

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

ИСАХАНОВ ЗИНАОБИДИН АБИЛПЕЙЗОВИЧ

**ИОНЛАР ВА ЭЛЕКТРОНЛАРНИНГ ЮПҚА КРИСТАЛЛАРДАН
СОЧИЛИШИ ВА ЎТИШИ ЖАРАЁНЛАРИДАГИ ОРИЕНТАЦИОН
ЭФФЕКТЛАР**

01.04.04 – Физик электроника

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

ТОШКЕНТ – 2017

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации
Content of the of doctoral (DSc) dissertation Abstract

Исаханов Зинаобидин Абилпейзович

Ионлар ва электронларнинг юпка кристаллардан сочилиши ва ўтиши
жараёнларидаги ориентацион эффектлар 3

Исаханов Зинаобидин Абилпейзович

Ориентационные эффекты в процессах рассеяния и прохождения ионов и
электронов через тонкие кристаллы 27

Isakhanov Zinaobidin Abilpeyzovich

Orientation effects in processes of scattering and transmission of ions and
electrons through thin crystals 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 57

УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ
ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

ИСАХАНОВ ЗИНАОБИДИН АБИЛПЕЙЗОВИЧ

**ИОНЛАР ВА ЭЛЕКТРОНЛАРНИНГ ЮПҚА КРИСТАЛЛАРДАН
СОЧИЛИШИ ВА ЎТИШИ ЖАРАЁНЛАРИДАГИ ОРИЕНТАЦИОН
ЭФФЕКТЛАР**

01.04.04 – Физик электроника

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

ТОШКЕНТ – 2017

3

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.1. DSc/FM48 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида

бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб саҳифасига (<http://fti-kengash.uz/>) ва «Ziynet» ахборот таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: Умирзаков Балтоходжа Ерматович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: Тураев Назар Юлдашевич

физика-математика фанлари доктори, академик

Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич

физика-математика фанлари доктори, профессор

Кутлиев Учкун Отобоевич

физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: Ўзбекистон Миллий университети

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

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2017 йил «___» _____ куни

тарқатилди. (2017 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

С.Л. Лутпуллаев,

Илмий даражалар берувчи

Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов,

Илмий даражалар берувчи

Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., профессор

С.А. Бахромов,

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш

кошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Кириш (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Жаҳонда бугунги кунда динамикали ривожланаётган физик электроника соҳасида

муҳим физик муаммолардан бири, зарядли зарраларнинг қаттиқ жисм юзаси ҳамда уларнинг нанопленкалари билан ўзаро таъсирлашувида кузатиладиган жараёнлар механизмларини аниқлаш имкониятларини ва микроэлектроника, наноэлектроника асбоблари учун маълум физик хоссаларга эга бўлган материалларни ишлаб чиқишдан иборат. Шу нуқтаи назардан юпқа поли- ва монокристалл пленкаларда электрон жараёнларни тадқиқ этиш муҳим вазифалардан бири бўлиб келмоқда.

Мустақиллик йилларида мамлакатимизда физик электроника соҳасини самарали ривожлантириш борасида физик кимёвий ҳодисалар ва жараёнларни қамраб олган электрон асбобларнинг ҳар қил турларини яратишда фундаментал аҳамиятга эга бўлган тадқиқотларга алоҳида эътибор қаратилди. Бу борада соҳанинг амалиётда ишлатиладиган маълум электрофизик хоссаларга эга бўлган сифатли янги материаллар базасини мустаҳкамлаш ҳамда замонавий талаблар асосида кристалларга қўшимча элементлар киритиш йўли билан сифатини ошириш, уларнинг олиш технологияларини мукаммаллаштириш борасида сезиларли натижаларга эришилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси асосида нанофизика соҳасидаги фундаментал изланишлар натижасида янги технологияларни жорий этиш орқали микроэлектроника соҳасини янада ривожлантириш муҳим аҳамиятга эга.

Ҳозирги кунда жаҳонда қаттиқ жисмли нанопленкалар олиш технологиясини мукаммаллаштириш ҳамда ундаги нуқсонларни камайтириш, нанопленкаларни сифат кўрсаткичини яхшилаш муҳим аҳамият касб этмоқда. Бу борада мақсадли илмий–тадқиқотларни, жумладан қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади: юпқа пленкалар олиш қурилмаларини такомиллаштириш, кимёвий боғланишлар бўйича олинган амалий натижаларни назарий моделлаштириш, молибден ва вольфрам намуналарига термик ишлов беришда ҳосил бўлувчи кислород ва углерод аралашма атомлари бор ҳолда кристалл панжара моделини яратиш, мис ва кумуш юпқа эркин пленкаларидан қайтган ва улар орқали ўтган электронларнинг энергия йўқотиш спектрлари дисперсиясини амалий тадбиқ қилиш муҳим аҳамиятга эга. Юқорида келтирилган илмий тадқиқотлар йўналишида бажарилаётган илмий изланишлар мазкур диссертация мавзусининг долзарблигини изоҳлайди.

Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ–1442-сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси sanoатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарорида белгиланган вазифаларни ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари

тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши нинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан

ва технологиялари ривожланишининг II– «Энергетика, энергия ва ресурстежамкор» ва III– «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш ва ривожлантириш» устувор йўналишлари доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи¹. Зарядли зарраларнинг кристалл сиртидан сочилиши ва уларнинг юпқа пленкалари орқали ўтиш жараёнларини ўрганиш юзасидан илмий ва амалий изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан Стэнфорд/НАСА, Эймс Сирт ва микроструктуравий тадқиқотлар бирлашган институти (АҚШ), Москва давлат университети ядро физикаси илмий текшириш институти, Санкт-Петербург давлат техника университети (Россия), Черновицк миллий университети (Украина), Токио пойтахт университети (Япония), Ядровий тадқиқотлар институти (Германия), Цюрих политехника университети (Швейцария), Тошкент давлат техника университети (Ўзбекистон Республикаси) томонидан олиб борилмоқда.

Электрон ва ионларнинг қаттиқ жисм сирти ҳамда уларнинг нанопленкалари билан ўзаро таъсирлашувида кузатиладиган жараёнлар механизмларини аниқлашнинг замонавий усуллари ва воситаларини ишлаб чиқиш ҳамда такомиллаштиришга оид, жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан қуйидаги илмий натижалар олинган: сиртда элементлар таркибини аниқлаш спектроскопиясининг янги усуллари ишлаб чиқилган (Санкт-Петербург давлат техника университети, Россия); жисмнинг кристалл ва электрон структуралари, таркибини аниқлашда электронларнинг характерли энергия йўқотиш спектроскопияси сезгирлиги такомиллаштирилган (Цюрих политехника университети, Швейцария; Тошкент давлат техника университети, Ўзбекистон); иккиламчи ион масс спектроскопияси усулининг элементларни, изотопларни ажратиш самарадорлигини ошириш технологияси ишлаб чиқилган (Ядровий тадқиқотлар институти, Германия; Токио пойтахт университети, Япония).

Бугунги кунда зарядли зарраларнинг ҳар хил кристалллардан қайтиши ва улар орқали ўтишида кристалл ориентациясига боғлиқ ҳолда ўзаро таъсир механизмларини тадқиқ қилиш бўйича қатор, жумладан қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: кристалларда элементларнинг таркибий, кимёвий ҳолатлари ўзгариши, киритилган аралашма атомларининг

¹ Диссертациянинг мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи J. Physical Review B; J. Applied Physics Letters; J. Japanese Journal of Applied Physics; Ж. технической физики; Ж. Поверхность; Ж. Успехи физических наук; Ж. экспериментальной и теоретической физики; Ж. Физика и техника полупроводников; Ж. Физика твердого тела; Ж. Приборы и техника эксперимента; Научно-техн. сборник Электронная техника. Серия 1, СВЧ-Техника; Письма в Ж. технической физики; Ж. нано и электронной физики; ва бошқа манбалар асосида бажарилган.

жойлашиши ҳамда асосий атомлар билан кимёвий боғланишини аниқлаш; металлларнинг нанопленкалари орқали ўтган зарядли зарраларнинг энергиявий ва фазовий тақсимланиши; аморфизацияланган юзанинг зарядли зарралар энергиявий тақсимланишига таъсирини ўрганиш усуллари ҳамда воситаларини замонавий техник ечимлар асосида такомиллаштириш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Массив ва наноўлчамли

материалларнинг таркиби, структураси ва физик хоссаларини ўрганиш, кристаллар сиртидан қайтган ва унинг юпқа эркин пленкалари орқали ўтган ион ва электронларнинг бурчак, энергиявий ва фазовий тақсимланишини тадқиқ қилиш шу соҳа олимлари орасида катта қизиқиш уйғотиб келган. Санкт-Петербург политехника институтининг профессори В.В.Кораблев томонидан ионлар ва электронлар билан қаттиқ жисмларни бомбардимон қилиш натижасида эмиссияланган оже-электронлар спектрларини тадқиқ қилиш йўли билан материалларнинг сиртки қатламлари таркиби микдорий жиҳатдан аниқланган. 1970 йилларда С.Эргинсой ва Х.Е.Вегнерлар яримўтказгичларнинг юпқа поли- ва монокристалл пленкалари орқали ўтган протон ва енгил ионларнинг (H_1^+ , H_2^+ , He^+ , D^+ , Li^+) бурчак, фазовий ва энергиявий тақсимотини юқори энергиялар соҳасида (юзлаб кэВ ва МэВ) ўрганиб, кристалл ориентациясига боғлиқ ҳолда энергия йўқотиш хоссаларини топган. А.Ф.Тулинов томонидан ионларнинг каналланишида блокировка (ёки соялар) эффекти аниқлаган. Х.Ретер ва бошқа муаллифлар томонидан электронларнинг характеристик энергия йўқотиш спектрлари аниқланган.

Ўзбекистонда Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, “Адсорбцион ва эмиссион ҳодисалар” лабораториясида ионларнинг кристалл орқали ўтганда вужудга келадиган ориентацион ҳодисаларни, каналланишда оғир ионларнинг кириш чуқурлигини, моддага киритилган ионларнинг тарқалиш соҳаси, профил бўйича тақсимооти, кристаллардаги нуқсонлар, киритилган атомларнинг кристалл панжарада жойлашиши, монокристалл нанопленкалар сиртидан қайтган ва улар орқали ўтган электронларнинг характеристик энергия йўқотиш спектрларини комплекс ўрганиш бўйича илмий изланишлар олиб борилмоқда. Олинган натижалар асосида давлат фундаментал лойиҳалари бажарилмоқда.

Замонавий ўта юқори аниқликка эга бўлган ўлчаш асбобларнинг ва физик методларнинг мавжудлиги юқорида кўрсатилган илмий изланишлар самарадорлигини оширишда катта имкониятлар яратмоқда. Лекин бугунги кунгача бу соҳада яна бир қатор фундаментал муаммолар ўз ечимини топмаган. Масалан, қаттиқ жисмлар ион ва электронлар билан бомбардимон қилинганда эмиссияланган оже-электронларни таққослаб ўрганиш, ионлар тушиш бурчаги ва кристалл ориентациясининг шу кристалл орқали ўтган ионларнинг интеграл ва дифференциал характеристикаларига таъсирини ўрганиш, бир хил шароитдаги экспериментларда юпқа эркин монокристалл пленкалар сиртидан қайтган ва улар орқали ўтган электронларнинг характеристик энергия йўқотиш спектрларининг ориентацияга ва дисперсияга боғлиқлиги етарли даражада тадқиқ қилинмаган. Бугунги кунга

7

қадар сиртда аралашма атомларининг жойлашиши, матрица ва аралашма атомлари орасидаги кимёвий боғлиқлик, яна ионлар билан бомбардимон қилинганда сиртки қатламлар тартибсиз ҳолатга келишининг (аморфизация) металллар юпқа эркин пленкалари орқали ўтган электронларнинг энергиявий тақсимотига таъсири ўрганилмаган ва бу борадаги илмий-тадқиқот ишларини амалга ошириш долзарб илмий-амалий аҳамиятга эга.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот

муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ион-плазма ва лазер технологиялари институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг Ф-2-1-64 “Қаттиқ жисмларни ионлар билан бомбардимон қилганда оже-спектрларнинг шаклланиш механизмларини тадқиқ қилиш ва аниқлаш” (2003–2007), Ф-2-1-74 “Кристалларда валент электронларнинг плазмон тебранишини юзага келтириш учун электронлар энергия йўқотишининг дисперсияга боғлиқлиги” (2003–2007), ФА-Ф2-Ф102 “Ион ва электронларнинг ҳар хил модификацияга эга бўлган қаттиқ жисмдан ўтганда энергия йўқотишининг ориентацияга боғлиқлиги” (2007–2011) ва Ф2-ФА-Ф161 “Эркин юпқа пленкалар (Al, Cu, Ag, Cu-Si) ва массив кристаллар (W, WO_n, TiN, CdTe, SiO₂) юзасида ион имплантацияси усули билан ҳосил қилинган наноўлчамли гетероструктураларнинг шаклланиш механизмлари ва уларнинг физик-кимёвий хоссаларини ўрганиш” (2012–2016) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади зарядли зарраларнинг ҳар хил табиатга эга бўлган кристаллар билан ўзаро таъсирлашганда содир бўладиган жараёнлардаги ориентацион эффектларни аниқлаш, аралашма атомларининг жойлашиши ва сирт диагностикаси усулларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

экспериментал қурилмаларни замон талабларига кўра ўта юқори вакуумли кичик бурчакли электрон ва ион универсал спектрометри, иккиламчи ионлар масс-спектрометри, металллар ва яримўтказгичларнинг юпқа эркин пленкалари олинадиган қурилмаларни такомиллаштириш;

Mo(100), W(100), Al(100), Si(100) монокристаллари ва миснинг саноат намуналари юзаларини юқори температурада қиздириш, ионлар билан ишлов бериб тозалаганда уларнинг элементлар таркиби ҳамда юзаларининг кимёвий ҳолати ўзгаришини ўрганиш, юзадаги асосий ва аралашма атомлар орасидаги кимёвий боғланишлар бўйича олинган амалий натижаларни назарий ҳисобланган маълумотлар билан тасдиқлаш;

оже-спектрларнинг бурчакка боғлиқлигини таҳлил қилиш асносида Мо ва W монокристалларда аралашма атомлари юза қатламларида жойлашиши, ҳосил бўлган бирикмаларнинг турлари ва кристалл панжара турини аниқлаш, Mo(100) ва W(100) намуналарига юқори температураларда ишлов бериб, юзада кислород ва углерод аралашма атомлари бор ҳолда кристалл панжара моделини ишлаб чиқиш;

поли- ва монокристалл юпқа намуналари орқали ўтган ионларнинг тақсимотини тушиш бурчаги ва энергиянинг ўзгаришига боғлиқ ҳолда аниқлаш;

8

Cu ва Ag юпқа эркин пленкаларидан ўтган ион ва электронларнинг энергиявий ва фазовий тақсимланишига тартибсизланган юза, тушаётган даста энергияси, бурчаги ҳамда намунани азимутал бурчак бўйича бургандаги таъсирини тадқиқ қилиш;

ҳар хил кристаллографик йўналишга эга бўлган Mo, Nb, Si, Ge юзаларидан, Cu, Ag юпқа эркин пленкалардан қайтган ва улар орқали ўтган электронларнинг характеристик энергия йўқотиш спектрлари дисперсиясини амалий тадқиқ қилиш ҳамда бу кристалларда плазмон тебранишлар

дисперсиясини назарий йўл билан ҳисоблаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида W, Mo, Nb, Cu, Ag, Al каби металлларнинг поли- ва монокристаллари, Si, Ge каби ярим ўтказгичлар, SiO₂ диэлектрик, Ni/CdS, Ni/Si, Al/Si, SiO₂/Si каби юпқа пленкали тизимлар, Cu ва Ag эркин юпқа поли- ва монокристалл пленкалари олинган.

Тадқиқотнинг предмети нанопардаларга зарядли зарралар таъсир этгандаги физик жараёнлар ва кристалл панжараларининг аморфизацияланиш механизмлари ҳамда зарядли зарраларнинг кристаллар билан ўзаро таъсирида содир бўладиган ориентацион эффектлардан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида металлларнинг юпқа эркин пленкалари орқали ўтган ва улардан қайтган ионларнинг энергия йўқотиш спектроскопияси, оже-электрон спектроскопия (ОЭС), электронларнинг характеристик энергия йўқотиш спектроскопияси (ЭХЭЙС), иккиламчи ионлар масс-спектроскопияси (ИИМС) каби тадқиқот усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк бор Mo, W, Si, Cu и Al монокристалларини яхшилаб тозаланганда уларнинг ион оже-спектрларида L_{2,3}VV оже чизиғининг ёнида қўшимча, уларнинг қисман оксидли чўққилари пайдо бўлиши аниқланган;

Mo(100), W(100) юза ости қатламларида кристалл панжарада кислород, углерод атомларининг тугунлар орасида октаэдриқ ҳолатда жойлашиши аниқланган. W, Al, Si монокристалларини бир хил шароитда ионлар, электронлар билан бомбардимон қилиш натижасида асосий чўққи интенсивлиги камайиши, чўққи ярмида энининг кенгайиши ва энергиявий ҳолатининг ўзгариши, таркибда квазимолекулалар ҳосил бўлиши билан боғлиқ эканлиги аниқланган;

E₀=5–40 кэВ ионлар дастаси энергияси текшириляётган соҳасида Cu ва Ag монокристалларининг эркин нанопленкалари орқали ўқли, текислик бўйича каналланиш ва тартибсиз ўтишни кечирган ионларнинг бир пайтдаги улуши билан шартланган энергетик тақсимланишнинг юпқа структураси топилган;

ионлар монокристалл нанопленкалар орқали каналланганда энергия йўқотиши кутб ва азимутал бурчакларга боғлиқлиги ҳамда бу йўқотишлар поликристалга нисбатан тўрт марта кам эканлиги, ион имплантацияси туфайли кристаллнинг нозик структурали энергиявий спектрида кристалл панжаранинг аморфизацияланиши ҳамда аввал ўқ, кейинчалик текислик бўйича каналланган ионлар чўққиси текисланиши аниқланган;

илк бор кристалл ориентациясига боғлиқ ҳолда ҳажмий плазмон тебранишларида энергия йўқотишнинг анизотропияси, электронларнинг характеристик энергия йўқотиш спектри функциясини ҳисоблашда диэлектрик сингдирувчанликнинг оддий осцилляторли модели, характеристик энергия йўқотиш спектрларини ҳисоблаш алгоритми, нанопленкалардан ўтган электронларга нисбатан қайтган электронлар ҳажмий плазмон тебранишига катта энергия сарфлаши аниқланган;

Mo, W Nb, Si Ge монокристаллари юзасидан қайтган электронларнинг

спектрларидан энергия йўқотишнинг шаклланиш механизмлари, кристаллнинг ҳар хил йўналишлари бўйича электронлар ҳолати зичлигини баҳолаш усули, материаллар кристалл ҳолатдан аморф ҳолатга ўтганда электрон-фонон ўзаро таъсири эҳтимоллиги ошиши, электронлар ҳолатлари зичлиги деформацияси туфайли электронларнинг катта энергия йўқотиши аниқланган;

илк бор ионлар билан бомбардимон қилинган металлларнинг нанополенкалари юза қатламларининг аморфизацияси даражасини баҳолаш усули ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат: зарядли зарраларнинг кристалл сиртидан сочилиши ва уларнинг юпқа қатламларидан ўтиши жараёнларидаги ориентацион эффектлар аралашмалар жойини, чуқурлик бўйича тақсимот профилини ва қаттиқ жисм кристалл панжарасида нуқсонларнинг пайдо бўлишини аниқлашда ишлатилди;

майдадисперсли мис сеткаси устида олинган эркин мис пленкаларини қўллаш натижасида, вакуум асбоб-ускуналарини эксплуатация қилишда электрон бошқариш учун имкон берадиган ишончли коммутация ишлаб чиқаришда қўлланиладиган контакт электродлари ишлаб чиқилди;

ион имплантацияси технологиясини ишлаб чиқиш бўйича олинган натижалар металл–диэлектрик–яримўтказгич ва яримўтказгич–диэлектрик–яримўтказгич юпқа пленкали структураларни ишлаб чиқаришда ҳамда электрон приборларни ишлаб чиқариш саноатида муҳим амалий аҳамият касб этади.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий таҳлилий спектроскопик усуллар ва физикавий электроника ёндашувлари қўлланилганлиги билан асосланган. Тадқиқот шартлари таҳлилида замонавий юқори аниқликка эга ўлчов асбоблари қўлланилган ва эксперимент натижалари статистик усулда пухта анализ қилинган. Натижа ва хулосалар замонавий назарий ва экспериментал маълумотларга, зарядли зарраларнинг кристалл билан ўзаро таъсирлашуви механизмларининг физикавий тасаввурларга асосланган экспериментал маълумотларнинг ишончлилиги синовдан ўтган комплекс ўлчаш услубларидан ва маълумотларга назарий ишлов беришда фойдаланганлик билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, зарядли зарраларнинг кристалл нанополенкалари орқали ўтиши ва улардан сочилиши, унинг таркиби, кристаллик ва электрон структураси, кириш чуқурлиги, тормозлаш

10

характери, киритилган атомларнинг макро- ва микро тақсимооти, бурчак ва энергиявий тақсимооти каби жиҳатларини ҳар томонлама ўрганиш қаттиқ жисмларнинг хоссалари ва структуралари тўғрисидаги тушунчани кенгайтиришга имкон беради.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, таклиф этилган илмий натижалар металл–диэлектрик–яримўтказгич ва яримўтказгич–диэлектрик–яримўтказгич юпқа пленкали структураларни яратиш, кристаллнинг пухталиқ даражасини аниқлаш, юпқа пленкаларнинг монокристаллигини баҳолаш, қаттиқ жисм кристалл панжарасига киритилган

атомларнинг макро- ва микро тақсимотини топиш, пленкаларнинг қалинлиги ва тормозлаш қобилиятини тез ўлчаш ҳамда ишлаб чиқариладиган саноат материаллари сифатини яхшилаш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Майдадисперсли мис сеткаси устида олинган эркин мис пленкалари ҳамда улар устида олинган кўп қаватли яримўтказгичли структуралардаги ориентацияли эффектларни ўрганишда олинган натижалар асосида:

ион имплантацияси, Оже-электронлар эмиссияси ва ионларнинг кристаллар юпқа пленкалари орқали ўтиши бўйича олинган ориентациявий эффектларни аниқлашда олинган натижалари «ФОТОН» акциядорлик жамиятида кўпқатламли структуралар ҳамда металл-диэлектрик яримўтказгич (МДЯ) ва яримўтказгич-диэлектрик-яримўтказгич (ЯДЯ) структураларни олишда элементларни легирлаш технологиясида қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 11 июлдаги №03-1297-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланиши электрон асбобларнинг ишлаш ишончилигини, МДЯ ва ЯДЯ структураларни олиш технологияси сифатини яхшилаш имконини берган;

вакуум асбоб-ускуналарини эксплуатация қилишда электрон бошқаришга имкон берадиган ишончли, сифатли коммутация қурилмаси ишлаб чиқаришда қўлланиладиган контакт электродлари «PROTON» илмий техникавий корхонасида ишлаб чиқилган («PROTON» илмий-техникавий корхонасининг 2016 йил 9 сентябрдаги маълумотномаси). Ишланманинг қўлланилиши автоматик равишда бошқариладиган электрон асбоб ускуналарни ишлаб чиқаришга, уларнинг ишлаш муддати, аниқлиги ва сифатини оширишга ҳамда паст ҳароратли вакуум технологиясини такомиллаштиришга имкон берган;

монокристалларни ион ва электронлар билан бомбардимон қилиш натижасида олинган ориентациявий эффектларнинг намоён бўлиш, каналланган ва каналланмаган ионларнинг энергия йўқотиш механизмлари 2Ф.1.№ 01200009821 «Мураккаб кристалларнинг юпқа қатламларида ва юзасида ўрта ва кичик энергияга эга бўлган ионларнинг сочилиши ва каналланиши жараёнларини ва ионларнинг каналланиш пайтида яримўтказгичларда экситонларнинг пайдо бўлишини тадқиқ қилиш» ва БВ Ф2-003 «Машинада моделлаштириш услуги билан ионлар имплантацияси энергиявий тақсимот спектрларидаги ориентациявий эффектлар механизмларини аниқлашда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фан ва

11

технологияларни ривожлантиришни мувофиқлаштириш давлат қўмитасининг 2016 йил 15 декабрдаги ФТК-0313/912-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши саноат материалларининг сифатини ва юпқа монокристаллар ва аморф яримўтказгичларда фототашувчиларнинг нурли рекомбинациясини тадқиқ қилиш» грант лойиҳаларида олинган яхшилаш, кристаллар сирти структураси, таркиби ва юпқа плёнкаларнинг мукамаллик даражасини назорат қилиш, пленканинг монокристаллиги ва кристаллдаги аралашма атомлари жойлашишини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари, жумладан 13 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий

анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 30 та илмий иши чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 12 та мақола, жумладан, хорижий журналларда 7 та мақола ва 1 та монография нашр этилган, халқаро ва республика конференциялар тўпламларида 17 та маърузалар эълон қилинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, 209 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 63 та расм ва 12 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 205 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асослаб берилган; тадқиқотларнинг мақсади ва вазифалари, объекти ва предмети 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.

Диссертациянинг **“Кристаллар ориентациясига боғлиқ равишда зарядли заррачаларнинг юпқа кристаллардан ўтиши ва улардан сочилиши бўйича адабиётларда келтирилган натижаларнинг қисқача таҳлили”** деб номланган биринчи бобида металллар ва ярим ўтказгичларнинг эркин юпқа қатламлар орқали ўрта ва паст энергияли зарядланган заррачаларнинг ўтиши ва сочилиши жараёнларининг ориентацион (йўналишга боғлиқ) эффектларга тегишли адабиётларда келтирилган амалий ва назарий тадқиқот натижалари таҳлил қилинган. Оже электронлар эмиссияси ориентацияга боғлиқлигининг алоҳида хусусиятлари, турли модификациядаги эркин юпқа қатламлар орқали ўтиш ва қайтиш жараёнларида электронлар, газ ионлари ва протонлар (2–5 МэВ) энергия йўқотишлари таҳлил қилинган, шунингдек, қаттиқ жисм сиртининг

12

масс-спектрометрик таҳлили келтирилган. Очик каналлар ёки текисликларга зарядланган заррачалар параллел йўналтирилганда энергиявий, бурчак ва фазовий тақсимотлар билан бир қаторда ионлар ва электронлар энергия йўқотишларининг анизотропияси, яъни энергия йўқотишлар камайганлиги кўрсатиб берилган. Турли ўқлар ва текисликларда параллел ҳолда ўтувчи протонлар энергия йўқотишлари анизотропияси бу йўналишлар бўйича валент электронлар зичлигининг турлича бўлиши билан изоҳланган. Шуни таъкидлаш лозимки, ориентацион эффектлар (каналлар бўйича, блокировка), асосан, енгил ва юқори энергияли заррачалар учун тадқиқ қилинган. Плазмонлар дисперсияси, металл ва яримўтказгич юпқа пленкалар орқали ўтувчи ва улардан қайтувчи электронларнинг энергиявий, бурчак ва

ориентацион боғланишлари ўрганилган. Тадқиқотлар натижасида металлларда спектрлар структурасининг шаклланишида энергетик жиҳатдан Ферми сатҳидан юқорида жойлашган электрон ҳолатлар тақсимои хусусиятлари асосий роль ўзнаши тўғрисида фикрлар пайдо бўлди.

Замонавий аналитик кўринишдаги иккиламчи ионлар масс–спектрометрияси (ИИМС) – сиртнинг элемент таркиби, пленкали ва наноўлчамдаги структурасини ўрганишнинг энг сезгир усулларида бири ҳисобланади. ИИМС спектридаги чўққилар катталиги сиртда мавжуд элементларнинг реал концентрацияларини аниқлашга ёрдам беради.

Диссертациянинг **“Ион ва электронларнинг қаттиқ жисм билан ўзаро таъсирини тадқиқ қилиш экспериментал қурилмалари ва усуллари”** деб номланган иккинчи бобида ион ва электронларнинг қаттиқ жисм билан ўзаро таъсири жараёнида кристаллар сирти ва юпка эркин пленкалар хусусиятлари, таркиби ва тузилишини ўрганишнинг асосий экспериментал усуллари кўрсатилган. Лабораторияда керакли ахборотларни олиш имконини берувчи ЭОС, ЭХЭЙ спектроскопияси, ионларнинг энергия йўқотиш спектроскопияси (ИЭЙС), ИИМС каби методлар яратилган. Бундан ташқари лабораторияда текшириладиган намуналар сиртини модификация қилиш мақсадида ион бомбардировкасини амалга ошириш ва Cu, Al, Ag ларнинг эркин юпка пленкаларини олиш мақсадида юқори вакуумли чанглангириш усули ишлаб чиқилган. Спектрометр зангламайдиган магнитсиз металлдан тайёрланган юқори вакуумли камера бўлиб, унда фланецлар орқали ион ва электронларни тезлаштирувчи манбалар мотаж қилинган (ўрнатилган). Спектрометр камерасида ишчи вакуум $\sim 8 \cdot 10^{-9}$ Торр бўлиб, текшириладиган намуна сирти орқа тарафидан электронлар билан бомбардидимон қилиниши натижасида қиздирилади, баъзи ҳолларда ион емирилиб тозаланади. Намуна сиртининг тозаллиги оже–электронлар спектрида углерод ва кислород оже чўққиларининг камайиши ва йўқолиши билан баҳоланади. Ионлар манбаи сифатида осцилляцияланувчи электронлар манбаи танланди. Бунда электронларнинг ҳаракат йўли ортади ва ионлашиш эҳтимоли ошади. Манба ҳажмида ишчи газ босими $P=10^{-5}$ Торр дан ошмайди, манбанинг максимал ток зичлиги 10^{-8} А/см², намуна энергияси 0,5 дан 30 кэВ гача бўлган ионлар билан бомбардидимон қилиш имконини беради. Ион дастаси диаметрини

13

бирламчи линзалар ёрдамида 0,4–2 мм ораликда қўйилган масалага қараб ўзгартириш мумкин.

ЭОС усули аралашмаларнинг элемент таркиби ва микрожойлашуви, имплантация қилинган атомларнинг қаттиқ жисм кристалл панжарасидаги ўрнини кристалларда электронлар ва ионлар дастасининг каналлашувидан фойдаланган ҳолда аниқлаш мақсадида ишлатилиши, аралашмаларнинг тақсимот профиллари ҳамда текширилаётган металлларда уларнинг фоиз миқдорини таҳлил қилиш учун ҳам фойдаланилиши аниқланди. Оже спектрометрнинг аралашмаларни аниқлаш бўйича сезгирлиги 10^{13} – 10^{12} атом/см² (0,1–0,01%)ни ташкил қилади. Бирламчи электронлар дастаси энергиясини 1÷5 кэВ, ионлар дастаси энергиясини эса (Ar^+ , Kr^+ , ёки Cs^+ , K^+ ,

Na^+) $1\div 10$ кэВ ораликда ўзгартириш мумкин. Текшириладиган материал сиртида бирламчи электронлар ва ионлар дастасининг тарқалиш бурчаги $\sim 1^\circ$ ни ташкил қилади.

Тажрибаларни ўтказиш учун стандарт МИ-1201Б масс-спектрометри асосида ИИМС курилмаси такомиллаштирилди. Масса бўйича ажрата олиш қобилияти ($M/\Delta M \approx 4000$) ва етарлича катта сезгирликка (10^{-5} – 10^{-6} ат.%) эга бўлган ИИМС аналитик курилмаси яратилди ва ишга туширилди. Такомиллаштирилган ИИМС орқали ҳам мусбат, ҳам мафий ионлар масс спектрларини олиш мумкин.

Металларнинг эркин юпка поли- ва монокристалл пленкаларини олиш вакуумда термик буғлатиш усулида амалга оширилди. Металл камера совитилади ва чангланиш жараёнида босим 10^{-8} Торр атрофида бўлади. Намунага таглик сифатида сунъий $\text{NaCl}(100)$ ош тузи кристалидан фойдаланилди. Тадқиқот жараёнида асосда ҳосил қилинадиган юпка пленканинг ўсиш тезлигини аниқ ўлчаш имконини берувчи иш режими ишлаб чиқилди. Бунда қатламнинг ўсиш тезлиги ~ 20 Å/с бўлганда модданинг сифатли ва турли аралашмаларсиз қатламларини олиш имконияти пайдо бўлади. Чангланиш тезлиги қанча юқори бўлса, қатлам мустаҳкамлиги ҳам шунча юқори бўлиши кузатилди. Бу усул ёрдамида қалинлик бўйича нобиржинслиги 3% дан ошмайдиган 100 дан 1500 Å гача бўлган юпка пленкаларни олиш мумкин. Олинган юпка пленкалар электронографик усулда таҳлил қилиниб, монокристалл тузилишга эга эканлиги аниқланди.

Диссертациянинг **“Кристалларни ион ва электронлар билан бомбардимон қилганда электронларнинг характеристик энергия йўқотишлари ва оже электронлар эмиссиясининг ориентацияга боғлиқлиги”** деб номланган учинчи бобида кристалларни тезлаштирилган ионлар ва электронлар билан бомбардимон қилиш жараёнида электронларнинг характеристик энергия йўқотишлари ва оже электронлар эмиссиясининг ориентацияга боғлиқлиги тадқиқотлари натижалари кўрсатилган. Қийин эрийдиган металллар поли- ва монокристалларини ҳамда кремнийнинг бошланғич энергияси 3–10 кэВ бўлган ионлар (Ar^+ , He^+) ва электронлар билан бомбардимон қилиш жараёнида ҳосил бўладиган оже электронлар эмиссиясининг қиёсий тадқиқи ўтказилди. Ионлар билан бомбардимон қилиш жараёнида олинган спектрлардаги оже чўққилар шакли

14

электронлар билан бомбардимон қилиниб олинган оже спектрлардан тубдан фарқ қилади. Кузатилган ҳодиса механизмларини аниқлаш мақсадида (оже чўққиларнинг кенгайиши ва силжиши) вольфрам сиртини ионлар билан бомбардимон қилиш жараёнида оже чўққилар шакли ўзгаришининг тушаётган ионлар дастаси энергиясига ва тушиш бурчагига боғлиқлиги тадқиқ қилинди. Ионлар дастаси энергиясининг ортиши билан оже чўққилар кенглигининг ортиб бориши, тушиш бурчагининг ортиши билан эса оже чўққилар кенглигининг камайиб бориши кўрсатиб берилди. Бундан ташқари ион оже спектрларда сателлит чўққилар пайдо бўлиши кузатилди, бу ҳодиса механизми ҳозирча аниқланмади. Кузатилган оже чўққиларнинг иккига ажраши SiO ёки SiO_2 кимёвий бирикмалар ҳосил бўлиши билан боғлиқ

Квант механикаси ёндашиши асосида кимёвий бирикмалардаги бир элемент атомининг иккинчи элемент атоми билан ион боғланиши туфайли пайдо бўладиган оже чўққиларнинг энергия бўйича кимёвий силжишини аниқлашда атомнинг эффектив заряди ўзгаришига асосланган янги ҳисоблаш усулидан фойдаланилди. Оже ўтишлар энергиялари ҳисоб-китоби релятивистик тузатишлар ҳисобга олинган ҳолда Хартри–Фок яқинлашиши ёрдамида амалга оширилди. Ҳисоблашлар конфигурациялар термларининг ўртача қийматлари учун амалга оширилди. Ҳисоблашлар натижалари тажриба натижалари билан солиштирилганда улар ўртасида мослик борлиги аниқланди.

Хулоса қилиб шуни айтиш мумкинки, олинган натижалар ва таҳлиллар асосида кўрсатилган йўналишларда (1-расм) углерод ва кислород атомларининг 1/2, 1/2, 0 координатали ва $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ йўналишлари бўйича оже чўққилар интенсивлигининг кескин ортиши шу йўналишларда кислород ва углерод атомларининг етарлича катта концентрациялари мавжудлигини кўрсатади. Тадқиқот жараёнида M_o ва W ларнинг асосий кичик энергияли оже чўққиларида сателлит (қўшимча) чўққилар пайдо бўлиши аниқланди. Сателлит чўққилар интенсивлиги чуқур тадқиқ қилинганда ўзгаришлар молибден ва вольфрам сиртлар ҳолатига боғлиқлиги аниқланди. Масалан,

[illegible]

(*xum* *MoO*₁)

 ${}^nZ\text{ Mo MoO}$

ва атомларнинг эффектив зарядлари тўғрисидаги катталиклар жадвали ҳамда уларнинг ион типидagi боғланишлар ҳосил қилиб кимёвий боғланишларга киришишдан фойдаланиб 27 эВ энергияли молибден оже чўққиларининг кимёвий силжиши аниқланди.

Al монокристалл ионлар ва электронлар билан бомбардимон қилиниб

аниқланди.

олинган оже спектрлар қиёсий тадқиқ қилинди. Асосий оже чўққи интенсивлиги камайиши ва чўққи кенглигининг ортиши ҳамда қўшимча оже чўққилар пайдо бўлиши

1-расм. Молибденда С ва О оже-электронлари нисбий интенсивлигининг бирламчи электронлар тушиш бурчаги ϕ га боғлиқлик эгри чизиклари

Оже чўққиларнинг иккиланишига сиртнинг ионлар билан бомбардимон қилинаётган соҳаси кучли локал қизиши ва кислород атомларининг кристалл ҳажмидан диффузияси бўлиб, бунинг

натижасида кислород кристалл панжара

асосий атомлари билан бирикиб, турли

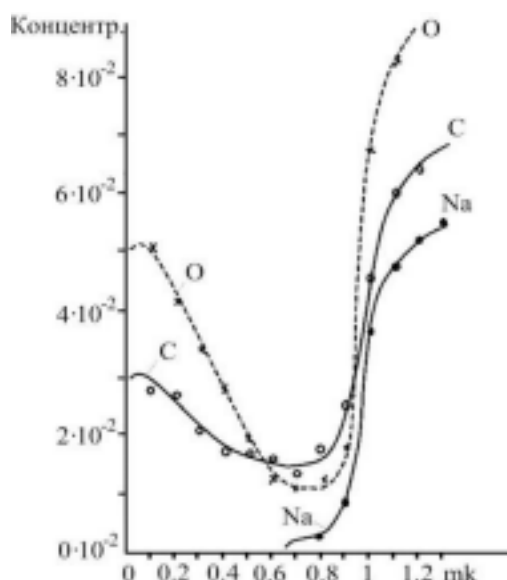
оксидларни ҳосил қилиши (AlO , Al_2O)

асосий сабаб деб топилди. Оже чўққилар

интенсивлиги бирламчи ионлар тушиш

бурчагига боғлиқлиги, асосий оже чўққилар

энергиясининг кичик энергияли соҳаларда пайдо бўладиган қўшимча оже чўққилар энергиясидан 4–5 эВ фарқ қилиши аниқланди.



ЭОС ва ИИМС усуллари ёрдамида яримўтказгич–диэлектрик, яримўтказгич–металл чегарасида назорат қилиб бўлмайдиган аралашмалар таркиби,

уларнинг кимёвий ҳолати ва тақсимот элементлар

профили ўрганилди (CdS-Ni , Si-Ni , Si-Al , Si-SiO_2).

CdS-Ni чегарасида

назорат қилиб бўлмайдиган

аралашмалар таркибини аниқлаш

мақсадида никель сиртидан бошлаб то

CdS яримўтказгичли таглик

қатламигача чуқурлик бўйича

2-расм. Ni пленкаси устида қалинлиги 1мкм бўлган CdS-Ni структураси чуқурлиги бўйича C, O ва Na аралашмалари концентрацияси тақсимоти профили эгри чизиклари

(C, O, Na) тақсимоти ўрганилди ва улар концентрацияларининг яримўтказгич–металл чегарасида ортиши кўрсатиб берилди (2-расм). Бу ҳол яримўтказгич ва металл чегара қисмида кристалл панжараларининг мос келмаслиги туфайли пайдо бўладиган нуқсонлар сабабли юзага келиши мумкин, яъни нуқсонлар ўз навбатида яримўтказгич ҳажмида мавжуд бўлган аралашма элементлар (C, O, Na) атомларини тутиб қолувчи манбага айланади. Кремний атомлари оже чўққиларининг кимёвий силжишларини тадқиқ қилиш шуни кўрсатдики, SiO_2 пленка SiO дан иборат ўтиш қатлами орқали Si тағлиққа тегар экан, демак, Si ва SiO_2 қатламлар орасида SiO эга юпқа қатлам мавжуд. Si- SiO_2 чегара сиртлари учун олинган оже электронлар спектрида барча оже чўққиларнинг юқори энергиялар ва айрим ҳоллардагина кичик энергиялар соҳасига силжиши кўрсатилиб берилди. Спектрлардаги оже чўққиларни таҳлил қилишда уларнинг силжиш катталиги ўзгариши яримўтказгич–диэлектрик чегараси сиртларида зарядланиш эффекти пайдо бўлиш ҳодисасига боғлиқлиги кўрсатилди.

Бу чегарада сиртнинг SiO_2 юпқа пленканинг ҳосил бўлиши шароитларига боғлиқ равишда мусбат ёки манфий зарядланиши аниқланди. Агар чегара сирти яқинида электронга мойиллиги юқори бўлган элементлар, масалан, O, Cl ва бошқа аралашма атомлари етарлича кўп бўлса, сирт манфий, аксинча, электронга нисбатан электромусбат мойилликка эга элементлар, масалан, Na, K ва бошқа элементлар атомлари мавжуд бўлса, сирт мусбат зарядланар экан.

Mo ва Nb сиртларидан қайтишда электронларнинг характеристик энергия йўқотишларининг (ХЭЙ) дисперсияга боғлиқлиги тадқиқ қилинди. Спектрда бир катор дискрет энергия йўқотган чўққилар кузатилди (1-жадвал). ХЭЙ спектрларида зоналараро ўтишда пайдо бўладиган максимумлар мавжудлиги шунга олиб келадики, ХЭЙ спектрлари структураси шаклланишини тасвирлаш учун текширилаётган материалларнинг макроскопик (комплекс) диэлектрик сингдирувчанлиги (ДС) деб аталувчи хусусиятларини қўллаш муҳим:

$$\varepsilon(\vec{k}, \omega) = \varepsilon_1(\vec{k}, \omega) + i\varepsilon_2(\vec{k}, \omega) \quad (2)$$

Бу ерда ε_1 ва ε_2 лар комплекс диэлектрик сингдирувчанликнинг ҳақиқий ва мавҳум қисмлари, $\hbar k$ ва $\hbar \omega$ ноэластик тўқнашиш натижасида металлдаги электрон газни жунбушга келтиришда сочилган бирламчи электронларнинг қаттиқ жисмга берадиган импульси ва энергияси. Диэлектрик сингдирувчанлик ХЭЙ спектрини тўла характерлаб бера олади, чунки у электронларнинг жунбушга келиш спектри тўғрисида маълум ахборотларни ўз ичига олади ва текширилаётган материалнинг электромагнит таъсирга қандай чидамлилигини яхши тасвирлаб бера олади. Ўтувчи металллар электронлари ион пажара тугунлари яқинида етарли даражада локаллашган бўлади. Буларни ҳисобга олган ва зоналар структураси хусусиятларидан келиб чиққан ҳолда ДСнинг осциляторли модели ёрдамида ХЭЙ спектрини ҳисоблаш такомиллаштирилди. Таҳлиллар шуни кўрсатдики, Mo, W, Nb

кристалларда (nd)–(mf), (np)–(md) барча ўтишлар боғланган бўлиб, бу ҳолни

17

қайтган электронлар билан ўтказилган тажрибаларда олинган 10–50 эВ энергия интервалидаги ХЭЙ спектрларининг кўриниши ҳам тасдиқлайди.

1-жадвал

Mo ва Nb плазмонларида характеристик энергия йўқотишлар

Элемент	ΔE_i – энергия йўқотишлар, эВ				
	$\hbar\omega_p(5s)$	$\hbar\omega_{pv}$	d-f	$2\hbar\omega_{pv}$	
Mo	11,7	23,2	36	48,3	70,4
Nb	11,3	18,5		37	56

Диссертациянинг “**Турли модификациядаги қаттиқ жисмлар орқали ўтишда ионлар энергия йўқотишларининг ориентацияга боғлиқликлари тадқиқоти**” деб номланган тўртинчи бобида ўрта энергияли ионларнинг металллар поли- ва монокристаллари эркин юпқа пленкаларидан ўтиши ҳамда каналланиши жараёнида энергиявий ва бурчак тақсимотларининг ориентацияга боғлиқлигини тадқиқ қилиш бўйича ўтказилган тажриба натижалари келтирилган. Ўтган ионлар бурчак тақсимотининг кутб диаграммалари олинди. Тушиш бурчагининг ортиши пленкаларда ионлар ҳаракат йўлининг ортишига, бу эса ўз навбатида қайта тўқнашишлар эҳтимолининг ошишга олиб келади ва ионлар катта бурчакларга сочилади. Шунини айтиш мумкинки, ионлар дастаси тушиш бурчаги ортишининг самарадорликка таъсири пленка қатламининг ортишига тенг кучлидир. Тадқиқотлар натижалари шунини кўрсатдики, бурчак тақсимот шаклининг шаклланишида кўп қаррали тўқнашувчи ионлар қисмининг ўзгариши муҳим аҳамият касб этар экан. Уларнинг ортиши Q кутб сочилиш бурчаги бўйлаб барча йўналишларда ўтаётган ионлар тақсимотининг бирмунча изотропиясига олиб келади.

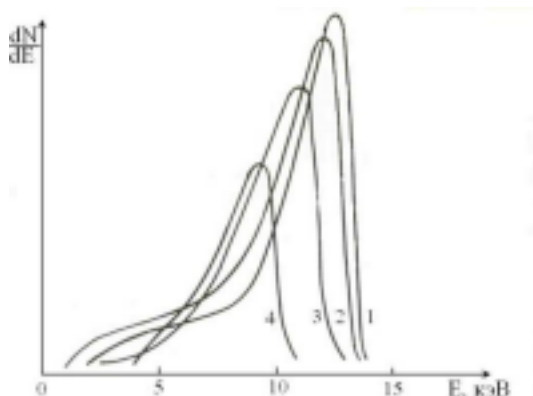
$\sim 180 \text{ Å}$ қалинликдаги эркин юпқа Cu пленкаси орқали ўтган турли E_0 энергияли Na^+ ионларнинг бир қанча энергиявий тақсимотлари тадқиқ қилинди. Энергиявий тақсимот юқори энергия соҳаларида локаллашган, максимумларга эга симметрик бўлмаган эгри чизиқлардан иборат ва E_0 энергия ортиши билан камаювчи кичик энергияли “дум”лардан иборат. Ионлар бошланғич энергияси ортиши билан тақсимотдаги максимумлар энергиявий ҳолатининг чизиқли силжиши ва кичик энергия соҳасида давом этувчи “дум”ларнинг мавжудлиги ионларнинг Cu пленкаси орқали ўтишида тормозланиши билан боғлиқ асосий жараёнлар, уларнинг нишон атоми билан ҳам эластик, ҳам ноэластик тўқнашишлари эканлигини кўрсатди. Ионлар бошланғич энергиясининг ортиши билан энергиявий тақсимотдаги максимумлар E_0 га пропорционал равишда юқори энергиялар соҳасига силжийди. Ўтиш жараёнида K^+ ионларининг худди шундай қалинликдаги Cu пленкаларидан ўтган ионлар энергиявий спектрида кичик энергияли “дум”лар янада яққол намоён бўлади.

Олинган натижалар асосида ионлар энергия йўқотишлари ΔE нинг ионлар дастаси бошланғич E_0 энергияларига боғлиқлик графиклари чизилди. E нинг қиймати Na^+ ва K^+ ионлари учун бошланғич энергия E_0 10 дан 40 кэВ гача ортганда чизикли ортади, бу эса ўз навбатида умумий энергия йўқотишларда эластик ва ноэластик тормозланиш жараёнларининг рўй беришидан далолат беради. Энергиявий тақсимотнинг энергияга, ионларнинг турига ва пленка қалинлигига боғлиқлиги олинган тажриба натижалари бўйича қуйидаги хулосаларга келиш имконини беради: кичик E_0 энергияларда E/E_0 нинг қиймати юқори E_0 энергиялардагига қараганда каттароқ, яъни кичик E_0 энергияларда энергия йўқотишлар юқори E_0 дагига нисбатан кўпроқ. Бунга сабаб кичик E_0 энергияларда ионларнинг тўлқин узинлиги нинг каттароқ эканлигидир. 20 кэВ энергияларда $\sim 5\text{--}6 \text{ \AA}$ бўлса, 40 кэВ энергияларда $\sim 2\text{--}3 \text{ \AA}$ ни ташкил қилади. Поликристалларда каналланиш эффекти кузатилмайди, ионлар ўз йўлида каттароқ бурчакларга

оғиши мумкин ва мос равишда эластик йўқотишлар кескин ортади.

Ионларнинг юпқа пленкалар орқали ўтиш жараёнларини тақдқиқ қилишда ионларнинг нишон атомлари билан ўзаро таъсир механизмига ва энергия йўқотишларига нишон кристалл панжаралари ориентацияларининг таъсирини ўрганиш катта қизиқиш уйғотди.

3-расмда энергияси $E_0=20 \text{ кэВ}$ ва турли ϕ бурчакларда (1– 0° , 2– 30° , 3– 45° , 4– 60°), қалинлиги $x \approx 200 \text{ \AA}$ бўлган эркин юпқа



$\text{Cu}(100)$ пленкаси орқали ўтаётган Na^+ ионлар энергиявий тақсимотларининг эгри чизиклари келтирилган. Кўриниб

турибдики, тушиш бурчагининг ортиши билан энергиявий тақсимотдаги максимумлар кичик энергиялар томонга силжийди ва бу ҳолда энергия шкаласи бўйича максимумлар силжиши ϕ бурчак ортиши билан очизикли ортади.

Худди шундай натижалар юпқа Cu

$E_0 = 20 \text{ кэВ}$, $x_{\text{Cu}} = 200 \text{ \AA}$. 1– $\phi = 0^\circ$; 2– $\phi = 30^\circ$; 3– $\phi = 45^\circ$; 4– $\phi = 60^\circ$

3-расм. Cu плёнкасидан ўтган Na^+ ионларининг тушиш бурчагига боғлиқлиги бўйича энергиявий тақсимот эгри чизиклари

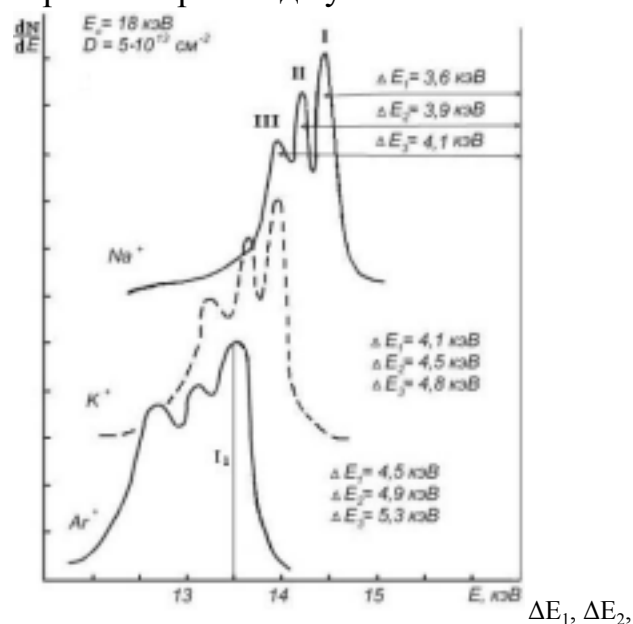
пардаси орқали ўтган K^+ ва Rb^+ ионлари энергиявий тақсимотларининг бурчак боғланишларини тадқиқ қилишда ҳам олинди. Шуни таъкидлаш лозимки, Na^+ ва K^+ ионларидан янада оғирроқ Rb^+ ва Cs^+ ионларига ўтишда энергиявий тақсимот кескин ўзгаришларга учрайди. Бундай ҳолларда ионларнинг

энергиявий спектри жуда кенг бўлади ва унинг кичик энергияли соҳаси энг кичик энергияларгача чўзилади. Бундан ташқари оғир Cs^+ ионлари ҳолида ф бурчак ортиши билан энергиявий тақсимот максимумнинг силжиши кескин рўй беради ва $\varphi > 70^\circ$ бурчакларда энергиявий тақсимот йўқолади, бу эса катта бурчаклар остида ионлар тушаётганида бамбардимон қилинаётган пленка эффектив қатламининг ортиши туфайли оғир ионларнинг ўтиши тўхташидан далолат беради.

19

Пленка қалинлигига нисбатан кичик кесимли ионлар дастаси билан бомбардимон қилиш жараёнларини тадқиқ қилиш бевосита битта тажрибада турли қалинликдаги моддаларнинг тормозлаш хусусиятларини тез аниқлаш имконини ҳам беради. 4-расмда юпка мис пленкаси орқали ўтган Na^+ , K^+ ва Ar^+ ионлари энергиявий тақсимотлари келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, бу спектрларда учта максимум яқол кузатилади. I – юқори энергияли бош тақсимот чўққиси бўлиб, Na^+ ионларнинг Cu кристаллининг $[100]$

Энергиявий тақсимотдаги III чўққи эса монокристалл пленка орқали тартибсиз равишда ўтган



йўналишида ўқ бўйича каналлашиши билан боғлиқ. II энергиявий тақсимот чўққиси текислик бўйича каналланган ионлар туфайли пайдо бўлади.

ΔE_3 – I, II, III чўққиларга тўғри келувчи энергия йўқотишлар

4-расм. Қалинлиги 450Å Cu(100)

пленкасида ўтган Na^+ , K^+ ва

Ar^+ ионларининг энергиявий тақсимоти

ионлар билан боғлиқ (энг катта энергия йўқотиб) ва бунда каналланиш сезилмайди.

Бир хил шароитларда олинган бу спектрларни солиштириш шунни кўрсатадики, Na^+ дан K^+ ва Ar^+ га ўтишда барча максимумлар катта энергия йўқотишлар соҳасига силжийди, кенглигининг бироз ортиши содир бўлади ва учинчи максимум интенсивлигининг биринчи ва иккинчи максимумларга нисбатан ортиши кузатилади. Демак, айтиш мумкинки, ионлар массаларининг ортиши барча турдаги энергия йўқотишлар ортишига ва каналланмайдиган ионлар сонининг кўпайишига олиб келар экан. Кузатилган эффектлар K^+ ва Ar^+ ионлари радиусларининг турлича эканлиги билан тушунтирилади. Аргон ионининг радиуси ($r_{\text{Ar}} \approx 1,88 \text{Å}$) K^+ иони радиусидан етарлича катта ($r_{\text{K}} = 1,33 \text{Å}$). Худди шундай эффектлар пленкалар Rb^+ ($r_{\text{Rb}} = 1,48 \text{Å}$) ва Kr^+ ($r_{\text{Kr}} \approx 2 \text{Å}$) ионлари билан бомбардимон қилинганда ҳам кузатилди.

180 дан 600Å гача бўлган қалинликдаги Cu ва Ag нинг юпка монокристалл пленкалари орқали ўтган ионларнинг (K^+ , Na^+) фазовий

тақсимоти ўрганилди. Бурчак тақсимотининг кутбли диаграммалари олинди ва уларда ([100], [130], [120], [110]) кристаллографик йўналишларга мос келувчи аниқ ифодаланган чўққилар кузатилди. Ионларнинг кристаллар юпқа пленкалари орқали ўтиши бўйича тажриба натижалари бирламчи ионлар дасталари энергияларининг ортиши ва ионлар массаларининг камайиши каналланиш критик бурчаклари катталикларининг камайишига олиб келишини тасдиқлайди. Ўртача энергияли нисбатан оғир ионларнинг юпқа пленкалар орқали ўтиши жараёнларида ориентацион эффектларнинг яққол намоён бўлиши ва фазовий тақсимот эгри чизиклари орқали юпқа

20

пленкалар структурасининг бенуксонлиги даражаси тўғрисида фикр юритиш мумкинлигини кўрсатади. Юзанинг тартибсизланиш даражаси ўсиши билан зарралар каналлашишига боғлиқ чўққилар интенсивлигининг монотон камайиши, тартибсиз равишда ўтишда эса чўққи интенсивлигининг ортиши кўрсатиб берилди. Юзани тартибсиз ҳолатга келтиришга турли доза ва энергияси $E_0=3$ кэВ бўлган K^+ ва Ag^+ ионлари билан бомбардимон қилиш натижасида эришилди.

5-расмда

бомбардимон

натижасида

пленкалар

□ орқали ўтган

$Ag^+(E_0=18 \text{ кэВ})$

ионлари чўққиси E_1

интенсивлигининг

ўзгариши келтирилган.

Ионлар туридан

қатъи назар, $D \approx 10^{14} \div 10^{15}$ ион·см⁻² доза

соҳасида “канналлашган” ионлар

чўққилари интензивлигининг сезиларли

даражада камайиши кўриниб турибди.

Ag^+ ионлари билан бомбардимон

қилинганда

$D \leq 5 \cdot 10^{14}$ нинг ўзгариши, бомбардимон қилувчи

ион·см⁻² дозаларда $I_1(D)$ нинг камайиш

тезлиги K^+ ионлари ҳолидагидан

сезиларли даражада катта, $D \geq 5 \cdot 10^{14}$

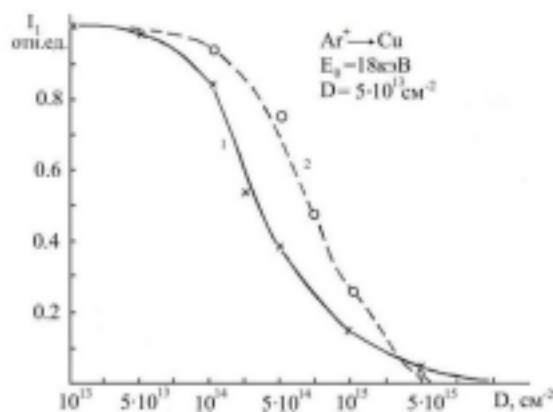
ион·см⁻² дозалар соҳасида эса □

аксинча. $D \leq 5 \cdot 10^{14}$ ион·см⁻² ларда

кузатилган чўққилар интензивлиги E_1



ионлар радиуслари фарқи (r_{Ag} r_K) билан тушунтирилади. Оже электрон спектроскопия натижаларига кўра $D \geq 5 \cdot 10^{14}$ ион·см⁻² дозалар соҳасида ишқорий металллар ионларининг сезиларли қисми (хусусан, K^+) монокристаллнинг юза ости қатламларига кириб қолади ва интерметалл бирикмалар ҳосил қилади. Юпқа пленкаларни ионлар билан бомбардимон



Ag^+ - 1 эгри чизик; K^+ - 2 эгри чизик

5-расм. Олдиндан Ag^+ ва K^+ ионлари билан бомбардимон қилинган $Cu(100)$ пленкасининг, шу пленкадан ўтган Ag^+ ионларининг ΔE_1 чўққи интензивлигига таъсири

жараёнида ($D=10^{14}$ ион·см⁻²) дастлаб алоҳида аморфлашган соҳалар (кластерли фазалар) пайдо бўлади, сўнгра нурланиш дозаси ортиши билан бу фазалар ўлчамлари ортади ва $D=10^{15}$ ион·см⁻² дозалардан бошлаб алоҳида ҳосил бўлган оролчалар чегаралари қўшилиб боради. Шу сабабли $I_1(D)$ эгри чизиқлари асосида монокристалл юзаларнинг тартибсизланган майдонини баҳолаш мумкин. Юзанинг тўла аморфлашиши катта нурланиш дозаларида ($D \approx 5 \cdot 10^{15}$ ион·см⁻²) кузатилади.

Шунингдек, ўрганилаётган материалларнинг тормозлаш хусусиятлари назарий жиҳатдан тадқиқ қилинди. Моддаларнинг тормозлаш хусусиятларини ўрганишда катта ва кичик тезликларда тушаётган заррачаларнинг энергия йўқотишларини “тикиш” усулидан фойдаланмаган ҳолда ифодалаш имконини берувчи статистик ёндашиш орқали келтириб чиқарилган аналитик ифодадан фойдаланилди.

Диссертациянинг “**Электронларнинг металллар эркин юпқа пленкаларидан қайтиши ва улардан ўтишида энергия йўқотишларининг ориентацияга боғлиқлик хоссалари**” деб номланган бешинчи бобида

21

электронларнинг металл эркин юпқа пленкаларидан қайтиши ва улар орқали ўтишида энергия йўқотишларнинг ориентацияга боғлиқлиги тадқиқи натижалари келтирилган. Шу мақсадда 420–500 Å қалинликдаги <100> ва <110> ориентация билан эпитаксия усулида ўстирилган монокристалл мис ва кумуш юпқа пленкалари учун олинган характеристик энергия йўқотиш (ХЭЙ) спектрлари батафсил таҳлил қилинди.

Бирламчи электронлар энергияси 2÷10 кэВ

оралиқда олинди. 6-расмда 420 Å қалинликдаги

Cu(100) монокристалл юпқа пленкаси орқали

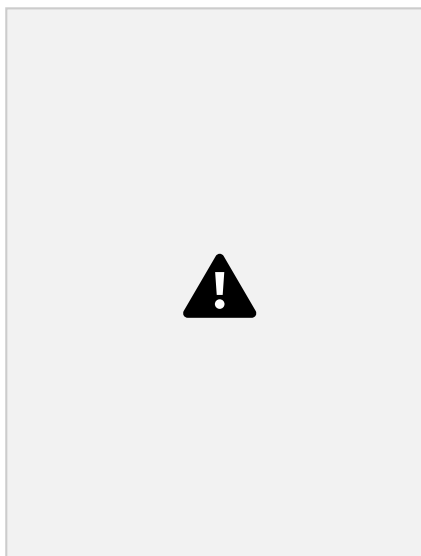
ўтган электронлар ХЭЙ спектри келтирилган.

ХЭЙ спектрида бир қатор характерли энергия

йўқотишларга эга чўққилар кузатилди.

Олинган

натижалар 2-жадвалда келтирилган.



Ҳажмий плазмонлар энергияларининг бурчак боғланишларини ўрганиш жараёнида ф бурчак ортиши билан валент электронларининг ҳажмий плазмон тебранишлари билан боғлиқ

 $E_2=9,8$ эВ энергия йўқотиши биров ортиши
 кузатилди. E_2 нинг ортиши сочилиш

бурчагининг маълум ортишида валент $d=420\text{Å}$, $E_0=6,2$ кэВ

электронлар зичликларининг ортиши **6-расм. Cu(100) пленкаси орқали ўтган электронлар нинг характеристик энергия йўқотиш спектри**
 билан боғлиқ деб фараз қилиш
 мумкин. Сиртга туширилган нормалга

2-жадвал Электронларнинг юпқа мис пленкаларидан ўтишида тажрибада ва назарий йўл билан олинган энергия йўқотишлари

Энергия йўқотишлар, эВ	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
Эксп	7,2	9,8	15,3	19,2	26
Назария	7,57	10,7	–	21,4	0
Йўқотишлар табиати	Сирт плазмон, $\hbar\omega_s$	Ҳажмий плазмон, $\hbar\omega_v$	Зоналараро ўтишлар	Зоналараро ўтишлар	Зоналараро ўтишлар

нисбатан электронлар дастасининг тушиш бурчаги $\varphi=0^\circ, 20^\circ, 45^\circ$ ва 60° бўлганда даста дисперсияси ва $\hbar\omega_v$ га мос чўққининг энергиявий силжиши ҳолати кузатилди. Кузатилган $\hbar\omega_v$ чўққининг силжиши $\varphi=60^\circ$ бурчакда юқори

22

энергия йўқотишлар соҳасида содир бўлади ва $\sim 1,5\text{--}2$ эВ ни ташкил қилади. Ag(100) ва Cu(100) юпқа пленкалар юзасидан қайтган электронлар учун энергиявий спектрлар олинди (электронларнинг бошланғич энергияси 600 эВ, электронлар дастасининг тушиш бурчаги $\varphi=50^\circ$). Спектрларда турли дискрет энергия йўқотилишларга эга бир катор чўққилар кузатилди. Cu ва Ag кристаллари зонали структуралари таҳлилига кўра бу энергия йўқотишлар ўтказувчанлик электронларининг юзада ва ҳажмда коллектив тебранишларнинг жунбушга келиши зоналараро, зоналар ичидаги ўтишлар сабабли содир бўлади ва назарий ҳисоб-китобларга тўла мос келади.

Нодир металллар сиртидан қайтган электронлар ХЭЙ спектрлари структурасини аниқлаш учун нодир металллар (Cu, Ag) зонали структурасининг ўзига хос хусусиятларига асосланган усулдан фойдаланилди. Бу усулда тажрибада олинган ХЭЙ спектрлари

$$^{11}N(E) A\text{Im}[(\)] B\text{Im}[(\) 1] (3)$$

катталиқ билан солиштирилди. Бу ерда $A(\varphi, E_p)$ ва $B(\varphi, E_p)$ лар тушиш бурчаги φ ва бирламчи электронлар дастасининг энергияси E_p га боғлиқ доимий катталиқлар. Бу доимий катталиқлар салмоқдорлик кўпайтувчилари бўлиб, сирт ва ҳажмий энергия йўқотилишлар функциялари ҳиссасини кўрсатади. А

ва В салмоқдорлик кўпайтувчилари эмпирик йўл билан экспериментал натижалар билан мослик пайдо бўлгунга қадар танлаб олинди. $\varepsilon(\omega)$ катталикини ҳисоблаш учун диэлектрик сингдирувчанликнинг (ДС) осцилляторли моделидан фойдаланилди. Ўтказилган сонли моделлаштириш натижасида Cu ва Ag юзасидан қайтган электронлар характеристик энергия йўқотиш (ХЭЙ) спектрларидаги чўққилар пайдо бўлишига сабаб бўлувчи электрон ўтишлар аниқланди.

Қайтган электронлар энергия йўқотишлари тадқиқи худди ўтган электронлар энергия йўқотишлари ҳолидаги каби Cu(100) юпқа пленкани кутб ва азимутал бурилиш бурчакларини ўзгартириб ҳажмий плазмонлар жунбушида энергия йўқотишлар дисперсияси кузатилди. ХЭЙ спектрларининг монокристалл юпқа пленка кристалл структураларига боғлиқлигини ўрганиш жараёнида олинган натижалар таҳлилига кўра $\hbar\omega_v$ билан боғлиқ энергия йўқотишларнинг камайиши, асосан, текислик ва каналланиш ўқлари бўйича валент электронларнинг кичик зичликлари сабабли кузатилиши аниқланди. Илк бор Cu(100) эркин юпқа пленкаси орқали ўтган электронлар эластик чўққисининг интенсивлиги ўзгариши орқали юзанинг аморфлашиш ҳамда тартибсизланиш даражаси баҳоланди. Юза қатламининг аморфланиши ҳажмий плазмонли тебранишлар жунбушида қатнашувчи валент электронлар концентрациясининг ортишига олиб келади. Юзани ионлар билан бомбардимон қилиш жараёнида юза аморфлашиши билан боғлиқ ҳажмий плазмонлар сабабли қўшимча ХЭЙ чўққилари пайдо бўлади. Кузатилган чўққи интенсивлиги нурланиш дозасига боғлиқ. Аморф пленка учун $\hbar\omega_v$ нинг қиймати электронлар каналланиши

23

эффекти содир бўладиган шароитлардаги монокристалл юпқа пленкалар учун олинган энергиялардан 1–2 эВ га каттароқ.

Металл (Cu, Ag) ва яримўтказгич (Si, Ge) кристаллардаги плазмонли тебранишлар дисперсияси назарий жиҳатдан кўриб чиқилди. Бунда плазмонли тебранишлар дисперсиясига атомлар тури таъсири атом форм фактори, кристалл структура тури таъсири эса структуравий фактор орқали текширилди. Кристаллар электрон массаси эркин электрон массасидан фарқ қилади ва эффектив масса деб аталувчи массага эга бўлади. Илмий адабиётларда келтирилган бу массанинг катталиги ва турли йўналишлар бўйича эффектив массани аниқлаш бўйича амалга оширилган ҳисоблашлар натижаларига кўра улар йўналишдан йўналишга ўтишда кескин ўзгаради. Шунга кўра кристаллардаги валент электронлар плазмонли тебранишлари жунбушидаги электронлар энергия йўқотишлари анизотропиясини электронларнинг эффектив массасига боғлиқ деб ҳисоблаш мумкин. Бу, тахминан, кристаллографик йўналиш ва текисликларига мос келувчи электронларнинг зичлигига таъсир қилувчи структуравий факторга боғлиқ ҳолда электронларнинг кристалл потенциал майдони билан реал ўзаро таъсирлашувини ҳисобга олмаслик бўлса керак. Бундан келиб чиқадики, бу факторларни ҳисобга олиш, кристалларда валент электронлар плазмонли тебранишлари жунбушга келиши учун энергия йўқотишларнинг ориентацияга боғлиқлиги мавжудлиги билан тушунтириш имконини беради.

Электронларнинг кристалллардан сочилиши жараёнида ноэластик энергия йўқотилишларидан фойдаланган ҳолда диэлектрик сингдирувчанликни аниқлаш имконини берувчи муносабат олинди. Cu, Ag, Si, Ge ларда характеристик энергия йўқотиш спектрларидан фойдаланган ҳолда квантмеханик усулда олинган дисперсион эгри чизиклар корреляциясининг критерийлари аниқланди.

ХУЛОСА

Поли- ва монокристалллар ва уларнинг юпқа плёнкаларини электронлар ва ионлар билан бомбардимон қилиш натижасида олинган ориентациявий эффектларни тадқиқ қилиш натижалари асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Электрон ва ионларнинг ўта юқори вакуумли универсал кичик бурчакли спектрометри, иккиламчи ионларнинг масс-спектрометри, металлларнинг эркин юпқа пленкаларини олиш учун экспериментал қурилмалар ва тадқиқот усуллари такомиллаштирилган.

2. W, Si, Al монокристалларини ионлар ва электронлар билан бомбардимон қилиш натижасида олинган оже спектрлар солиштирилганда асосий чўққилар ҳолати ва шаклининг бир-биридан анча фарқ қилиши, илк бор Al ва Si ларнинг ион оже спектрларида асосий $L_{2,3}VV$ чўққининг иккиланиши кузатилган, бу ҳодиса бомбардимон қилувчи ионлар таъсирида

24

юзанинг алоҳида қисмлари локал қизиши натижасида оксидларнинг пайдо бўлиши билан боғлиқ эканлиги аниқланган.

3. Илк бор оже-спектрларнинг ориентация ва тушиш бурчагига боғлиқлигидан фойдаланиб монокристалллар панжараларида O, C каби аралашма элементлар атомларининг эгаллаган жойлари, аралашма атомларининг $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, 0 октаэдриқ вазиятларда MoO, MoO₂, WO, WO₂ типигаги бирикмалар ҳосил қилиши аниқланган.

4. Плазмонлар тебраниши назарияси мукаммаллаштирилиб, ўтиш металларида электронларнинг характеристик энергия йўқотиш спектрлари структураси нафақат валент электронларнинг плазмон тебранишига, балки электронларнинг d–p ва d–f зоналараро ҳамда d–d типигаги зона ичидаги ўтишлар сингари зонавий структуралар хусусиятига боғлиқлиги, ҳамда кристалл ориентациясига боғлиқ ҳолда Cu ва Ag монокристалл пленкаларидан ўтган электронларнинг характеристик энергия йўқотиш спектрларидаги асосий чўққининг энергия йўқотиши анизотропияси аниқланган.

5. Юпқа монокристалл Cu пленкаси орқали ўтган ионлар ($E_0=10\div30$ кэВ) энергиявий спектрида учта яққол ифодаланган чўққилар кузатилди ҳамда улар ўқ ва текислик бўйича каналланиш, ионларнинг тартибсиз ўтиши эффектлари, кристалл структураси билан ўтган ионларнинг бурчак ва энергиявий тақсимотлари структуралари орасидаги боғланиш аниқланган.

6. Бир хил шароитда бомбардимон қилинганда юзанинг тартибсизланиши фақатгина киритилган аралашма элементлар атомлари концентрацияларига боғлиқ бўлмасдан, балки ионлар массалари, энергияллари ва радиусларига ҳам боғлиқ бўлиши, каналланган ва каналланмаган ионларнинг энергия йўқотишлари бомбардимон қилувчи ионларнинг массалари, энергиялари, радиуслари (ўлчамлари)га боғлиқлиги, бу эса зарраларнинг юза қатлам билан тўқнашув жараёнларини идентификациялашда муҳим эканлиги аниқланган.

7. Характеристик энергия йўқотиш спектрлари структурасини таърифлаш учун электрон ҳолатлар зичлиги тақсимотида экстемумлар орасидаги электрон ўтишлар эҳтимоллиги ҳисобга олинган ҳолатда диэлектрик сингдирувчанликнинг осциляторли усули ўзгартирилган варианты, спектрлардан фойдаланиб, квантомеханик усуллар ёрдамида Cu, Ag, Si, Ge учун дисперсион эгри чизиклар корреляцияси критерийлари аниқланган.

8. Электронларнинг эркин юпқа пленкаларидан ўтиши ва қайтиши жараёнида, яъни тажрибаларнинг ҳар хил геометриясида ҳажмий плазмонлар жунбушга келиши учун энергия йўқотишлар $1\div 1.5$ эВ га фарқ қилиши, аморфланган пленкалар учун $\hbar\omega_v$ нинг қиймати электронлар каналланиши эффекти бўладиган шароитдаги металл пленкаларга қараганда $1\text{--}2$ эВ га кўплиги аниқланган.

9. Илк бор юпқа Cu(100) пленкалар орқали ўтган электронларнинг эластик чўққилари интенсивлиги ўзгаришига қараб юзанинг аморфланиш даражаси ва тартибсизлашган қатлам юзасини баҳолаш, хусусан, юза $E_0=0,5$

25

кэВ ва $D=10^{15}$ ион·см⁻²бўлган ионлар билан бомбардимон қилинганда юзанинг 35–40% тартибсизланиши, бу ҳолда тартибсизланган қатлам қалинлиги 60–80 Å ни ташкил қилиши аниқланган.

ТЕХНОЛОГИЙ

ИСАХАНОВ ЗИНАОБИДИН АБИЛПЕЙЗОВИЧ

**ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОЦЕССАХ РАССЕЯНИЯ И
ПРОХОЖДЕНИЯ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ТОНКИЕ
КРИСТАЛЛЫ**

01.04.04 – Физическая электроника

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

Ташкент – 2017

27

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2017.1. DSc/FM48

Докторская диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме))

размещён на веб-странице Научного совета (<http://fti-kengash.uz/>) и на Информационно образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный консультант: Умирзаков Балтоходжа Ерматович доктор
физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Тураев Назар Юлдашевич
доктор физико-математических наук, академик

Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич
доктор физико-математических наук, профессор

Кутлиев Учкун Отобоевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Национальный Университет Узбекистана

Защита состоится «___» _____ 2017 г. в ___ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте, Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий, Самаркандском государственном университете по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 26. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net.

Докторская диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института за № ___, с которой можно ознакомиться в ИРЦ по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 26. Тел./Факс: (+99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2017 года
(протокол рассылки ___ от _____ 2017 года).

С.Л. Лутпуллаев,
Председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

А.В. Каримов,
Ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

С.А. Бахромов,
Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Введение (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире в области динамично развивающейся физической электроники одним из важных физических проблем является определение возможных механизмов, наблюдаемых в процессах взаимодействия заряженных частиц с

поверхностью твердого тела и их нанопленками, а также разработка материалов обладающих определенными физическими свойствами для устройств наноэлектроники, микроэлектроники. С этой точки зрения изучение электронных процессов в тонких поли- и монокристаллических пленках считается одним из важнейших задач.

В годы независимости в нашей стране в области эффективного развития физической электроники большое внимание уделено имеющим фундаментальное значение исследованиям включающим физико-химические явления и процессы в различных типах электронных приборов. В этом отношении в прикладной области по укреплению базы новыми качественными материалами обладающих заданными электрофизическими свойствами, усовершенствовании технологии их получения, а также по повышению качества путем внедрения дополнительных элементов в кристалл отвечающих современным требованиям достигнуты существенные результаты. На основе Стратегии действий дальнейшего развития Республики Узбекистан является наиболее важным, дальнейшее развитие отрасли микроэлектроники на основе фундаментальных исследований в области нанопластики за счет разработки новых технологий.

В настоящее время в мире совершенствование технологии получения нанопленок твердых веществ, а также уменьшение дефектов в них, улучшение качественных показателей нанопленок имеет важное значение. В этом отношении целенаправленные научные исследования, в том числе выполнение научных поисков по нижеследующим направлениям являются важными задачами: усовершенствование установок по получению тонких пленок, теоретическое моделирование полученных практических результатов по химическим связям, создание модели кристаллической решетки при присутствии примесных атомов кислорода и углерода, образующихся при термической обработке молибдена и вольфрама, применение на практике спектров дисперсии потери энергии электронами при отражении от тонких свободных пленок меди и серебра и прохождении через них. Научные поиски выполненные по выше приведенным направлениям обосновывают актуальность и востребованность темы данной диссертации.

Данная научно-исследовательская работа соответствует задачам обозначенных в Постановлении Президента Республики Узбекистан «О приоритетах развития промышленности Республики Узбекистан в 2011–2015 годах» от 15.12.2010 г. за № ПП-1442, Постановлении «О мероприятиях организации деятельности Академии наук, научно-исследовательских работ, управление и усовершенствование финансирования» от 17.02.2017г. за №ПП-

2789 и определенной мере будет служить для выполнения поставленных задач.

Соответствие исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике: II– «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение» и III– «Развитие и использование

возобновляемых источников энергии».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации².

Научные и практические поиски по изучению процессов рассеяния заряженных частиц от поверхности и их прохождение через тонкие пленки ведутся в научных центрах мира и высших учебных заведениях, в частности, Стэнфорд/НАСА Эймс «Объединенном институте поверхностных и микроструктурных исследований» (США), научно-исследовательском институте ядерной физики Московского государственного университета, Санкт-Петербургском государственном техническом университете (Россия), Черновицком национальном университете (Украина), Токийском столичном университете (Япония), Институте ядерных исследований (Германия), Цюрихском политехническом университете (Швейцария), Ташкентском государственном техническом университете (Республика Узбекистан).

Разработкой и усовершенствованием современных методов и средств, по определению механизмов процессов, наблюдаемых, при взаимодействии электронов и ионов с поверхностью твердых тел и нанопленками кристаллов занимаются в ряде мировых исследований, в частности получены следующие научные результаты: разработаны новые методы спектроскопии по определению элементного состава поверхности (Санкт-Петербургский государственный технический университет, Россия); усовершенствовано чувствительность спектроскопии характеристических потерь энергии электронами по определению состава, кристаллической и электронной структуры вещества (Цюрихский политехнический университет, Швейцария; Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан); разработана технология по увеличению эффективности разделения элементов, изотопов методом вторичной ионной масс-спектропии (Институт ядерных исследований, Германия; Токийский столичный университет, Япония).

В настоящее время проводится ряд научно-исследовательских работ по определению механизмов взаимодействия при отражении и прохождении заряженных частиц через тонкие пленки различных кристаллов в зависимости от ориентации кристалла, в частности ведутся исследования по

²Обзор международных научных исследований по теме диссертации: J. Physical Review B; J. Applied Physics Letters; J. Japanese Journal of Applied Physics; Ж. технической физики; Ж. Поверхность; Ж. Успехи физических наук; Ж. экспериментальной и теоретической физики; Ж. Физика и техника полупроводников; Ж. Физика твердого тела; Ж. Приборы и техника эксперимента; Научно-техн. сборник Электронная техника. Серия 1, СВЧ-Техника; Письма в Ж. технической физики; Ж. нано и электронной физики; выполнено и на основе других источников.

следующим приоритетным направлениям: определение элементного состава, изменения химического состояния, расположения внедренных примесных атомов, химических связей между примесными и атомами матрицы; энергетического и пространственного распределения заряженных частиц, прошедших через нанопленки металлов; влиянию аморфизации поверхности на энергетические распределения заряженных частиц методами и средствами изучения на основе усовершенствованных современных технических решений.

Степень изученности проблемы. Огромный интерес для исследователей в этой области науки представляют изучение состава, структуры и физических свойств массивных и наноразмерных материалов, исследование углового, энергетического и пространственного распределения ионов и электронов, отраженных от поверхностей и прошедших через тонкие свободные пленки кристаллов.

Профессор Санкт-Петербургского политехнического института В.В. Кораблев изучил спектры оже – электронов, эмитированных твердым телом, при электронной и ионной бомбардировке поверхности твердых тел и определил количественный состав поверхностных слоев материалов. В этой области был проведен ряд важнейших научных исследований, из них в 1970 годы С. Эргинсой и Х.Е. Вегнер исследовали угловое, пространственное и энергетическое распределения легких ионов (H_1^+ , H_2^+ , He^+ , D^+ , Li^+) в области высоких энергий (несколько сотен кэВ и МэВ), прошедших через поли- и монокристаллические пленки металлов и полупроводников, и определили потери энергии в зависимости от ориентации кристалла. А.Ф. Тулинов установил при каналировании ионов эффект блокировки (или тени). Х. Ретер и Х.Бёрш определили спектры характеристических потерь энергии электронами.

В Узбекистане в лаборатории «Адсорбционных и эмиссионных явлений» Института ионно-плазменных и лазерных технологий проводятся комплексные исследования по изучению ориентационных явлений, при прохождении ионов через кристалл, глубину проникновения тяжелых каналированных ионов, распространения внедряемых ионов в веществе, профиль распределения имплантированных атомов, дефектности кристаллов, место локализации внедряемых атомов в кристаллической решетке, спектров характеристических потерь энергии электронами при отражении и при прохождении их через свободные тонкие монокристаллические пленки. На основе полученных результатов выполняются государственные проекты фундаментальных исследований.

Применение современных аналитических приборов и физических методов позволило достичь значительных успехов в указанных выше научных исследованиях, создали новые возможности повышения эффективности научных исследований. Однако до настоящего времени остается открытым ряд фундаментальных проблем в этой области. Например, сравнительное изучение эмиссии оже-электронов при бомбардировке твердых тел пучками ионов и электронов, влияние угла падения пучка ионов

31

и ориентации кристалла на интегральные и дифференциальные характеристики прошедших ионов, ориентационные и дисперсионные зависимости спектров характеристических потерь энергии электронов, при отражении от поверхностей и их прохождении через свободные тонкие монокристаллические пленки при идентичных условиях эксперимента на достаточном уровне не исследовано.

До настоящего времени практически не были изучены места локализации примесных атомов на поверхности, химическая связь между атомами примесей и матрицы, влияние разупорядочения (аморфизация)

поверхностных слоев ионной бомбардировкой на энергетическое распределение прошедших электронов через свободные тонкие пленки металлов, и в этом отношении проводить научно-исследовательские работы является актуальной, имеющей научно-практическое значение.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательской организации, где выполнена диссертация. Диссертационная исследования была выполнена по плану научно-исследовательских работ Института ионно-плазменных и лазерных технологий в рамках следующих проектов: № Ф-2-1-64 «Исследование и установление механизма особенностей формирования оже-спектров при ионной бомбардировке твердых тел» (2003-2007), № Ф-2-1-74 «Дисперсионная зависимость потери энергии электронами на возбуждение плазменных колебаний валентных электронов кристалла» (2003-2007), № ФА-Ф2-Ф102 «Ориентационная зависимость потери энергии ионами и электронами при прохождении их через твердое тело различной модификации» (2007-2011) и № Ф2-ФА-Ф161 «Механизмы формирования свободных тонких пленок (Al, Cu, Ag, и Me-Si) и наноразмерных гетероструктур, созданных на поверхности кристаллов (W, WO₃, TiN, CdTe SiO₂) методом ионной имплантации и изучение их физико-химических свойств» (2012-2016).

Целью исследования является выявление ориентационных эффектов, происходящих в процессах взаимодействия заряженных частиц с кристаллами различной природы, определение место локализации примесных атомов и развитии методов диагностики поверхности.

Для достижения этой цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

усовершенствование экспериментальных установок исследований по современным требованиям: сверхвысоковакуумного универсального электронного и ионного малоуглового спектрометра, вторичного ионного масс-спектрометра, установки для получения тонких свободных пленок металлов и полупроводников;

исследование изменения элементного состава и химического состояния поверхности монокристаллов Mo(100), W(100), Al(100), Si(100) и промышленных образцов Cu, при их очистке ионным травлением и высокотемпературным нагревом, с образованием химических связей между

32

примесными и основными атомами поверхности и подтверждение полученных практических результатов с теоретическими расчетами; изучение локализации примесных атомов в поверхностном слое монокристаллов Mo(100) и W(100), оценка типа образующихся соединений и типа кристаллической решетки на основе анализа угловых зависимостей оже-спектров, создания модели кристаллической решетки при присутствии примесных атомов кислорода и углерода, образующихся при термической обработке молибдена и вольфрама;

исследование угловых и энергетических зависимостей распределения

ионов, прошедших через тонкие поли- и монокристаллические пленки; исследование пространственного распределения ионов и электронов, прошедших через тонкие пленки Cu и Ag, с разупорядоченными поверхностями, в зависимости от энергии и угла падения пучка, а также от азимутального угла поворота образца;

развитие теоретических методов и моделей анализа на основе исследования дисперсии спектров характеристических потерь энергии электронами при отражении и прохождении через тонкие пленки Cu и Ag, при отражении от поверхности Mo, Nb, Si и Ge с различными кристаллографическими направлениями.

Объектом исследования являются, поли- и монокристаллические образцы металлов W, Mo, Nb, Cu, Ag, Al; полупроводников Si, Ge; диэлектрик SiO₂; тонкопленочные системы Ni/CdS, Ni/Si, Al/Si, SiO₂/Si; свободные тонкие поли- и монокристаллические пленки Cu и Ag.

Предметом исследования являются ориентационные эффекты, протекающие при взаимодействии заряженных частиц с кристаллами, а также механизмы аморфизации решетки кристаллов и физические процессы при воздействии на нанопленки заряженных частиц.

Методы исследования. В диссертационной работе применены следующие методы: спектроскопия потери энергий ионами (СПЭИ) при отражении и прохождении через тонкие пленки металлов, оже-электронная спектроскопия (ОЭС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ) и вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС).

Научная новизна исследования состоит в следующем:

впервые обнаружено появление дополнительных оже-пиков вблизи оже-линий L_{2,3}VV в ионных оже-спектрах хорошо очищенных монокристаллов Mo, W, Si, Cu и Al, что объясняется частичным образованием их окислов;

установлена октаэдрическая позиция атомов кислорода и углерода, расположенных в междоузлиях кристаллической решетки в приповерхностных слоях Mo(100) и W(100), а также при бомбардировке монокристаллов W, Al и Si электронами и ионами в одинаковых условиях обнаружено уменьшение интенсивности, увеличение полуширины, изменение энергетического положения основного оже-пика, что объясняется образованием квазимолекулы;

в исследуемой области энергий пучка ионов E₀=5–40 кэВ обнаружена тонкая структура энергетического распределения, обусловленная

33

одновременным вкладом ионов, испытавших осевое, плоскостное каналирование и беспорядочное прохождение через монокристаллические свободные пленки Cu и Ag;

определена зависимость потери энергии ионами при каналировании через монокристаллические нанопленки от полярного и азимутального угла, и эти потери четыре раза меньше, относительно поликристалла, ионная имплантация аморфизует кристаллическую решетку и в спектре с тонкой структурой сначала сглаживается максимум, обусловленный осевым, а затем плоскостным каналированием ионов;

разработана простая осцилляторная модель диэлектрической проницаемости расчета функции и алгоритм вычисления спектров характеристических потерь энергии электронами, при этом расход энергии на возбуждение объемного плазмона при отражении электронов больше, чем при их прохождении;

установлено, что переход материалов из кристаллического состояния в аморфное увеличивает вероятность электрон-фоонных взаимодействий, а деформация функции распределения плотности электронных состояний приводит к большей потере энергии электронами;

впервые предложена и реализована методика оценки степени аморфизации поверхностных слоев тонких свободных пленок металлов при ионной бомбардировке.

Практические результаты исследования. Ориентационные эффекты в процессах рассеяния и прохождения заряженных частиц через тонкие слои кристаллов использовались для определения местоположения, профиля распределения примесей по глубине и дефектообразования в кристаллической решетке.

Пленки меди, полученные на мелкодисперсной медной сетке, были применены для создания контактных электродов, позволяющие надежно производить коммутацию для электронного управления при эксплуатации вакуумного оборудования, улучшение надежности работы электронных устройств автоматического управления.

Полученные результаты по разработке технологии ионной имплантации практически важны при разработке тонкопленочных металл-диэлектрик-полупроводник и полупроводник-диэлектрик-полупроводник структур, применяемых в приборах электронной промышленности.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением современных аналитических спектроскопических методов и подходов физической электроники. Тщательно проанализированы условия эксперимента, использованы современные измерительные приборы с высокой точностью, тщательно обработаны результаты экспериментов статистическим путем. Результаты и выводы основаны на базовых положениях современных теоретических и экспериментальных работ, посвященных физическим механизмам взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, обеспечено с использованием комплексных методов измерений прошедших испытаний.

34

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований диссертации заключается в изучении рассеяния и прохождения заряженных частиц через тонкие слои кристаллов, по определению состава, кристаллической и электронной структуры, глубины проникновения, характер торможения, макро- и микрораспределение внедренных атомов, угловые и энергетические распределения прошедших ионов и электронов. Подобное разностороннее изучение дает возможность расширить представление о структуре и свойствах твердого тела

Практическая значимость результатов исследования заключается в том,

что предложенные научные результаты можно применять для разработки тонкопленочных металл-диэлектрик-полупроводник и полупроводник диэлектрик-полупроводниковых структур, определения степени совершенства кристалла, оценки монокристалличности тонких пленок, при оценке макро- и микрораспределений имплантированных атомов в кристаллической решетке, для экспрессного измерения толщины пленки и ее тормозной способности, а также дают возможность для улучшения качества выпускаемых промышленных материалов.

Внедрение результатов исследования.

На основе изучения ориентационных эффектов, в тонких свободных пленках меди, полученных на мелкодисперсных медных сетках, а также нанесенных на их поверхности многослойных полупроводниковых структурах:

полученные результаты по определению ориентационных эффектов при прохождении ионов через тонкие пленки кристаллов и Оже электронной эмиссии, ионной имплантации использованы АО «ФОТОН» в технологии легирования элементов при получении структур (ПДП) полупроводник диэлектрик-полупроводник, а также многослойных структур (МДП) металл диэлектрик-полупроводник (Справка №03-1297 Акционерной компании «Ўзэлтехсаноат» от 2017 года 11 июля). Применение научных результатов позволило обеспечить надежность работы электронных приборов, улучшить качество технологии получения МДП и ПДП структур.

медные контактные электроды, предназначенные для изготовления качественных надежных устройств коммутации, с электронным управлением используемых при эксплуатации вакуумных приборных устройств изготовлены в научно-техническом предприятии “PROTON” (Справка Научно-технического предприятия “PROTON” от 2016 года 09 сентября). Использование разработки позволило наладить производство автоматически управляемых электронных приборов-установок, повысить срок службы, точность и качество, а также усовершенствовать низкотемпературную вакуумную технологию.

проявление ориентационных эффектов полученных в результате бомбардировки электронами и ионами монокристаллов, механизмы потери энергии каналированных и неканалированных ионов использованы при

35

выполнении проектов: 2Ф.1.№ 01200009821 “Исследование процессов рассеяния и каналирования ионов низких и средних энергий на поверхности и в тонких слоях сложных кристаллов и образование экситонов в полупроводниках в условиях каналирования ионов” и БВ-Ф2-003 “Исследование методом машинного моделирования процессов имплантации ионов и излучательной рекомбинации фотоносителей в тонких монокристаллах и в аморфных полупроводниках” для определении механизмов энергетического распределения ориентационных эффектов (Справка ФТК- ФТК-0313/912 Комитета по координации развития науки и технологий Республики Узбекистан от 15 декабря 2016 года). Использование научных результатов позволило оценить распределение смешанных атомов в

кристалле и в монокристаллической пленке, контролировать степень совершенства и состав тонких пленок, поверхностную структуру кристаллов, улучшить качество промышленных материалов. Использование научных результатов позволило оценить распределение смешанных атомов в кристалле и в монокристаллической пленке, контролировать степень совершенства и состав тонких пленок, поверхностную структуру кристаллов, улучшить качество материалов электронной промышленности.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены, в том числе, на 13 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По материалам диссертации опубликовано 30 научных работ, из них 12 статей, в том числе 7 на английском языке, 1 монография, 17 трудов конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 205 страниц машинописного текста, включая 63 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет 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 «**Краткий обзор литературных данных по рассеянию и прохождению заряженных частиц через тонкие кристаллы в зависимости от ориентации кристалла**» проанализированы литературные данные экспериментальных и теоретических исследований, касающихся ориентационных эффектов в процессе рассеяния и прохождения заряженных

36

частиц средних и низких энергий через тонкие свободные пленки металлов и полупроводников. Анализируются особенности ориентационных зависимостей эмиссии оже-электронов, потерь энергии протонами (2-5 МэВ), ионами газов и электронами при отражении и прохождении их через тонкие свободные пленки кристаллов, а также масс-спектрометрический анализ поверхности твердых тел.

Показано, что на фоне энергетического, углового и пространственного распределения обнаруживается анизотропия потери энергии ионами и электронами, причем потери энергии становятся все меньше и меньше, когда направления заряженных частиц параллельны наиболее открытым каналам или плоскостям. Анизотропию потерь энергии протонов, прошедших параллельно различным плоскостям и осям, авторы объясняют различием

плотностей валентных электронов вдоль этих направлений простреливаемых кристаллов. Следует отметить, что ориентационные эффекты (каналирование, блокировка), в основном, исследованы для легких частиц и высоких энергий. Были исследованы дисперсии плазмонов, угловые, энергетические и ориентационные зависимости отраженных и прошедших электронов через тонкие пленки металлов и полупроводников. В результате таких исследований сложилось мнение, что основную роль в формировании структуры спектров в металлах играют особенности распределения плотности электронных состояний, находящихся по энергии выше уровня Ферми.

ВИМС является наиболее чувствительным методом изучения элементного состава поверхности, пленочных и наноразмерных структур. Показано, что переход от измерения величины пиков в спектре ВИМС к определению реальной концентрации присутствующих на поверхности элементов на самом деле достаточно сложный.

Во второй главе диссертации приведены **«Экспериментальные установки и методики исследований взаимодействия ионов и электронов с твердым телом»**. Изложены основные экспериментальные методы исследования состава, структуры и свойств поверхности кристаллов и тонких свободных пленок, при взаимодействиях ионов и электронов с твердым телом.

В лаборатории созданы и применены в исследованиях диссертационной работы следующие основные методы, обеспечивающие получение необходимой информации: ОЭС; СХПЭЭ; спектроскопия потерь энергии ионами (СПЭИ); ВИМС. Кроме того, в лаборатории разработаны методики сверхвысоковакуумного напыления, получения тонких свободных пленок металлов Cu, Al и Ag и др. и ионной бомбардировки для модификации поверхностей исследуемых образцов. Спектрометр представляет собой металлическую высоковакуумную камеру, в которую с помощью фланцев вмонтированы источники ускоренных потоков ионов и электронов. Рабочий вакуум в камере спектрометра составляет $\sim 8 \cdot 10^{-9}$ Торр, а поверхность исследуемого образца очищается термическим нагревом с помощью электронной бомбардировки с тыльной стороны мишени (образца), а в ряде

37

случаев ионным травлением. Чистота поверхности образца оценивалась по исчезновению оже-пиков углерода и кислорода в спектре оже-электронов. В качестве ионного источника выбран источник с осциллирующими электронами. Благодаря этому увеличивается длина пути электронов, и вероятность актов ионизации возрастает. При давлении рабочего газа в объеме источника $P=10^{-5}$ Торр, источник позволяет бомбардировать мишень ионами с энергией от 0,5 до 30 кэВ при максимальной плотности тока 10^{-8} А/см². Диаметр ионного пятна можно регулировать с помощью одиночной линзы в пределах 0,4-2мм в зависимости от вида решаемой задачи.

Метод ОЭС использован для определения элементного состава и микролокализации примесных, в т.ч. имплантированных атомов в кристаллической решетке твердых тел, с использованием эффекта

каналирования электронов и ионов в кристалле, а также профилей распределения примесей и их процентного содержания в изучаемых материалах. Чувствительность оже-спектрометра по обнаружению примесей составляла 10^{13} - 10^{12} атом/см²(0,1-0,01%). Энергия пучка первичных электронов варьируется в пределах 1÷5кэВ, а ионов (Ar^+ , Kr^+ или Cs^+ , K^+ , Na^+) в пределах 1÷10кэВ. Угловая расходимость пучка первичных электронов и ионов на поверхности исследуемого материала $\sim 1^\circ$.

Для проведения исследований была усовершенствована установка ВИМС на базе стандартного масс спектрометра МИ-1201 Б. Создан и налажен аналитический прибор ВИМС с достаточно большой чувствительностью (10^{-5} - 10^{-6} ат.%) и разрешающей способностью по массам ($M/\Delta M \approx 4000$). Усовершенствованный ВИМС работает в двух режимах, можно получить масс-спектрограммы положительных и отрицательных ионов.

Получение тонких свободных поли- и монокристаллических пленок металлов осуществлялось методом термического вакуумного испарения. Металлическая камера охлаждалась, и предельный вакуум $\sim 10^{-8}$ Торр. достигался при напылении. В качестве подложки применялись искусственные кристаллы каменной соли $\text{NaCl}(100)$. Нами был отработан такой режим получения пленки, при котором скорость нанесения пленки на подложку равна $\sim 20 \text{ \AA}/\text{сек.}$, что обеспечивало получение незагрязненной и качественной пленки вещества. Слой получался тем прочнее, чем выше была скорость напыления. Данными методами можно было получить пленки с толщиной от 100 до 1500 $\text{ \AA}$ с неоднородностью по толщине не более 3%, и пленки подвергались электронографическому анализу и показано, что пленки имеют монокристаллическую структуру.

В третьей главе «**Ориентационные зависимости эмиссии оже электронов и электронов с характеристическими потерями энергии при бомбардировке кристаллов ускоренными ионами и электронами**» излагаются результаты исследования ориентационных зависимостей эмиссии оже-электронов и электронов с характеристическими потерями энергии при бомбардировке кристаллов ионами и электронами. Нами проводилось сравнительное исследование эмиссии оже-электронов, при бомбардировке поли- и монокристаллов тугоплавких металлов (W, Mo, Nb) и кремния

38

пучками ионов (Ar^+ , He^+) и электронов в области начальной энергии 3-10 кэВ. Формы оже-пиков, полученные при ионной бомбардировке, существенно отличаются от оже-спектров, полученные при электронной бомбардировке. Для выяснения механизма обнаруженных явлений (расширения и смещения оже-пиков) в вольфраме при ионной бомбардировке проводилось исследование изменения формы оже-пиков в зависимости от энергии и угла падения пучка ионов. Было показано, что с увеличением энергии ионного пучка ширина оже-пиков растет, а с увеличением угла падения пучка по отношению к нормали к поверхности (грани) рост ширины оже-пиков уменьшается. Кроме того, в ионном оже спектре обнаруживаются сателлитные пики, механизмы появления, которых пока не удалось объяснить. Удвоение указанного оже-пика может быть также связано с

появлением химического соединения типа SiO или SiO₂, так как при ионной бомбардировке обычно происходит локальный нагрев поверхности, что способствует образованию химических соединений. На основе экспериментально обнаруженных явлений выдвигается предположение о том, что уширение и смещение оже-пиков атома твердого тела обусловлены процессом оже-релаксации положительно и отрицательно заряженных распыленных ионов между мишенью и детектором.

Был использован новый подход расчета величины химического сдвига по энергиям оже-пика, основанный на использовании изменения эффективного заряда атома, вступающего в химическое соединение с другим атомом второго элемента в ионный тип связи, который объяснялся на основе квантомеханического подхода. Расчет энергии оже-перехода проводился в приближении Хартри-Фока с учетом релятивистских поправок. Расчеты были проведены для усредненных термов конфигураций. Сопоставление расчетных данных с экспериментальными результатами показывает, что между ними имеется удовлетворительное согласие.

Были исследованы угловое и пространственное распределения эмиссии оже-электронов, рассеянных гранью монокристаллов Mo и W, при бомбардировке их пучком электронов. Было показано, что на фоне углового и пространственного распределения обнаруживается анизотропия, и установлено, что она обусловлена процессом дифракции неупруго (или квазиупруго) рассеянных первичных электронов на их пути из объема кристалла к поверхности. Показано, что при тех углах падения пучка электронов и азимутальных углах поворота кристалла, при которых направление пучка первичных электронов совпадает с низкоиндексными осями кристалла, интенсивности оже-пиков атомов кристалла резко возрастают.

На основе полученных результатов и их интерпретации можно заключить, что резкое увеличение интенсивностей оже-пиков углерода и кислорода в данных направлениях (рис.1) обусловлено большой концентрацией атомов кислорода и углерода вдоль направлений $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ в октаэдрических позициях с координатами $(1/2, 1/2, 0)$. В процессе исследования выявлены сателлитные (дополнительные) оже-пики у

39

основных низкоэнергетических оже-пиков Mo и W. Тщательное исследование изменения интенсивностей этих сателлитных пиков в зависимости от состояния поверхности Mo и W, например, при ухудшении вакуума в камере измерения показало, что эти пики связаны с окислением части атомов Mo в виде MoO, MoO₂ и W-WO, WO₂. Используя метод численного расчета с помощью выражения (1):

$$\frac{I_{\text{Mo}}}{I_{\text{MoO}}} = \frac{Z_{\text{Mo}}}{Z_{\text{MoO}}} \left(\frac{f_{\text{Mo}}}{f_{\text{MoO}}} \right)^2 \left(\frac{S_{\text{Mo}}}{S_{\text{MoO}}} \right)^2$$

$E, (1)$

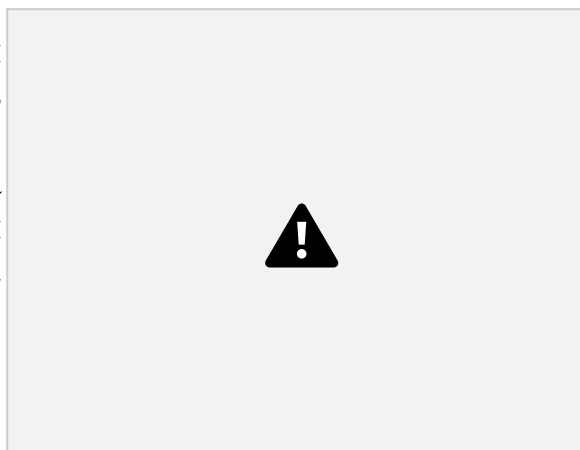
хим MoO
Mo 1

()

${}^nZ Mo MoO$
"

и табличные данные об эффективных зарядах атомов и их изменении при вступлении в химическую связь с преобладанием ионного типа соединения определены химические сдвиги оже-пика Mo с энергией 27 эВ.

Проводилось сравнительное исследование оже-спектров, полученных при бомбардировке монокристалла Al ионами и электронами. Определено



уменьшение интенсивности и расширение основного оже-пика, а также появление дополнительного оже-пика. Основные причины удвоения оже-пиков заключаются в

том, что область

Рис.1. Кривые зависимости относительных интенсивностей оже-электронов С и О от угла падения пучка первичных электронов ϕ для молибдена

бомбардировки ионами на мишени сильно нагревается и атомы кислорода диффундируют из объема, а в результате кислород, соединяясь с основными атомами решетки, создает различные оксиды (AlO , Al_2O). Обнаружено, что изменение интенсивности оже-пика зависит от угла падения первичных ионов. Кроме того, определено, что энергия основного оже-пика отличается от энергии дополнительного оже-пика, появившегося в области энергии на 4-5 эВ меньшей.

Изучались состав неконтролируемых примесей, их химические состояния и профили распределения на границе раздела полупроводник-диэлектрик, полупроводник-металл методами ЭОС и ВИМС ($CdS-Ni$, $Si-Ni$, $Si-Al$, $Si-SiO_2$). Для выяснения состава неконтролируемых примесных элементов на границе раздела $CdS-Ni$ были получены профили распределения элементов (C, O, Na) по глубине, начиная от поверхности никеля до определенного слоя подложки полупроводника CdS (рис. 2), и показано, что их концентрации резко возрастают на границе раздела полупроводник-металл. Это, по видимому, обусловлено тем, что на этой границе раздела из-за несоответствия кристаллической решетки полупроводника с кристаллической решеткой металла появляются различного рода дефекты, которые, в свою очередь, являются источниками захвата атомов примесных элементов (C, O, Na), присутствующих в объеме

SiO₂. Было установлено, что в спектре оже-электронов, полученного для поверхности границы раздела Si – SiO₂, обнаруживаются сдвиги всех оже-пигов в сторону больших энергий, а в ряде случаев – меньших энергий. Анализ характера сдвигов оже-пигов в спектре изменения их величины позволил установить, что это явление связано с эффектом зарядки на поверхности границы раздела полупроводник-диэлектрик. Выяснено, что зарядка поверхности этой границы раздела, может быть различной, т.е. положительной или отрицательной в зависимости от условий получения плёнки SiO₂. Установлено,

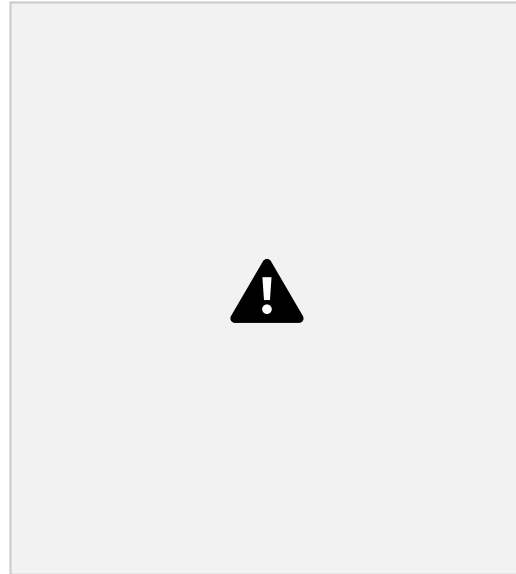


Рис.2. Кривые профилей распределения концентрации примесей С, О и Na по глубине структуры CdS-Ni, начиная от поверхности пленки Ni толщиной 1мкм

если на поверхности границы раздела больше атомов примесей с высоким значением отрицательного электронного сродства, например кислород, хлор и др., то эта граница заряжается отрицательно; а если на границе, наоборот, больше примесей с электроположительным сродством к электрону, например Na, K и др., то поверхность границы заряжается положительно.

Исследовались дисперсионные зависимости ХПЭЭ при отражении электронов от поверхности Mo и Nb. В спектрах обнаруживается ряд пиков с дискретными потерями энергии (табл.1). Наличие в спектрах ХПЭ максимумов междузонного происхождения привело к тому, что для описания структуры спектров ХПЭ необходимо использовать представление о диэлектрической проницаемости (ДП) исследуемых материалов:

× × ×

$$(\epsilon_1, \epsilon_2)(\hbar k, \hbar \omega)_{12} k k i k$$

, (2)

где, ϵ_1 -действительная и ϵ_2 -мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости, $\hbar k$ и $\hbar \omega$ импульс и энергия, передаваемая твердому телу в результате неупругого рассеяния первичных электронов с возбуждением электронного газа металла. ДП наиболее полно описывает спектр ХПЭ, т.к. она содержит определенную информацию о спектре электронных возбуждений и хорошо описывает отклик исследуемого материала на электромагнитное воздействие. Электроны переходных металлов в значительной степени локализованы вблизи узлов ионной решетки. Учитывая это, нами предложен метод, исходя из основных особенностей зонной структуры, как дальнейшее развитие и совершенствование расчета спектров ХПЭ с помощью осцилляторной модели ДП.

Таблица 1.

Характеристические потери энергии на плазмонах Mo и Nb.

Элемент	ΔE_i – потери энергии, эВ				
	$\hbar\omega_p(5s)$	$\hbar\omega_{pv}$	d-f	$2\hbar\omega_{pv}$	
Mo	11,7	23,2	36	48,3	70,4
Nb	11,3	18,5		37	56

Анализ показывает, что в кристаллах Mo, W и Nb электронные переходы связаны, с оболочками (nd)-(mf), (np)-(md), что также подтверждает и вид спектров ХПЭ в интервале от 10 эВ до 50 эВ, полученных в опытах с геометрией на отражение электронов.

В четвертой главе диссертации «**Исследование ориентационных зависимостей потери энергии ионами при прохождении их через твердое тело различной модификации**» приведены результаты экспериментов по исследованию ориентационных зависимостей энергетического и углового распределения, при прохождении и каналировании ионов средних энергий в тонких свободных поли- и монокристаллических пленках металлов. Получены полярные диаграммы углового распределения прошедших ионов. Увеличение угла падения приводит к удлинению пути движения ионов в пленке, что неизбежно увеличивает вероятность повторных столкновений и, соответственно, рассеяния ионов на большие углы. Можно полагать, что влияние на этот эффект увеличения угла падения пучка ионов, является аналогичным увеличению толщины пленки. Результаты исследования показывают, что в формировании вида (формы) углового распределения важную роль играет изменение доли ионов, испытавших многократные столкновения. Увеличение их, приводит к некоторой изотропизации распределения прошедших ионов по всем направлениям вдоль полярного угла рассеяния Q .

Исследована серия кривых энергетического распределения ионов Na^+ с различной начальной энергией E_0 , прошедших через тонкую свободную пленку Cu  толщиной 180 Å. Энергетические распределения представляют собой несимметричные кривые с максимумами, локализованными в области больших энергий, и с низкоэнергетическим “хвостом”, уменьшающимся с ростом E_0 . Наличие достаточно продолжительного “хвоста”, простирающегося в низкоэнергетическую область распределения, и линейный характер смещения энергетического положения максимума распределения, с ростом начальной энергии ионов показывает, что основным процессом, обуславливающим торможение при прохождении ионов через пленку Cu являются как упругое, так и неупругое взаимодействие их с атомами мишени. С увеличением начальной энергии ионов максимум

энергетического распределения смещается в сторону больших энергий пропорционально E_0 . В случае прострела медной пленки такой же толщины

42

ионами K^+ в энергетическом спектре прошедших ионов низкоэнергетический “хвост” проявляется более ярко.

На основе этих данных были построены зависимости потерь энергии ионами ΔE от начальной энергии пучка E_0 . Показано, что значение ΔE с ростом E_0 от 10 до 40 кэВ как для ионов Na^+ , так и для ионов K^+ линейно растет, что свидетельствует об участии процессов упругих и неупругих торможений ионов в общей потере энергии. Экспериментально полученные результаты по исследованию энергетических распределений в зависимости

от энергии, сорта бомбардирующих ионов и толщины пленки дают возможность сделать

следующий вывод:

при низких E_0 значение $\Delta E/E$ больше чем

при высоких E_0 , то есть, при низких E_0

относительные потери больше чем, в

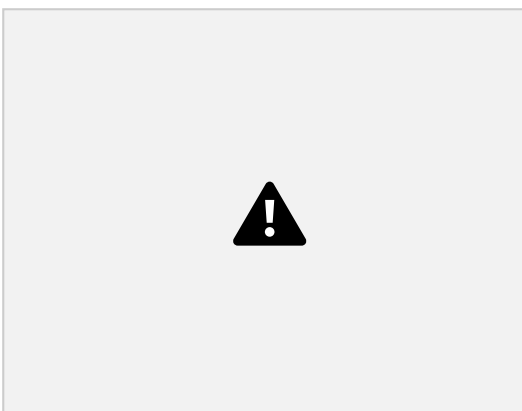
случае высоких E_0 . Это обусловлено тем, что при низких E_0 , длина волны иона λ больше. При 20кэВ, $\lambda \sim 5-6 \text{ \AA}$, а при 40кэВ $\lambda \sim 2-3 \text{ \AA}$. В случае поликристалла эффект каналирования не осуществляется, и

ионы на своем пути могут отклоняться на большие углы и, следовательно, упругие потери будут резко возрастать. При исследовании процесса прохождения ионов через тонкие пленки представляет интерес

изучение

$E_0=20 \text{ кэВ}$, $x=200 \text{ \AA}$; 1- $\varphi=0^\circ$; 2- $\varphi=30^\circ$; 3- $\varphi=45^\circ$; 4- $\varphi=60^\circ$

Рис.3. Кривые энергетических распределений ионов Na^+ прошедших через пленку Cu, в зависимости от угла падения φ



влияния ориентации кристаллической решетки мишени на величину потери энергии ионами и на механизм их взаимодействия с атомами мишени. На рис.3. представлена серия кривых энергетических распределений ионов Na^+ , прошедших через тонкую пленку Cu(100) толщиной $x \approx 200 \text{ \AA}$, полученных при различных углах падения ионов φ (1- 0° , 2- 30° , 3- 45° , 4- 60°), с энергией $E_0=20 \text{ кэВ}$. Видно, что с увеличением угла падения максимумы энергетического распределения смещаются в сторону меньших энергий, причем смещение максимумов по шкале энергии увеличивается с ростом угла φ нелинейно.

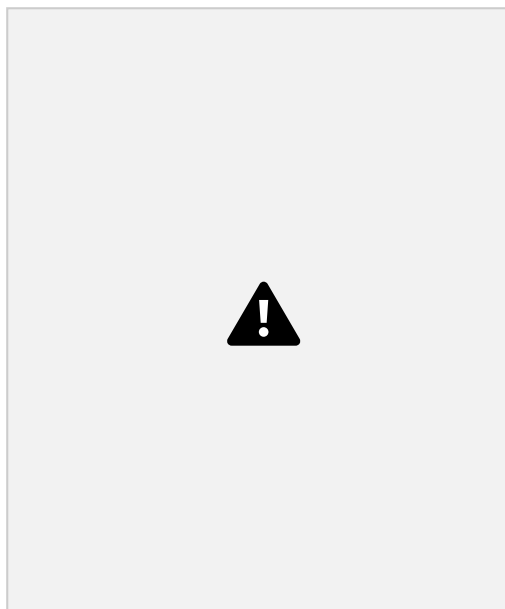
Аналогичные результаты были получены и при исследовании угловой

зависимости энергетических распределений ионов K^+ и Rb^+ , прошедших через тонкие пленки меди Cu . Следует отметить, что при переходе от ионов Na^+ и K^+ к более тяжелым ионам Rb^+ и Cs^+ форма энергетического распределения претерпевает резкое изменение. В этих случаях энергетический спектр ионов весьма широкий, и его низкоэнергетическая область простирается почти до самых малых энергий. Кроме того, в случае тяжелых ионов Cs^+ смещение максимума энергетического распределения с ростом угла ϕ происходит очень резко, и при углах $\phi > 70^\circ$ энергетическое распределение исчезает, что свидетельствует о прекращении прохождения тяжелых ионов через пленку вследствие увеличения эффективной толщины

43

простреливаемой пленки под большим углом по отношению к пучку первичных ионов.

Подобное исследование при достаточно малых сечениях пучка ионов, по сравнению с толщиной пленки, позволяет определить зависимость потери энергии от толщины пленки непосредственно в одном опыте, а также это дает возможность быстро определить тормозную способность вещества для различных толщин. На рис. 4.



приведены энергетические распределения ионов Na^+ , K^+ и Ar^+ , прошедших через тонкие пленки меди. Видно, что в этих спектрах четко обнаруживаются три максимума. I-ый – главный высокоэнергетичный максимум

распределения, обусловлен эффектом осевого каналирования ионов Na^+ вдоль направления $[100]$ кристалла Cu . II-ой – максимум энергетического распределения, обусловлен ионами, испытывавшими плоскостное

каналирование, и III-ий –

$x=450\text{\AA}$; ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_3 – потери энергии соответственно пикам I, II, III

Рис. 4. Энергетическое распределение ионов Na^+ , K^+ и Ar^+ , прошедших через пленку $Cu(100)$

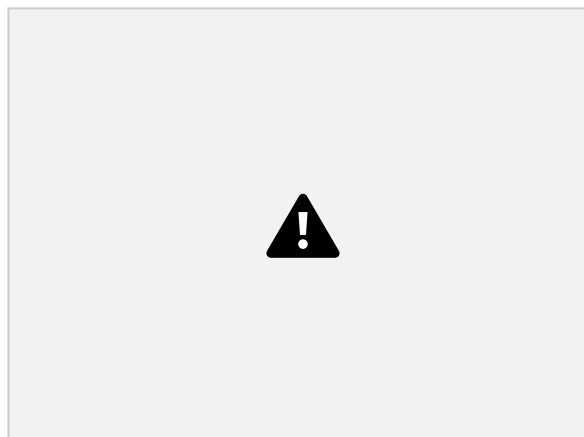
максимум энергетического распределения (с наибольшими потерями энергии) связан с ионами, прошедшими монокристаллическую пленку беспорядочным образом, без выраженного каналирования.

Сравнение этих спектров, полученных в одинаковых условиях, показывает, что при переходе от Na^+ к K^+ и Ar^+ положения всех трех максимумов смещаются в сторону больших потерь энергии, происходит некоторое увеличение их ширины, а также наблюдается увеличение интенсивности третьего максимума относительно первого и второго максимумов. Следовательно, можно полагать, что увеличение массы бомбардирующих ионов приводит к увеличению всех видов потери энергии и к увеличению числа неканализованных ионов. Наблюдаемые эффекты объясняются отличием ионных радиусов K^+ и Ar^+ . Так, радиус иона аргона ($r_{\text{Ar}}=1,88\text{\AA}$) значительно больше чем радиус иона K^+ ($r_{\text{K}}=1,33\text{\AA}$). Аналогичные эффекты наблюдались и в случае бомбардировки пленок ионами Rb^+ ($r_{\text{Rb}}=1,48\text{\AA}$) и Kr^+ ($r_{\text{Kr}}\approx 2\text{\AA}$).

Изучены пространственные распределения ионов (K^+ , Na^+) прошедших через тонкие монокристаллические пленки Cu и Ag с толщиной от 180 до 600 $\text{\AA}$. Получены полярные диаграммы углового распределения и на них наблюдаются четко выраженные максимумы, соответствующие кристаллографическим направлениям [100], [130], [120], [110]. Результаты эксперимента по прохождению ионов через тонкие слои кристаллов подтверждают, что увеличение энергии пучка первичных ионов и

44

уменьшение массы иона приводят к прохождению ионного пучка увеличивается. уменьшению величины критического угла разупорядочения поверхности угла каналирования. Показано, что ориентационные эффекты наиболее ярко проявляются в случае прохождения сравнительно тяжелых ионов средних энергий через тонкие пленки и по кривым пространственных распределений можно судить о степени совершенства структуры тонких пленок. Показано, что интенсивность пиков обусловленных каналированными частицами с ростом степени разупорядочения поверхности монотонно уменьшается, а интенсивность пика беспорядочного



Ar^+ - кривой 1; K^+ - кривой 2

Рис.5. Влияние предварительной бомбардировки ионами Ar^+ и K^+ на интенсивность пика ΔE_1 ионов Ar^+ , прошедших через пленку $\text{Cu}(100)$

осуществлялось путем её бомбардировки ионами K^+ и Ar^+ с энергией $E_0=3\text{кэВ}$ и разной дозой (10^{13} - $5\cdot 10^{15}\text{см}^{-2}$). На рис.5 приведено изменение интенсивности максимума ΔE_1 ионов Ar^+ ($E_0=18\text{кэВ}$), прошедших через пленки подвергнутые ионной-бомбардировкой. Видно, что независимо от типа ионов, существенное уменьшение интенсивности пика “канализованных” ионов наблюдается в области дозы $D\approx 10^{14}$ - 10^{15}см^{-2} . При

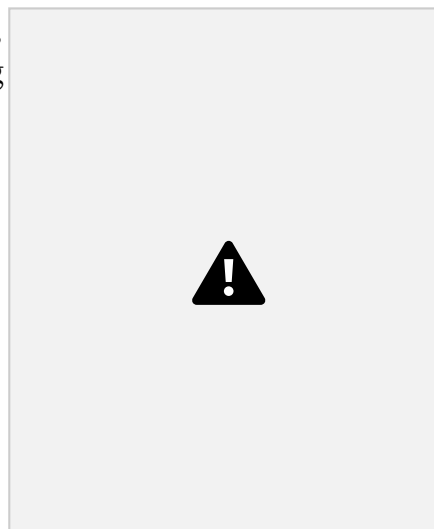
$D \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ скорость уменьшения $I_1(D)$ в случае бомбардировки ионами Ar^+ значительно больше, чем в случае ионов K^+ , а в области $D \geq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ – наоборот.

Наблюдаемые изменения интенсивности пика ΔE_1 при $D \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ объясняются отличием радиусов бомбардирующих ионов ($r_{\text{Ar}} > r_{\text{K}}$). Результаты оже-электронной спектроскопии показали, что в области $D \geq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ – значительная часть ионов щелочных металлов (в частности K^+) внедряется в приповерхностную область монокристалла и частично образует интерметаллическое соединение. При ионной бомбардировке пленки сначала ($D = 10^{14} \text{ см}^{-2}$) появляются отдельные аморфизированные участки (кластерные фазы), затем с ростом дозы облучения размеры этих фаз увеличиваются и начиная с $D \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$ происходит перекрывание границ отдельных островков. Поэтому на основе кривой $I_1(D)$ можно оценить площадь разупорядоченной поверхности монокристалла. Полная аморфизация поверхности происходит при дозах больших $D \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Также проведено теоретическое исследование тормозной способности изучаемых материалов. Для тормозной способности вещества, применено аналитическое выражение, полученное из статистического подхода, который позволяет описывать ход потерь энергии ионами без применений метода “сшивания” в области низких и больших скоростях падающих частиц.

45

В пятой главе диссертации «**Особенности ориентационных зависимостей потери энергии электронами при отражении и прохождении их через тонкие свободные пленки металлов**» описаны результаты исследований ориентационных зависимостей потери энергии электронами при отражении и их прохождении через тонкие свободные пленки металлов. Тщательно исследованы спектры ХПЭЭ, полученные для пленок Cu и Ag толщиной $420\text{-}500 \text{ \AA}$, с ориентацией $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. Энергия первичных электронов находилась в интервале $2\text{-}10 \text{ кэВ}$. На рис.6 представлен спектр ХПЭЭ, прошедших через монокристаллическую пленку $\text{Cu}(100)$ толщиной $420 \text{ \AA}$. Видно, что в спектре ХПЭЭ обнаруживается ряд максимумов с потерями энергии. Полученные результаты приведены в таблице 2.



При изучении угловой зависимости энергии объемного плазмона, с ростом ϕ

наблюдается некоторое увеличение потери

энергии $\Delta E_2=9,8$ эВ, обусловленной

возбуждению объемных плазменных $\varphi=0^0, 20^0, 45^0$ и 60^0

колебаний валентных электронов.

$d=420\text{\AA}$; $E_0=6,2$ кэВ

Можно полагать, что увеличение ΔE_2

связана с увеличением плотности

валентных электронов при

определенном увеличении угла

рассеяния. При углах падения пучка

Рис.6. Энергетический спектр ХПЭ электронов, прошедших через монокристаллическую пленку меди Cu(100)

относительно нормали к поверхности наблюдаются дисперсия пучка и некоторый сдвиг энергетического положения максимума, соответствующего $\hbar\omega_v$. Обнаруженный сдвиг максимума $\hbar\omega_v$ при $\varphi=60^0$ происходит в сторону больших энергий потерь, и составляют $\sim 1,5-2,0$ эВ. Получены энергетические спектры электронов, отраженных от поверхности пленок Ag(100) и Cu (100)

Таблица 2.

Экспериментально и теоретически полученные потери энергии электронами при их прохождении через тонкие пленки Cu.

Потери энергии, эВ	 E_1	 E_2	 E_3	 E_4	 E_5
Эксп.	7,2	9,8	15,3	19,2	26
Теор.	7,57	10,7	-	21,4	-
Природа потери	пов. плазмон $\hbar\omega_s$	объем. плазм $\hbar\omega_v$	Между зон. переход	Межд у зон. переход	Между зон. переход

46

(начальная энергия пучка электронов – 600 эВ, угол падения пучка на поверхность – $\varphi=50^0$). В спектрах обнаруживается ряд максимумов с различными дискретными потерями энергий. Анализ зонной структуры кристаллов Cu и Ag показывает, что энергетические потери обусловлены возбуждением коллективных поверхностных и объемных колебаний электронов проводимости, междузонными, внутризонными переходами и хорошо соответствуют теоретическим расчетам. Для описания структуры спектров ХПЭ электронов, отраженных от поверхностей благородных металлов (Cu, Ag), использовался метод, опирающийся в основном на существующие особенности зонной структуры благородных металлов, хорошо интерпретирующий спектры ХПЭ для этих металлов. В данном методе с экспериментальным спектром ХПЭ сопоставляется величина:

$$^{11} N(E) A \text{Im} [()] B \text{Im} [() 1] , (3)$$

где $A(\varphi, E_p)$ и $B(\varphi, E_p)$ константы, зависящие от угла падения φ и энергии первичных электронов E_p .

Эти константы являются весовыми множителями, описывающие вклад объемной и поверхностной функции потерь энергии. Весовые множители A и B подбирались эмпирически до получения наилучшего согласия с экспериментальными данными. Для вычисления величины $\varepsilon(\omega)$ была использована осцилляторная модель ДП. В результате проведенного численного моделирования удалось выявить электронные переходы, ответственные за появление максимумов в спектре ХПЭ электронов, отраженных от поверхности пленки Cu и Ag .

Исследуя потери энергии электронами на отражение была обнаружена, как и в случае прохождения на прострел, дисперсия потери энергии на возбуждение объёмного плазмона, изменяя полярный и азимутальный угол поворота плёнки Cu (100). Анализ экспериментальных результатов, полученных при исследовании зависимости спектров ХПЭ от кристаллической структуры монокристаллических пленок показал, что уменьшение значения потери связанной с $\hbar\omega_v$, в основном обусловлено малой плотностью валентных электронов вдоль осей каналов и плоскостей. Впервые по изменению интенсивности упругого пика электронов, прошедших через свободные тонкие пленки $\text{Cu}(100)$ была оценена степень аморфизации поверхности и площадь разупорядоченного слоя. Аморфизация приповерхностного слоя будет способствовать увеличению концентрации валентных электронов участвующих в возбуждении объёмных плазменных колебаний. При ионной бомбардировке поверхности появляется дополнительный пик ХПЭЭ, обусловленный объёмным плазмоном и связанный с аморфизацией поверхности. Интенсивность обнаруженного пика зависит от дозы облучения. Значение $\hbar\omega_v$ аморфной пленки на 1-2 эВ больше,

47

чем для монокристаллической пленки, находящейся в условиях реализации эффекта каналирования электронов.

Теоретически рассмотрена дисперсия плазменных колебаний в металлических (Cu , Ag) и в полупроводниковых (Si , Ge) кристаллах. Влияние типа атомов на дисперсию плазменных колебаний учитывается атомным форм фактором, а тип кристаллической структуры, соответственно – структурным фактором. Масса электрона в кристалле отличается от массы свободного электрона, и он обладает так называемой эффективной массой. Расчеты по определению эффективной массы электрона вдоль различных направлений и значение этой массы, приведенные в научной литературе, показали, что она изменяется в зависимости от направления оси первичного пучка к поверхности. Поэтому анизотропию потери энергии электронов на возбуждение плазменных колебаний валентных электронов кристалла можно связать с эффективной массой электрона. По-видимому, это связано с

пренебрежением реально имеющего место взаимодействия электронов с потенциальным полем кристалла, структурный фактор которого влияет на плотность электронов соответствующих кристаллографических направлений и плоскостей. Исходя из этого, следует, что учет данных факторов дает возможность объяснить наличие ориентационной зависимости потери энергии на возбуждение плазменных колебаний валентных электронов кристалла. Получено соотношение позволяющее определить ДП с использованием неупругих ПЭЭ, определен критерий коррелированности дисперсионных кривых, полученных квантомеханическим способом и с использованием спектров ХПЭЭ в Cu, Ag, Si и Ge.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов изучения ориентационных эффектов полученных в результате бомбардировки электронами и ионами тонких пленок поли- и монокристаллов сделаны следующие выводы:

1. Усовершенствованы экспериментальные установки и методов исследований: сверхвысоковакуумный универсальный электронный и ионный малоугловой спектрометр, вторично-ионный масс-спектрометр, установки для получения тонких свободных пленок металлов.

2. На основе сравнительного анализа Оже-спектров, полученных при ионной и электронной бомбардировке монокристаллов W, Si и Al впервые обнаружено раздвоение основного $L_{2,3}VV$ пика в ионных оже спектрах Al и Si, которое объясняется образованием окислов при локальном нагреве отдельных участков поверхности под действием бомбардирующих ионов.

48

3. Впервые с использованием ориентационных и угловых зависимостей Оже-спектров определены местоположения атомов примесных элементов O, C в кристаллической решетке монокристаллов, которые образуют соединения типа MoO , MoO_2 , WO , WO_2 в октаэдрических позициях $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, 0.

4. Развита теория плазменных возбуждений и установлено, что в переходных металлах структура спектров характеристических потерь энергии электронами обусловлена не только плазменным возбуждением валентных электронов, но и особенностью зонной структуры, связанных с электронными межзонными переходами вида $d-p$ и $d-f$, внутризонными переходами типа $d-d$, а также обнаружена анизотропия потерь энергии электронами, прошедшими через монокристаллические пленки Cu и Ag в зависимости от ориентации кристалла.

5. В энергетическом спектре ионов ($E_0=10-30$ кэВ), прошедших через тонкие монокристаллические пленки меди обнаружены три четко выраженных максимума, которые объясняются эффектами осевого и плоскостного каналирования, а также беспорядочным прохождением ионов через кристалл,

установлена взаимосвязь между структурой кристалла и структурой углового и энергетического распределений прошедших ионов.

6. Установлено, что при одинаковых условиях бомбардировки разупорядочение поверхности зависит не только от концентрации внедренной примеси, но от массы, энергии и радиуса ионов, а также определена зависимость потери энергии каналированных и неканалированных ионов от массы, энергии и радиуса бомбардирующих ионов, что важно для идентификации столкновительных процессов частиц вблизи поверхности.

7. Для описания структуры спектров характеристических потерь энергии предложен преобразованный вариант осцилляторной модели диэлектрической проницаемости, а также критерий коррелированности дисперсионных кривых, полученных квантомеханическим способом и с использованием спектров Cu, Ag, Si и Ge.

8. Обнаружено, что энергия возбуждения объемных плазмонных потерь электронов прошедших через и отраженных от поверхности свободных тонких пленок отличается на 1–1,5 эВ, что обусловлено особенностями процессов возбуждения в различных геометриях опыта, определена значение $\hbar\omega_{pv}$ аморфизированной пленки на 1–2 эВ больше, чем для монокристаллической пленки, находящейся в условиях реализации эффекта каналирования электронов.

9. Впервые по изменению интенсивности упругого пика электронов, прошедших через тонкие пленки Cu(100), оценена степень аморфизации поверхности и площадь разупорядоченного слоя, в частности

49

при $E_0=0.5$ кэВ и $D=10^{15}$ см⁻² происходит разупорядочение 35–40% облученной ионами поверхности, при этом толщина разупорядоченного слоя составляет 60–80Å.

ISAKHANOV ZINAOBIDIN ABILPEYZOVICH

**ORIENTATION EFFECTS IN PROCESSES OF SCATTERING AND
TRANSMISSION OF IONS AND ELECTRONS THROUGH THIN
CRYSTALS**

01.04.04- Physical electronics

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

TASHKENT – 2017

51

The theme of the doctoral dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.1. DSc/FM48

The doctoral dissertation has been carried out 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 website of Scientific council (<http://fti-kengash.uz/>) and on Information and educational portal “ZiyoNet” (<http://www.ziynet.uz/>).

Scientific consultant: Umirzakov Baltokhodja Ermatovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: Turaev Nazar Yuldashevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

Egamberdiev Bachrom Egamberdievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Kutliiev Uchkun Otoboevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: National University of Uzbekistan

Defense will take place «___» _____ 2017 at _____ at the meeting of Scientific council number DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 at Physicotechnical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent city, 2b, Bodomzor yoli str., Phone: (99871) 235-42-91, e-mail: lulp@uzsci.net, Meeting Room of Physicotechnical Institute).

Doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physicotechnical Institute (is registered №_____). Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent city, 2b, Bodomzor yoli str., Phone: (99871) 235-42-91.

Abstract of dissertation sent out on «___» _____ 2017.

(mailing report № _____ on «___» _____ 2017).

S.L.Lutpullaev

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

A.V.Karimov

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

S.A.Bakhramov

Chairman of scientific Seminar under Scientific
council on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. Improvement in a technology of producing the solid nanofilms, reduction of defects in them and perfection of qualitative parameters of the nanofilms are of great significance. In this respect, purposeful scientific studies, including scientific search in the following directions are important problems: modernization of setups to produce thin films, theoretical simulation of practical results in chemical bonds, creation of a crystal lattice model

in the presence of impurity atoms of oxygen and carbon formed under thermal treatment of molybdenum and tungsten, practical application of the dispersion spectra of electron energy loss under reflection from thin free films of copper and silver and transmission through them. The scientific search in the above indicated directions justifies topicality and relevance of the subject of the dissertation.

Conformity of the research with the main priorities of development of science and technologies in the country. The dissertation work has been carried out in accordance with the priority directions of science and technology development in the Republic of Uzbekistan: II– «Power engineering, energy- and resource-saving» and III– «Development and application of renewable energy sources».

Review of international scientific research on the dissertation theme. The scientific and practical search in studies of the processes of scattering of charged particles by surface and their transmission through thin films are carried on by research centers and universities, particularly Stanford/NASA Aims “United institute of surface and microstructural studies” (USA), Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, St.-Petersburg State Technical University (Russia), Chernovtsy National University (Ukraine), Tokio University (Japan), Institute of Nuclear studies (Germany), Zurich Polytechnical University (Switzerland), Tashkent State Technical University (Uzbekistan).

Problem development status. Until now the places of impurity atom localization on surface, chemical bonds between atoms of impurity and matrix, influence of disordering (amorphisation) of surface layers under ion bombardment on the energy distribution of electrons transmitted through free thin films of metals have not been almost studied. In this respect, these studies are topical and actual and have great scientific-practical significance.

Relevance of the dissertation research to the plans of scientific-research works. The dissertation work has been performed according to the plans of the scientific-research works plan of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies in the framework of the RU State Research and Development Programs.

The goal of the research is to study the orientation effects occurring in the process of charged particle interaction with crystals of diverse nature, places of impurity atom localization and development of methods of surface diagnostics.

Tasks of research work study of impurity atom localization in a surface layer of single crystalline Mo(100) and W(100); estimation of a type of formed compounds and a type of crystalline lattice by analyzing the angular dependences

53

of the Auger-spectra; development of a model of the crystalline lattice in the absence of impurity atoms of O and C formed under thermal treatment of Mo and W;

- investigation of the angular and energy distributions of ions transmitted through thin poly- and single-crystalline films;
- investigation of the spatial distribution of ions and electrons transmitted through thin films of Cu and Ag with disordering surfaces depending on beam energy and incidence angle and on azimuth angle of sample rotation;
- development of theoretical methods and models of analysis on the basis of

investigation of the dispersion EELS spectra under reflection and transmission of electrons through thin films of Cu and Ag and under reflection from the surface of Mo, Nb, Si and Ge with different crystallographic directions.

The objects of the research are poly- and single-crystalline samples of W, Mo, Nb, Cu, Ag, Al metals, Si and Ge semiconductors, SiO₂ insulators, thin-film systems of Ni/CdS, Ni/Si, Al/Si, SiO₂/Si, free thin poly- and single-crystalline films of Cu and Ag.

The subject of the research is the orientation effects occurring in the processes of charged particle interaction with crystals, as well as the mechanisms of crystalline lattice amorphization and the physical processes in the nanofilms of charged particles.

The methods of the research. In the dissertation work the following methods were used: spectroscopy of ion energy losses under reflection and transmission through thin metal films; Auger-electron spectroscopy (AES); spectroscopy of characteristic losses of electron energy and secondary-ionic mass spectrometry (SIMS).

The scientific novelty of the research consists of the following: ● for the first time, the formation of additional Auger peaks near the lines $L_{2,3}VV$ has been found in the ion Auger spectra of well purified single crystals Mo, W, Si, Cu and Al, which can be explained by partial formation of their oxides; ● an octahedral position of the oxygen and carbon atoms located at the crystalline lattice internodes in the near-surface layers Mo(100) and W(100) has been established;

● a thin structure of the energy distribution caused by a simultaneous contribution of the ions experienced axial, plane channeling and chaotic transmission through single crystalline free films of Cu and Ag has been found within the energy range of ion beams $E_0=5-40$ keV;

● a dependence of ion energy loss under channeling through single-crystalline nano-films on polar and azimuthal angle has been defined; these losses are 3-4 times less than in the case of polycrystal;

● a simple oscillation model of dielectric penetrability and an algorithm of EELS spectrum calculation have been proposed; it has been established that the energy losses to excite a bulk plasmon is more in reflection than that in transmission;

54

● for the first time, a technique of estimating an amorphization degree of the surface layers of thin free films of metals under ion bombardment has been proposed and realized.

Practical results of the research. The orientation effects in the processes of scattering and transmission of charged particles through thin layers of crystals have been used to define a place of location, a profile of the impurity distribution in depth and defect formation in a crystal lattice.

The copper films produced with a thin-dispersive mesh of copper have been used to create contact electrodes allowing reliable commutation for electronic control of vacuum equipment and enhancement of reliable operation of electronic

devices of automatic control.

Reliability of the research results is proved by modern analytical spectroscopic methods and approaches of physical electronics. The experimental conditions have been carefully analyzed, the modern measuring devices with high accuracy have been used and the experimental results have been carefully processed by statistical methods.

Scientific and practical values of the research results. The scientific significance of the dissertation results lies in studying scattering and transmission of charged particles through thin layers of crystals, composition, crystalline and electronic structure, penetration depth, deceleration character, macro- and micro distributions of implanted atoms, angular and energy distributions of ions and electrons. The practical significance of the dissertation results is that the results obtained can be used for development of thin-film metal-dielectric-semiconductor and semiconductor-dielectric-semiconductor structures, definition of crystal perfection, estimation of single crystalinity of thin films and macro- and micro distributions of implanted atoms in a crystalline lattice.

Application of the research results. On the basis of the study of orientation effects, in thin free copper films obtained on fine-dispersed copper grids, as well as multilayer semiconductor structures deposited on their surfaces:

the results obtained to determine the orientation effects during the passage of ions through thin films of crystals and Auger electron emission and ion implantation were used by FOTON JSC in the technology of alloying elements in the preparation of semiconductor-dielectric-semiconductor structures and multilayer structures of metal- dielectric-semiconductor (Reference No. 03-1297 of the Joint-Stock Company "Uzeltexsanoat" from 2017 on July 11). Application of scientific results allowed to ensure the reliability of electronic devices, to improve the quality of technology for obtaining MIS and SIS structures;

copper contact electrodes intended for the manufacture of high-quality reliable switching devices with electronic control used in the operation of vacuum instrumentation devices are made in the scientific and technical enterprise PROTON (Reference of the Scientific and Technical Enterprise PROTON from 2016 September 09). Using the development, it was possible to establish the production of automatically controlled electronic devices-installations, to increase the service life, accuracy and quality, and also to improve low-temperature vacuum technology;

55

the manifestation of the orientational effects of single crystals produced as a result of bombardment of electrons and ions, the mechanisms of energy loss of channeled and non-channeled ions were used in the implementation of projects: 2F.1.№ 01200009821 "Investigation of the processes of scattering and channeling of ions of low and medium energies on the surface and in thin layers of complex crystals and formation of excitons in semiconductors under conditions of ion channeling" and BV-F2-003" A study by the computer simulation method of ion implantation and radiative recombination photocarriers in thin single-crystal and amorphous semiconductors" for determining the energy distribution of the orientation effects mechanisms (FAQ FTK- FTC-0313/912 Committee for Coordination of Science and Technology of the Republic of Uzbekistan from

December 15, 2016). The use of scientific results allowed estimating the distribution of mixed atoms in a crystal and in a single-crystal film, controlling the degree of perfection and composition of thin films, the surface structure of crystals, and improving the quality of industrial materials.

Approbation of the research results. Results of the research work have been discussed at 13 international and 4 republican scientific and practical conferences.

Publication of the results. The main results of the dissertation are published in 12 research papers, of them 12 papers including 7 papers are in English language, 1 book (monograph), and 17 conference Proceedings. **Volume and structure of the dissertation.** The dissertation consists of Introduction, five Chapters, Conclusion, List of 209 references, The total number of the pages is 205.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Монография: Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е. Ориентационные эффекты в спектроскопии рассеяния и прохождения электронов и ионов через тонкие кристаллы. Ташкент “MERIYUS” 2014, - 210 стр.
2. Алиев А.А., Худайбердиев С, Исаханов З.А. Экспериментальное и теоретическое исследование спектров характеристических потерь энергии электронов, рассеянных поверхностью переходных металлов // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2000. -Т. 2, - № 4, - С. 331 – 338. [01.00.00; № 5]
3. Алиев А.А., Рузибаева М.К. , Исаханов З.А. Сравнительное

- исследование спектров характеристических потерь энергии электронов, при отражении от поверхностей некоторых металлов и полупроводников в различных состояниях // Поверхность. Москва, 2000. - № 4, - С. 79-87. [01.00.00; № 39. IF = 0,359]
4. Алиев А.А., Рузibaева М.К., Исаханов З.А. Анизотропия потери энергии электронов при рассеянии от поверхности различных граней полупроводников (Si, Ge) // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2005. - Т. 7, - № 3, - С. 213 – 217. [01.00.00; № 5]
 5. Исаханов З.А. Исследование спектров характеристических потерь энергии электронов, прошедших через облученные ионами Ar^+ различной дозы тонкие пленки Cu(100) // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2010. - Т. 12, - № 1-2, - С. 45 – 49. [01.00.00; № 5]
 6. Isakhanov Z.A., Mukhtarov Z.E., Umirzakov B.E. and Ruzibaeva M.K. Optimum ion implantation and annealing conditions for stimulating secondary negative ion emission // Journal Technical Physics. St.-Petersburg, 2011. - V. 56, - № 4, - pp. 546 – 549. [№ 11, Springer, IF = 0,524]
 7. Isakhanov Z.A., Ruzibaeva M.K., Umirzakov B.E. and Kurbanov R. A Study of the Influence of Surface Layers' Disordering on the Spectrum of Energy Losses of Electrons Passing through Copper Thin Single_Crystal Films // Journal of Surface Investigation. X_ray, Synchrotron and Neutron. Techniques. 2011. - V. 5, - № 4, - P. 769–771. [№ 11, Springer, IF = 0,359]
 8. Aliev A.A., Isakhanov Z.A., and Ruzibaeva M.K. A Study of the Orientation Dependence of the Electron Energy Loss Spectra for Single Crystal Films of Copper and Silver // Journal of Surface Investigation. X_ray, Synchrotron and Neutron. Techniques. Moscow 2012. - V. 6, - №1, - pp. 149–153, [01.00.00; №39, IF = 0,359]
 9. Isakhanov Z.A. Energy Distribution of Metal and Noble Gas Ions Traversing Single-Crystal Copper Films // Journal Technical Physics. 2012. - V. 57, - № 9, - pp. 1297 – 1299. [№ 11, Springer, IF = 0,524]
 10. Z.A. Isakhanov Investigation of Angular and Energy Distribution of Na^+ and K^+ Ions Passed through Thin Copper Films // Journal of Surface

57

- Investigation. X_ray, Synchrotron and Neutron. Techniques. Moscow 2013. - V. 7, - № 6, - pp. 1100–1103, [01.00.00; № 39, IF = 0,359]
11. Isakhanov Z.A., Umirzakov B.E., Ruzibaeva M.K., Mukhtarov Z.E. and Khalmatov A.S. Estimation of the Sizes of Disordered Surface Regions of Cu and Ag Thin Films Using the Ion Transmission Method // Journal of Surface Investigation. X_ray, Synchrotron and Neutron. Techniques. 2013. – V. 7, – № 6, – pp. 1231–1233. [№ 11, Springer, IF = 0,359]
 12. Isakhanov Z.A., Umirzakov B.E., Ruzibaeva M.K., and Donaev S.B. Effect of the O_2^+ -ion Bombardment on the TiN Composition and Structure // Journal Technical Physics, 2015. – V. 60, – No.2, – pp. 159 – 161. © Pleiades Publishing, Ltd. [№ 11, Springer, IF = 0,524]
 13. Эргашов Ё.С., Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Прохождение электромагнитных излучений через тонкие пленки Cu // Журнал

технической физики. Санкт-Петербург, 2016. - Т. 86, - № 6, - С. 156 – 158.
[01.00.00; № 20. IF = 0,661]

II бўлим (II часть; part II)

14. Алиев А.А., Рузибаева М.К., Исаханов З.А. Сравнительное исследование спектров характеристических потерь энергии электронов, рассеянных поверхностью переходных металлов и их сплавов / UzPEC - 2. Ташкент. 1999. - С.39.
15. Алиев А.А., Исаханов З.А. Худайбердиев С., Рузибаева М.К. Ориентационная зависимость потери энергии электронов, рассеянных поверхностью монокристаллов тугоплавких металлов / 35-Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2005. - С. 47.
16. Алиев А.А., Исаханов З.А., Рузибаева М.К. Дисперсия объемного плазмона при прохождении электронов через тонкие пленки меди / UzPEC – 4. Ташкент. 2005. - С. 88.
17. Исаханов З.А. Исследование ориентационной зависимости спектров ХПЭЭ, прошедших через тонкие пленки Cu и Ag / 39-Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2009. - С. 81.
18. Исаханов З.А. Исследование спектров ХПЭЭ, прошедших через тонкие пленки Cu(100), облученные ионами Ag^+ различной дозы / UzPEC-5. Ташкент. 2009. - С. 21.
19. Абдувайитов А.А., Рузибаева М.К., Исаханов З.А., Кодиров Т. Сравнительное исследование эмиссии Оже-электронов с поверхности алюминия при бомбардировке пучком ионов и электронов / UzPEC-5. Ташкент. 2009. - С. 67.
20. Исаханов З.А. Исследование угловых зависимостей потери энергии электронов прошедших через монокристаллические пленки меди // Материалы Респ.конф. «Соврем. физика и её перспективы» посвящ. 50–лет. физ.фак. НУУ им. М.Улугбека, Ташкент, 2009. – С. 252 – 254 .

58

21. Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Рузибаева М.К., Донаев С. Влияние разупорядочения поверхности на потери энергии ионов, прошедших через тонкие Cu / 41-Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2011.-С. 29.
22. Абдувайитов А.А., Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Кадыров Т. Применение ЭОС для исследования локализации примесных атомов на поверхности кристалла / 41-Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2011.-С. 96.
23. Исаханов З.А., Мухтаров З., Умирзаков Б.Е., Рузибаева М.К., Курбанов Р., Донаев С. Влияния массы и радиусов ионов на энергетические распределения ионов, прошедших через тонкие пленки Cu / Труды 20-Международной конференции взаимодействия ионов с поверхностью. Звенигород 2011. - Т. 1, - С. 157-160.

- 24.Исаханов З.А., Абдувайитов А.А., Умирзаков Б.Е., Рузибаева М.К. Влияние имплантации ионов бария и кислорода на оже-спектры молибдена / Труды 20-Международной конференции взаимодействия ионов с поверхностью. Звенигород 2011. - Т. 1, - С. 317-319.
- 25.Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Рузибаева М.К., Раззоков У.Н. Энергетическое и пространственное распределение ионов прошедших через свободных нанопленок Cu и Ag / 7-Международная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики». Мордовский ГПИ, Саранск. 2012. - С 148 - 151.
- 26.Исаханов З.А., Кадыров Т., Халматов А.С., Абдувайитов А.А. Изучение степени разупорядочения поверхности Si при ионной имплантации / 43-Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2013. - С. 140.
27. Umirzakov B.E., Ruzibaeva M.K., Isakhanov Z.A. Influence of ion bombardment on the composition and structure of the transition layer on interface of the TiN-Fe nanofilm system / “SIMS Europe 2014”. - p. 144.
- 28.Исаханов З.А., Кадыров Т., Рузибаева М.К., Исаханов У.З. Сравнительное исследование спектров ХПЭЭ отраженных и прошедших через тонкие пленки металлов / Труды 44-ой Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2014. - С. 97.
- 29.Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Мухторов З.Э., Донаев С.Б., Халматов А.С. Изучение состава и структуры TiN, имплантированный ионами O₂⁺ / Республиканская конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Ташкент. 2014. - С. 151 - 152.
- 30.Мухтаров З.Э., Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Кодиров Т., Халматов А.С. Влияние имплантации ионов Ba⁺ и последующей внешних воздействий на состав и эмиссионные свойства WO₂ / Республика илмий-амалий анжумани материаллари. Андижон. 2015. - С. 363 – 365.

Бичими 60x84¹/₁₆. Ризограф босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табағи: 4. Адади 100. Буюртма № 20.
«ЎзР Фанлар Академияси Асосий кутубхонаси» босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100170, Тошкент ш., Зиёлилар кўчаси, 13-уй.