emission and optical properties of SiO_2 and MgO thin films as a result of ion bombardment and subsequent annealing.

The objects of study were thin films of SiO_2/Si and MgO/Mg, obtained by the methods of thermal oxidation and ion implantation (E_0 = 0,5 – 5 кэВ).

The scientific novelty of the research consists in the following:

1. The key reasons for the differences in the parameters of the energy bands, the density of states of the valence electrons, and the emission and optical properties of SiO_2 films obtained by various methods were identified. The energy depth of true-secondary electrons and photoelectrons of the SiO_2/Si and MgO /Mg systems was determined.

2. For the first time, band-energy parameters were determined at different depths of the transition layer formed at the interface of SiO_2/ Si and MgO/Mg systems.

3. The main mechanisms for the formation of Si and Mg nanostructures on the surface of SiO_2 and MgO films as a result of the bombardment with Ar^+ ions and subsequent annealing were revealed. The optimal conditions for obtaining a Si/SiO_2/Si, Mg/MgO / Mg nanofilm system were determined.

5. For the first time, three-component $Me_xSi_{1-x}O_2/SiO_2$/Si, $Mg_{0,5}Ba_{0,5}O$/MgO/Mg nanofilm systems were obtained, and their electronic structure, emission and optical properties were studied.

6. The effect of temperature heating on the emission and optical properties of ion-doped SiO_2 and MgO films was studied. The optimal heating modes were determined at which the physical properties of ion-doped systems do not change for more than 100 hours.

The implementation of research results. Based on the results of studying the laws and physical mechanisms of the formation of nanocrystals and nanofilms on the surface and in the surface layers of dielectric films implanted with low-energy ions:

patent for invention of intellectual property agency of the Republic of Uzbekistan «Method of obtaining cobalt silicide nanocrystals» (No. IAP 05809 04.04.2019) for the study of physical mechanisms and patterns of formation of nanofilms and nanocrystals in surface and near-surface areas of dielectric films. The developed method makes it possible to study and effectively obtain cobalt silicide nanocrystals;

The results obtained on the formation of nanoscale phases and nanofilms on the surface of dielectric films and on the study of their emission and optical properties were used in the research projects Ф2-ФА-Ф161 «Mechanisms of formation of thin films (Al, Cu, Ag, and Me-Si) and nanoscale heterostructures, created on the surface of crystals (W, WO_n, TiN, CdTe, SiO_2) by ion implantation and the study of their physico-chemical properties» and Ф-2-31 «Study of the structure and physical properties of nanoscale films of metal silicide and the development of thermo-sensitive structures» (Reference Letter No. 89-03-2398 Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan dated June 7, 2019);

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references. The volume of the thesis includes 130 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (част I; part I)

1. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б. Способ получения нанокристаллов силицида кобальта. Патент на изобретение Республики Узбекистан № IAP 05809. 04.04.2019.

2. Юсупжанова М.Б., Ташмухамедова Д.А. Влияние электронной бомбардировки на вторично-эмиссионные свойства легированных диэлектриков // ТДТУ хабарлари. Тошкент 2015 № 2, С. 57-60. (05.00.00., №15)

3. Tashmukhamedova D.A., Yusupjanova M. B. Emission and Optical Properties of SiO_2/Si Thin Films // ISSN 1027-4510, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2016, Vol. 10, No. 6. pp. 1338 – 1340. (01.00.00, № 39; № 4 Journal Citation Reports, IF=0.36)

4. Yusupjanova M.B., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Composition, morphology and electronic structure of the nanophases created on the SiO_2 surface by Ar^+ ion bombardment // Technical Physics, 2016, Vol. 61, No. 4. p.627 – 629. (01.00.00., №20; №4 Journal Citation Reports, IF=0.702)

5. Юсупжонова М.Б., Ташмухамедова Д.А. Электронная и кристаллическая структура наноразмерных фаз металлов, сформированных на поверхности пленок MgO» // Узбекистон физика журнали, Т 19, № 6. 2017 г. С. 308-362. (01.00.00., №6)

6. Tashmukhamedova D.A., Yusupjanova M. B., Tashatov A. K., Umirzakov B. E. Study of the Influence of Implanted Atoms on the Coefficients of the Sputtering of Silicon and Silicon with a Thin Oxide Film // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018, Vol. 12, No. 5. pp. 902 – 905. (01.00.00, № 39; № 4 Journal Citation Reports, IF=0.36)

II бўлим (част II; part II)

7. Юсупжанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Рахманова Г.Х. Зонно-энергетические параметры нанопленок SiO // III - Республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияси Қарши. 23 май 2015 й, С. 99.

8. Юсупжанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Нормурадов М.Т., Умирзаков Б.Е. Изучение процессов образования наноразмерных структур в пленках SiO_2 при ионной бомбардировке // XXII Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью», том. 2, 20 – 24 августа 2015 г., Москва, Россия. С. 240 – 242.

9. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б. Эмиссионные и оптические свойст-ва тонких пленок SiO_2/Si // Тезисы докладов XLV международной Тулиновской конференции Москва - 2015. С. 149.

10. Юсупжанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К. Создание многокомпонентных наноструктур в приповерхностной области SiO_2 и MgO низкоэнергетической имплантацией ионов активных металлов // Материалы

республиканской конференции «Современные проблемы физики полупроводников». 26 – 27 октября 2015 г., Нукус, Узбекистан. С. 63 – 65.

11. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б. Электронные свойства пленок SiO_2/Si, созданных методами ионной имплантации и термического окисления // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 5 – 6 ноября 2015 г., Ташкент, Узбекистан. С. 149 – 151.

12. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б. Влияния образования нанокластерных фаз на оптические свойства оксидных пленок // Материалы республиканской научно-практической конференции «Микроэлектроника, физика и технология наночастиц», 4 - 5 декабря 2015 г., Андижан, Узбекистан. С.147–150.

13. Yusupjanova M.B., Djurabekova F.G., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. Electronic and crystal structure of nanosized metal phases are formed on the surface films MgO // E-MRS, Spring Meeting, Lille, France. May 2 – 6, 2016. p. BB.6.9

14. Юсупджанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Саидахмедова З., Гулямова С.Т. Электронная структура нанопленочной структуры Si – SiO_2 – Si, Si – $CoSi_2$ – Si // Тезисы докладов XLVI международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 31 мая – 2 июня 2016 г. С. 165.

15. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Yusupjanova M.B., Boltaev X.X. Evaluation of critical dimensions manifes tations of quantum size effects of semi-conductor nanocrystalline phases // September 18 – 20, 2016. SIMS Europe 2016. p. ID 88.

16. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Ташатов А.К.,Умирзаков Б.Е. Особенности распыления Si и Si с окисной пленкой // Республиканская конференция «Возобновляемые источники энергии: технологии и установки». 28-29 июня 2016., с. 216 – 217.

17. Yusupjanova M.B., Tashmukhamedova D.A., Urokov A.N., Sodikjonov J.Sh. Composition, morphology, and electronic structure of the nanophases created on the SiO_2 surface by Ar^+ ion bombardment // EMRS 2017 Spring Meeting, Symposium T: Synthesis, processing and characterization of nanoscale multifunctional oxide films VI. Strasbourg, France. May 22^{th}-26^{th}, 2017. p. T PI.4.

18. Юсупжанова М.Б., Содикжанов Ж.Ш., Ташмухамедова Д.А. Влияния Внедренных атомов на коэффициенты распыления Si и SiO_2/Si // Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», Секция II: Физика полупроводников и твердого тела, их прикладные аспекты, Ташкент. 13 – 14 июня. 2017 г. С. 283 – 285.

19. Tashmuhamedova D.A., Yusupjanova M.B., Sodiqjanov J.Sh. The morphology of the surface of films $NiSi_2$/Si obtained by solidphase epitaxy // 21^{st} International conference on secondary ion mass spectrometry. Krakow. Poland.10-15 September 2017. P. 351.

20. Юсупжанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Уроков А.Н., Сафарова Д.Ш. Модификация эмиссионных свойств поверхности легированных диэлектриков

электронной бомбардировкой // «Физиканинг долзарб муаммолари» республика илмий-амалий конференцияси тўплами, Тошкент. 14 октябрь 2017. С.134-135.

21. Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E., Yusupjonova M.B., Raxmatov M. The influence of the Ar ions bombardment on the composition, structure and property of the SiO_2/Si films // E-MRS, Spring Meeting, Lille, France. 2018. K PI.46.

22. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Юсупжонова М.Б., Бахтиёров О. Статическая диэлектрическая проницаемость тонких пленок окиси кремния // IV Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2018, 30 января – 1 февраля 2018 года, Москва, С. 151 – 152.

23. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Аллаерова Г., Нурматов А.Т. Изменение состава поверхности SiO_2 при бомбардировке ионами Ar^+ // Сборник тезисов докладов седьмая Международная конференция по Физической Электронике. IPEC-7, 18-19 мая, 2018, Ташкент, С. 59

24. Юсупжонова М.Б., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Нормурадов М.Т., Худойкулов Ф. Методика определения характеристик зон на основе анализа спектров фото- и упругоотраженных электронов // IV Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах», Фергана - 2018. 25-26 мая 2018 года. С. 193 – 195.

25. Ташмухамедова Д.А., Юсупжонова М.Б., Ёркулов Р.М., Мустафоева Н.М., Содикжонов Ж.Ш., Кушиев Г.А. Электронные свойства поверхности SiO_2/Si имплантированных ионами Ar^+ // IV Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах», 25-26 мая 2018 года, Фергана. С. 201 – 203.

26. Раббимов Э., Аллаёрова Г.Х., Юсупжонова М.Б., Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Пороговые особенности коэффициента упругоотраженных электронов MgO имплантированных ионами Ba // XLVIII Международная Тулиновская Конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами, 29 –31 мая 2018. Москва. С. 144.

27. Юсупжонова М.Б., Нурматов А.Т., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. Получение и изучение электронных свойств тонких пленок SiO_2/Si // XLVIII Международная Тулиновская Конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами, 29 – 31 мая 2018. Москва. С.146.

Автореферат «Til va adabiyot ta’limi» журнали таҳририятида
таҳрирдан ўтказилди (22. 07.2019 йил).

Босишга рухсат этилди: _____2019 йил.
Бичими 60x84 $^{1}/_{16}$, «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,9. Адади: 100. Буюртма: № _____.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.