ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ

DSc 30.05.2018 FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

МУХТАРОВ ЗИЯДУЛЛА ЭРГАШЕВИЧ

ТУРЛИ ТАБИАТЛИ МАТЕРИАЛЛАРНИНГ ИККИЛАМЧИ МАНФИЙ ИОН ЭМИССИЯСИНИ ИШҚОРИЙ МЕТАЛЛАР ИОНЛАРИ ИМПЛАНТАЦИЯСИ ВА ҚИЗДИРИШ БИЛАН СТИМУЛЛАШТИРИШ

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2019

УДК 535.371:535.016:538.975

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

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

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

Мухтаров Зиядулла Эргашевич
Турли табиатли материалларнинг иккиламчи манфий ион эмиссиясини ишқорий металлар ионлари имплантацияси ва қиздириш билан стимуллаштириш……..... 3

Мухтаров Зиядулла Эргашевич
Стимулирование вторичной отрицательной ионной эмиссии материалов различной природы имплантацией ионов щелочных металлов и нагревом …… 20

Mukhtarov Ziyadulla Ergashevich
Stimulation of secondary negative ion emission different nature by implantation of alkaline metal ions and heating …… 38

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ

List of published works……..... 42

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ

DSc 30.05.2018 FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

МУХТАРОВ ЗИЯДУЛЛА ЭРГАШЕВИЧ

ТУРЛИ ТАБИАТЛИ МАТЕРИАЛЛАРНИНГ ИККИЛАМЧИ МАНФИЙ ИОН ЭМИССИЯСИНИ ИШҚОРИЙ МЕТАЛЛАР ИОНЛАРИ ИМПЛАНТАЦИЯСИ ВА ҚИЗДИРИШ БИЛАН СТИМУЛЛАШТИРИШ

01.04.04 – Физик электроника

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

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.PhD/FM67 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:	**Исаханов Зинаобидин Абилпейзович** физика-математика фанлари доктори.
Расмий опоннентлар:	**Ташмухаммедова Дилноза Артикбаевна** физика-математика фанлари доктори, проф.
	Максимов Сергей Евлантиевич физика-математика фанлари номзоди
Етакчи ташкилот	**Ўзбекистон Миллий университети**

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

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

Диссертация автореферати 2019 йил «____» _____ куни тарқатилди.
(2019 йил «____» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси)

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

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

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда турли табиатли материалларнинг юза ва ҳажмини таҳлил қилиш учун иккиламчи ион масс-спектрометрия кенг қўлланилмоқда. Маълумки, сиртни ионлар билан бомбардимон қилганда, эмиссияланган нейтрал зарралар зарядли зарраларга нисбатан 10^2-10^4 тартибига қадар кўпдир. Шунинг учун иккиламчи ионлар эмиссиясини (ИИЭ) кучайтириш ҳамда бу усулнинг сезгирлигини ошириш мақсадида ҳар хил кучайтириш (стимуллаш) усуллари қўлланилади. Масалан, иккиламчи мусбат ионлар эмиссиясини кучайтириш учун, бомбардимон қилинадиган қаттиқ жисм сиртига ҳар хил элементларнинг электроманфий атомлари масалан, хусусий ҳолларда кислород ёки йод ўтқазилади. Иккиламчи манфий ионлар эмиссиясини (ИМИЭ) кучайтириш учун эса ҳар хил моддаларнинг электромусбат ионлари, масалан хусусий ҳолларда ишқорий металлар атомлари ўтқазилади.

Ҳозирги кунда дунёнинг нуфузли илмий марказларида юқорида келтирилган иккиламчи мусбат ион эмиссиясини стимуллаш усулини худди шундай ИМИЭсида ҳам қўлланилишига катта эътибор қаратилмоқда. Бироқ тадқиқот давомида етарли натижалар олиш учун зарур бўлган сиртни активлаштирувчи атомлар билан сиртнинг қопланиш даражасини доимий сақлашда муаммолар вужудга келади. Иккиламчи ионлар масс-спектрометрия (ИИМС) усулини рўёбга чиқариш учун нишон сирти ионлар дастаси билан бомбардимон қилинади ва бир қисм атомлар адсорбцияланган қатламдан чанглатилинади ҳамда сиртдан учиб чиқади.

Ўзбекистон Республикасида сўнгги йилларда қаттиқ жисм юзаси физикаси йўналишида долзарб муаммолардан бирига айланган микро- ва наноэлектроника учун материалларнинг миқдорий таҳлили ва киришмали таркибининг ўрганилиши билан боғлиқ жадал илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Унинг учун охирги вақтларда, ионлар оқими билан бомбардимон қилиш давомида атом-активаторларни сиртга узлуксиз ўтқазиш усуллари ва йўллари ишлаб чиқилди. Бироқ ушбу холларда ҳам сиртнинг чиқиш иши доимийлигини таъминлайдиган сиртнинг қопланиш даражасини бир хил сақлаш муаммолидир. Бунинг учун тажриба давомида қаттиқ жисм сиртига газ-активаторларни юбориш ускуналари зарур. Бундан ташқари, ушбу усулни қўллашда қаттиқ жисм сиртига юборилаётган газ-активатор оқими ва уларнинг ионлар билан бомбардимон қилиш жараёнида қайта учишини баҳолаш учун мураккаб ҳисоблашлар ўтказиш зарурдир. Ушбу ҳисоблашлар бомбардимон қилувчи ионлар дастаси ва сиртга тушаётган газ-активатор оқими параметрлари ёрдамида амалга оширилади. Аёнки, тажриба давомида ушбу параметрлар доимийлигини сақлаш жуда мураккаб, кўп ҳолларда бунинг иложи йўқдир. Шунинг учун, манфий ионлар масс-спектрларини олишда тадқиқ қилинадиган намуналарнинг чиқиш ишини минимал ҳолатга келтириш ва стабил сақлаш имконини берадиган усулларни

ишлаб чиқиш замонавий электрон материалшуносликнинг **долзарб** муаммоларидан ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасининг янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Сиртнинг чиқиш ишини камайтириш усули билан ИИМС сезгирлигини ошириш бўйича тадқиқотлар 50 йилдан кўпроқ вақт давомида олиб борилмоқда. Тадқиқотчиларнинг фан соҳасининг ушбу йўналишига бўлган қизиқиши материалларнинг элемент таркиби, структураси ва физикавий параметрларини ўрганиш билан боғланган. Сиртнинг чиқиш ишини камайтириш бўйича тадқиқотлар (1970–1980 йй.) ЎзРФА Электроника институтининг “Ионли чанглатиш” лабораториясида А.Х.Аюханов ва унинг шогирдлари билан амалга оширилган. Ушбу ишларни Электроника институти профессор олимлари А.А. Алиев, Н.Х. Джемилев бошчилигида давом эттирилди. Шунингдек чет эл олимлари М. Пруттон, Г. Слодзиан, М.Л. Йу, Бернхеим ва бошқалар ушбу ҳодисанинг ўзига хос жиҳатлари ҳақида кенг маълумотлар берди ва улар асосида ушбу ҳодисанинг қонуниятлари ва қўлланилишга тегишли бўлган қатор хулосалар қилинди. Ушбу ишларда чиқиш ишини (еφ) камайтириш учун дастлаб сиртга электромусбат бўлган атомларни ўтқазиш усулидан фойдаланилган. Шу каби тадқиқотларнинг кейинги босқичи ишқорий металлар билан сиртни бомбардимон қилинганда ва бомбардимон қилинувчи сиртнинг металл атомлари билан қопланиш даражаси тахминан бир моноқатлам ҳосил қилинганда олинган масс-спектрлар натижаларидир. Минимал чиқиш ишининг доимийлик вақтини ошириш учун ушбу ишда ишқорий металларни қаттиқ жисмнинг сирт ости қатламига имплантация қилиш ҳамда уни қиздириш йўли билан ИМИЭни кучайтиришга асосланган янги усулдан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқотлари Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг илмий-тадқиқот режалари бўйича қўйидаги лойиҳалар

доирасида бажарилган: №Ф-2-1-64 “Қаттиқ жисмларни ионлар билан бомбардимон қилганда оже-спектрларнинг шаклланиш механизмларини тадқиқ қилиш ва аниқлаш” (2003–2007), №ФА–Ф2–Ф102 “Ион ва электронларнинг ҳар хил модификацияга эга бўлган қаттиқ жисмдан ўтганда энергия йўқотишининг ориентацияга боғлиқлиги” (2007–2011), №Ф2–ФА–Ф161 “Эркин юпқа пленкалар (Al, Cu, Ag, Cu-Si) ва массив кристаллар (W, WO_n, TiN, CdTe, SiO_2) юзасида ион имплантацияси усули билан ҳосил қилинган наноўлчамли гетероструктураларнинг шаклланиш механизмлари ва уларнинг физик-кимёвий хоссаларини ўрганиш” (2012–2016) ва №ОТ–Ф3–13 «Кремний-силицид-металл эркин кўп қатламли нанопленкаларининг ҳосил бўлиш механизми ва уларнинг электрон ва кристалл структураларини ўрганиш» (2017 – 2020) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади қаттиқ жисм сирт ости қатламларида ишқорий металлар ионларини имплантация қилиш ва қиздириш билан иккиламчи манфий ион эмиссиясини стимуллаштиришнинг эффектив усулларини ишлаб чиқиш ва тадқиқ қилинаётган намуналар сиртининг элемент таркибини ярим миқдорий таҳлил қилиш.

Тадқиқотнинг вазифалари:

экспериментал ИИМС қурилмасини чангланган мусбат ва манфий ионлар спектрларини замонавий талаблар асосида масс-спектрометрик таҳлил қилиш учун такомиллаштириш ва модернизация қилиш;

ҳар хил табиатли материаллар (металлар Cu, Al, Mo, W, яримўтказгич Si ва диэлектрик SiO_2, WO_2) сирти Cs^+ ионлари билан чанглатилганда ҳосил бўладиган мусбат ва манфий зарралар масс-спектрларининг ҳосил бўлиш қонуниятларини бир хил шароитда аниқлаш;

ишқорий металлар ионларини имплантация қилиш ва кейинги қиздиришга асосланиб ИМИЭ стимуллаштиришнинг ионлар типи ва оптимал режимини (ионлар энергияси ва дозаси, қиздириш температураси) аниқлаш;

чанглатилган манфий ион зарралари чўққилари интенсивлиги ошиши ва қиздириш температураси орасидаги боғлиқликни ўрнатиш. Чанглатилган зарраларнинг максимал ионланиш содир бўладиган жараёнда еф нинг энг кичик қийматини аниқлаш;

стандарт ва саноат намуналари таркибидаги киришма атомларнинг тақсимотини профил ҳамда чуқурлик бўйича ўрганиш. ИМИЭ стимуллаштириш усулини сирт таркибини ярим миқдорий анализ қилиш учун қўллаш. Олинган маълумотларни ЭОС натижалари билан таққослаш;

Тадқиқотнинг объекти Cu, Al, Mo, W, WO_2, Si, Si-Me ларининг стандарт ва саноат намуналари, SiO_2 қатламларидан иборат.

Тадқиқотнинг предмети тадқиқот қилинадиган намуналар сиртининг минимал ва стабил чиқиш ишини, шунингдек чанглатиладиган мусбат ва манфий ионлар масс-спектрларининг шаклланиш қонуниятларини олишга имкон берадиган ИИМС усулининг сезгирлигини ошириш мақсадида иккиламчи манфий ион эмиссиясини стимуллаштириш.

Тадқиқотнинг усуллари. Мусбат ва манфий иккиламчи ион масс-спектрометрияси, электрон Оже-спектроскопияси (ЭОС).

Тақиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

қаттиқ жисм сирт ости қатламига электромусбат металл ионларини имплантация қилиш ва кейинги қиздиришга асосланган иккиламчи манфий ионлар эмиссиясини стимуллаштиришнинг эффектив усули яратилган. Бир хил шароитда манфий ионлар ИИМСси мусбат ионлар ИИМСсига нисбатан ўрганилаётган материаллар киришма атомлари таркиби тўғрисида кўпроқ маълумот олишга имкон бериши аниқланган;

сирт чиқиш ишининг еφ максимал камайиши ва манфий ионлар максимал чиқишига олиб келадиган ионлар имплантация ва қиздиришнинг оптимал шароитлари ўрнатилган. Сирт чиқиш иши еφ=1.9÷2 эВ қийматларида барча элемент пикларининг интенсивлиги максимал даражага етиши кўрсатилган;

сирт қатламларидан эмитирланган манфий ионлар концентрацияси ва чиқиш иши ўзгариши орасидаги ўзаро боғлиқлик қонунияти аниқланган. Шу жумладан, E_0=15-20 кэВ энергияли Cs^+ ионлар билан имплантация қилинган Мо вакуумда қиздирилганда чиқиш иши 1.9 эВ гача, кислород атмосферасида қиздирилганда эса 1.8 эВ гача камайиши кўрсатилган;

ИМИЭ стимуллаштириш усулидан фойдаланган ҳолда ҳар хил табиатли стандарт ва саноат материалларининг юзаси элементар ва кимёвий таркибининг концентрациявий миқдори аниқланган. ИМИЭ стимуллаштириш ИИМС ва ЭОС усуллари билан аниқлаб бўлмайдиган қатор киришма атомларини аниқлашга имкон бериши кўрсатилган;

саноат намуналари атомларининг чуқурлик бўйича концентрациявий тақсимоти профили олинган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

таклиф қилинаётган қаттиқ жисм сирт қатламига ишқорий металлар ионларини имплантация қилиш ва кейинги қиздириш билан манфий иккиламчи ион эмиссиясини стимуллаштириш усули киришма атомларининг миқдорини 0,0001 ат.% гача аниқликда аниқлашга имкон беради;

ионларни имплантация қилиш технологияларини ишлаб чиқиш бўйича олинган натижалар амалий жиҳатдан электрон асбоблар саноатида қўлланиладиган яримўтказгич-диэлектрик-яримўтказгич ва металл-диэлектрик-яримўтказгич каби юпқа қатламли структураларни ишлаб чиқишда муҳимдир.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий таҳлилий спектроскопия усуллари ва физик электроника ёндашувларини қўллаш билан асосланган. Экспериментал шароитлар чуқур таҳлил қилинган, юқори аниқликдаги ўлчаш асбоблари қўлланилган, тажриба натижалари статистик йўл билан ўта юқори аниқликда ҳисоблаб чиқилган. Натижа ва хулосалар зарядланган зарраларнинг кристаллар билан ўзаро таъсирлашувининг физикавий механизмларига бағишланган замонавий назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижалари базасига асосланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Ишлаб чиқилган ИМИЭ стимуллаштириш усули микро-опто- ва наноэлектроникада қўлланиладиган ҳар хил табиатли материалларнинг элементар таркибини юқори даражада аниқлашда қўлланилиши мумкин. Зарядланган манфий зарраларни стимуллаштиришга қаратилган янги ёндашув, қаттиқ жисм сирти ионлар билан бомбардимон қилинганда пайдо бўладиган зарядланган ва нейтрал зарраларнинг чангланиш назариясига муҳим ҳисса қўшади.

Модернизация қилинган қурилма ва таклиф қилинаётган атомлар концентрациясини баҳолаш усулини ҳар хил саноат корхоналарида ишлаб чиқариладиган материалларни сертификациялашда қўллаш учун жуда истиқболлидир. Сирт ва сирт ости қатламининг элементар таркибини аниқлаш бўйича олинган натижалари “Ўзбекистон қийин эрийдиган ва иссиққа чидамли металлар комбинати” очиқ акциядорлик жамияти, “Ўзкабел” давлат акциядорлик жамияти, “Олмалиқ тоғ металлургия комбинати” каби корхоналарида ишлаб чиқариладиган Cu, Al, W ва Mo катанкалари сифатини яхшилашда қўлланилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг амалиётда жорий қилиниши.

Материалларнинг сирт қатламларига актив металл ионларини имплантация қилиш орқали иккиламчи манфий ион эмиссиясини стимуллаштиришнинг самарали усулини қўллаш асосида:

– стимуллаш усулида юзани минимал чиқиш ишини турғун ҳолатда ушлаб туришни таъминлашда ИМИЭ ни стимуллаштириш учун олдиндан ишқорий металл ионларини имплантация қилиш ва кейинги қиздириш ионлар тури, энергияси, дозаси ва қиздириш температурасига боғлиқлиги бўйича олинган тажриба натижалари хорижий журналларда қаттиқ жисм юза ва юза ости қатламларида жуда кам киришма атомларининг концентрациясини аниқлашда (Applied physics 118, 073303 (2015), IF: 2.101; Technical Physics, 2015, V.60, № 4, pp. 621-623, IF: 0.702”, “Docteur en sciences de L'UNIVERSITE Paris XI, Orsay, Yang XIANG, 2012” ва бошқалар) фойдаланилган. Бу натижалардан фойдаланиш орқали турли табиатли материалларнинг юза ва юзаости қатламларида жуда кам киришма атомларининг концентрациясини (0,0001 ат.%) аниқлаш имконини берган;

– сиртнинг чиқиш ишини камайтириш ва бу туфайли сиртдан манфий ионларнинг эмиссиясини стимуллаштириш ва намуналарнинг элементар таркибини миқдорий таҳлил қилиш бўйича олинган натижалар қуйидаги лойиҳада кластер ионларини дастасини олиш ҳамда ҳар хил материалларда атомларнинг чуқурлик бўйича тақсимотини ўрганишда фойдаланилган: № ФА-Ф2-Ф162 «Кўп атомли зарраларнинг қаттиқ жисм сирти билан ўзаро таъсири» (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг 2019 йил 14 мартдаги №2/1255-728 маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш иккиланган масс-спектрометрда 4-20 кэВ энергияли тезликдаги зарраларнинг сирт билан ўзаро таъсирида рўй берадиган иккиламчи жараёнлар, “молекуляр” эффектлар, яъни кластерлар билан бомбардимон қилингандаги

иккиламчи ночизиқли ноаддитив жараёнларни тадқиқ қилишда бомбардимон қилиш учун ишлатиладиган $Au_m^-(m=1-9)$, $Si_m^-(m=1-6)$, $C_m^-(m=1-12)$, $Bi_m^-(m=1-10)$ каби кластер ионларининг дастасини олиш ҳамда тадқиқ қилинаётган материалларда атомларнинг чуқурлик бўйича тақсимотини ўрганиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 7 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий анжуманларда муҳокамалардан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 21 та илмий иш, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш бўйича тавсия этилган илмий нашрларда 6 та мақола, халқаро ва республика илмий-амалий анжуманларида 15 та тезис чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхати, 46 та расм, 9 та жадвалдан иборат. Диссертация матни 134 бетда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, Ўзбекистон Республикасида фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги ва муаммонинг ўрганилиш даражаси кўрсатилган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, тадқиқотларнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш бўйича қисқа маълумотлар ва ишлар апробацияси, шунингдек диссертация ҳажми ва структураси келтирилган.

Биринчи бобда **«ИИМС сезгирлигини ошириш ва ушбу усулни қаттиқ жисм сирти элементар таркибини миқдорий анализ бўйича экспериментал ва назарий тадқиқотлар шарҳи»** келтирилган. Адабиётлар шарҳи, ушбу мақсадлар учун айни пайтда бир неча усуллар қўлланилишини кўрсатди.

Миқдорий анализ қилишнинг усулларидан бири, бу эталон намуналардан фойдаланиш. Бироқ ушбу усул қатор чеклашларга эга. Биринчидан, бир қатор кўп компонентли материаллар учун эталон намунасини яратишнинг амалий жиҳатдан имконияти йўқ. Иккинчидан, ҳатто эталон наъмуналарини ҳам ионлар билан бомбардимон қилиш жараёнида ҳар хил атомларнинг концентрацияси чуқурлик бўйича сезиларли ўзгариб боради.

ИИМС сезгирлигини оширишнинг бошқа усули бу – сирт чиқиш ишини кескинлик билан ўзгаришига олиб келадиган атомларни чанглатиш

ёки ионлар имплантацияси йўли билан иккиламчи мусбат ионлар эмиссияси ва ИМИЭни стимуллаштириш усулидир.

Бироқ, стимуллаштиришда иккиламчи мусбат ионлар эмиссияси ва ИМИЭ усуллари қўлланилганда ҳам етарли маълумотларни олиш учун зарур бўлган вақт давомида сиртнинг атом-активаторлар билан қопланиш даражасини сақлаб туриш муаммоси юзага келди ва шу сабабли кенг қўлланилмади. ИИМС қўлланилганда нишон сирти ионлар дастаси билан бомбардимон қилинади ва мос равишда адсорбцияланган қатлам чангиб сиртдан учиб чиқади. Назарий ва экспериментал ишларнинг критик таҳлили асосида диссертациянинг асосий вазифалари ишлаб чиқилди ва белгиланди.

Иккинчи бобда **«Экспериментал қурилма, уни ўлчашларга таёрлаш ва эксперимент ўтказиш усуллари»** келтирилган. Биз МИ-1201Б масс-спектрометри базасида такомиллаштирилган ИИМС қурилмасидан фойдаландик. Такомиллаштирилган ИИМС етарлича катта сезгирлик (10^5-10^6) ва массалар бўйича ажрата олиш қобилиятига эга аналитик қурилмадир. Ушбу қурилма ёрдамида мусбат ҳамда манфий ионлар масс-спектрларини олиш мумкин. Мусбат зарядланган цезий (Cs^+) ионлари, ионлар манбайида CsCl ишқорий-галоид тузининг сиртий ионлашуви йўли билан олинади. Бирламчи ионларнинг энергияси 3-20 кэВ оралиғини ташкил этади. Қурилманинг ионли-оптик системаси ишқорий металларнинг мусбат ва манфий ионлари масс-спектрларини ўрганиш учун ҳам такомиллаштирилди. Ўрганиладиган намуна ионлар замбарагида шакллантирилган ишқорий металларнинг ионлари билан бомбардимон қилинади. Намуна, буғлатгич, намуна қиздиргичи ва термопара тантал пластинкасидан тайёрланган махсус каробкада жойлаштирилган. Нишон сиртидан чанглатилган ионлар тортувчи, фокусловчи, тезлаштирувчи ва оғдирувчи линзалар ёрдамида масс-анализаторга йўналтирилади. ИМИЭ стимуллаштириш усули масс-спектрометрнинг сезгирлигини икки тартибга ошириши ва тадқиқ қилинаётган материал сиртини элементлар яриммиқдорий анализи учун қўллаш имкониятини бериши кўрсатилди.

Учинчи боб **«Ион активаторларни танлаш, ИМИЭ сида тўлиқ спектрни олишда стабил минимал чиқиш ишини олишга имкон берадиган ионларни имплантация қилиш ва қиздиришнинг оптимал шароитларини танлаш»**га бағишланган. Бу ерда Al, Cu, Mo, W, WO_2, Si-Me, Si ва SiO_2 намуналари сиртидан ҳар хил усуллар билан стимуллаштирилган иккиламчи манфий ионлар чиқишининг солиштирма анализи келтирилган.

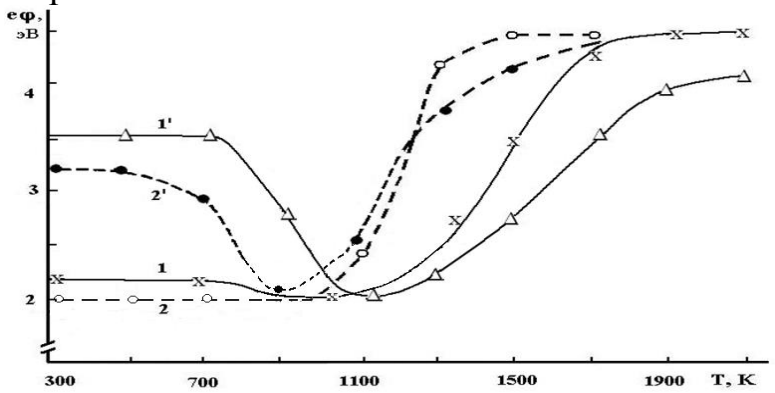
Ҳар хил металл ва яримўтказгичлар тоза сиртидан ион-ион эмиссияси ўрганилган. Бомбардимон қилинаётган ионларнинг бошланғич энергияси 5-10 кэВ ораликда бошқарилганда элементар ва кимёвий таркиб ионлари токлари 10^{-9}-10^{-10} А/см^2 ни ташкил қилди. Ўрганилаётган намуналарнинг тоза сиртидан мусбат ва манфий зарядланган зарраларнинг масс-спектрлари олинди. Намуна сиртлари эриш температурасигача қиздирилиб тозаланди.

Ишчи камерада босим 10^{-8} Торр ни ташкил қилди. Тадқиқ қилинган барча намуналар учун уларнинг сирти E=6,7 кэВ энергияли цезий ионлари дастаси билан бомбардимон қилинганда ҳосил бўлган мусбат ва манфий зарядланган зарралар масс-спектрлари олинди. Барча масс-спектрлар бир хил экспериментал шароит ва ўлчашнинг бир хил кучайтириш трактида олинди.

Чанглатилган манфий зарядланган зарралар масс-спектрларида ҳар хил элементлар чўққилари миқдори ва интенсивлиги сиртдан мусбат зарядланган ҳолда чангланаётган зарралар масс-спектрларига нисбатан анча юқори эканлигини кўрсатди. Жумладан, Cu нинг ИМИЭ спектрида қўшимча F, K, Ca, As, Zn чўққилари кузатилди. Аниқланган ушбу экспериментал факт мис сиртини бомбардимон қилиш вақтида унинг сиртида цезий атомлари адсорбцияланади, чунки уларнинг ёпишқоқлик коэффиценти бирга яқин. Бу ҳолат сиртнинг чиқиш ишини камайтиришга олиб келади ва ўз навбатида ИМИЭ стимуллаштиради. Бироқ, ИМИЭни ўрганиш давомида биз манфий зарядланган зарралар спектрлари интенсивлиги вақт ўтиши билан стабил ҳолатда бўлмаслигини кузатдик ва ушбу ҳолат ионлар билан бомбардимон қилиш давомида адсорбцияланган атомлар сонининг ўзгариши билан боғлиқ бўлиши мумкинлиги аниқланди. Ушбу муаммони бартараф этиш учун тадқиқ қилинадиган намунага олдиндан, масалан 10^{18}-10^{19} атом/см^3 гача ишқорий металлар атомлари имплантация қилиниши кераклиги ва ИМИЭни ўрганиш давомида маълум бир температурагача қиздирилиши, шунда ишқорий металл атомлари билан қопланиш даражаси оптимал ҳолатда сақланиб туриши керак деган ғояни илгари сурдик. Ушбу ҳолат, электронга мойиллиги кичик бўлган, масалан, магнийнинг ИМИЭ спектридаги чўққилари интенсивлигининг максимал бўлишига эришиш билан баҳоланиши керак. Олдиндан имплантация қилинган намуналарда ушбу чегаравий температурани ИМИЭси етарлича вақт давомида максимал ва барқарорлиги орқали аниқлаш мумкин. Ушбу ҳолатда, имплантация қилинган цезий атомларининг намуна сиртида доимий диффузияси ҳисобига адсорбцияланган цезий атомларининг оптимал қопламаси мавжуд бўлиб, бунда чиқиш иши энг кичик ва барқарор ҳолатда бўлади. Ушбу ҳолат, ўз навбатида узлуксиз бомбардимон қилиш ва чангланиш жараёнида адсорбцияланган цезий атомлари билан янгидан қопланиб туришига олиб келади. Бундай ҳолларда, олдиндан имплантация қилинган намуна сирти, яъни, унинг чиқиш иши минимал бўлганда (молибден учун 1,9 эВ) вақт ўтиши давомида стабил бўлган ИМИЭнинг максимал стимуляцияси кузатилади ва шунга мос равишда, бундай сиртдан манфий зарядланган заррачаларнинг чиқиши максималга эришади. Ушбу ҳолатни баҳолаш учун сиртдан чанглатилган ва сочилган нейтрал зарраларни детекторлаш усули қўлланилади. Сиртнинг юқорида кўрсатилган ҳолатида, яъни олдиндан имплантация қилинган ва қиздирилган намуналарда нейтрал зарраларнинг эмиссияси минимумгача камаяди.

Бизнинг кейинги тадқиқотимиз ион турини танлаш, ионларнинг оптимал энергияси ва дозасини аниқлаш, шунингдек, қиздириш температурасини аниқлашга йўналтирилди. Чиқиш ишининг еφ энг катта

камайиши Cs^+ ва Ba^+ ионларидан фойдаланилганда эришилди. 1-расмда ҳар хил энергияда Ba^+ ва Cs^+ ионлари билан Д~$6\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ тўйиниш дозасигача легирланган Мо намунаси чиқиш ишининг (еφ) қиздириш температурасига боғлиқлиги келтирилган.



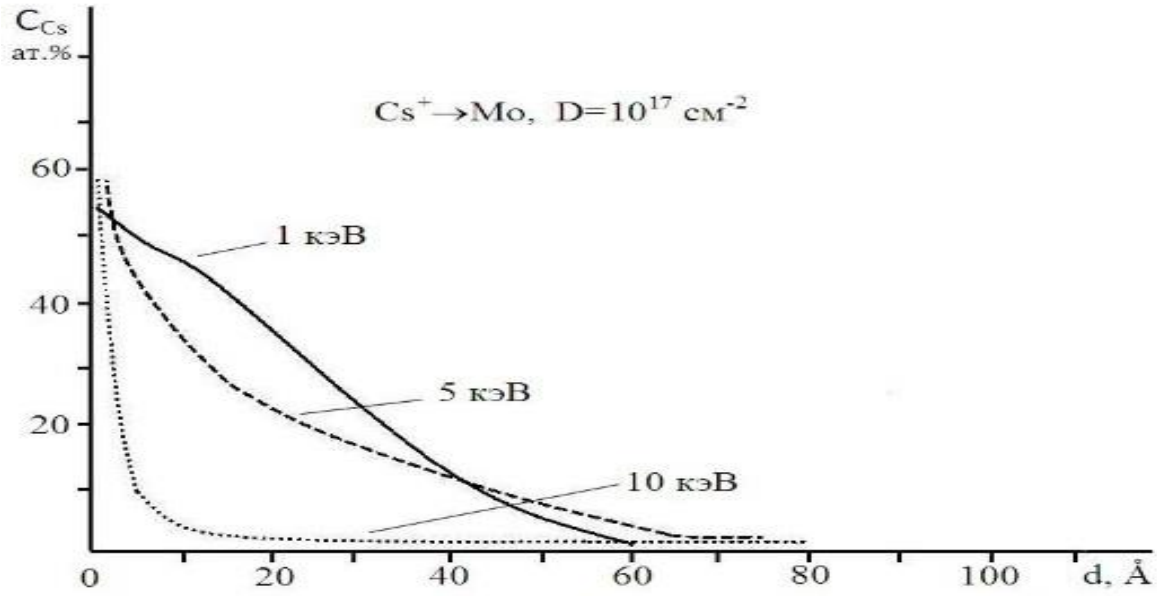
1-расм. $Ba^+(1,1^1)$ ва $Cs^+(2,2^1)$ ионлари 1, 2- E_0=0,5 кэВ; 1^1, 2^1- E_0=5 кэВ энергияларда Д=$6\cdot10^{16}$ $см^{-2}$ дозада имплантация қилинган Мо наъмунаси сирт чиқиш иши ўзгаришининг қиздириш температурасига боғлиқлиги

Ҳар бир температурада қиздириш 30 дақиқа давомида амалга оширилди. Ўлчашлар нишон совутилгандан сўнг амалга оширилди. Кўриб турганимиздек, иссиқлик билан ишлов берилганда ионлар билан легирланган Мо чиқиш ишининг еφ ўзгариши бомбардимон қилувчи ионларнинг энергиясига боғлиқ бўлади. Ионларнинг энергияси кичик бўлганда еφ қиймати Т≈700-800 К га қадар ўзгармайди. Температуранинг кейинги оширишларида Cs^+ ионлари легирланган Мо учун еφ қиймати тезда 3,5-4 эВ гача ошди, Ba^+ ионлари легирланган Мо учун еφ(Т) эгрилиги Т=900-1000 К интервалида энг кичик қийматдан ўтади. Ушбу кўринишдан, Ba^+ ионлари билан легирланган ҳолатида, сиртда қалинлиги d=0,5-1 моноқатламдан ортиқ бўлган қатлам ҳосил бўлади. Т=900-1000 К температураларда қиздирилгандан сўнг сиртдан Ва қисман буғланиши туфайли, қатлам қалинлиги оптимал ҳолатгача камаяди. Т=1100-1600 К оралиғида чиқиш иши ~2 эВ дан ~4 эВ гача ошади. Ионларнинг юқори энергияларида еφ(Т) эгрилиги минимумдан ўтади: Cs^+ учун Т=850-900 К, Ba^+ учун эса Т=1000-1100 К интервалида.

Бироқ ИМИЭ спектрлари таҳлили ионларнинг Е<5 кэВ дан кичик энергияларида ва (Д>10^{16} $см^{-2}$) катта дозаларида намуналарнинг еφ кескин камаяди ва улар анчагина катта ток ва температура юкламаларини кўтара олади, уларнинг сирт соҳаси легирловчи киришмалар билан кучли бойиган ҳолатда бўлади (30-40 ат.% гача).

Ушбу ҳолат сирт қатламларнинг таркиби ва структуравий ҳолатига сезиларли таъсир кўрсатади ва баъзи ҳолатларда эса кимёвий бирикмалар ҳосил бўлишига ҳам олиб келади (масалан, кремнийда). Киритилувчи атомларнинг таъсири уларнинг концентрацияси ≤10^{20} $ат\cdot см^{-3}$ дан кичик бўлганда сезиларсиз бўлади. Бундай концентрация фақат E_0>10 кэВ да эришилади. Масалан, Cs^+ ионларини E_0=14-15 кэВ энергияда Мо га

имплантация қилинганда Cs қатлами сирт қатламининг 1-2 ат.% ни ташкил қилади. Ион-легирланган Mo ни қиздириш Cs атомларининг қайта тақсимланишига олиб келади. Чиқиш ишининг еφ минимумгача камайиши кузатиладиган температуралар интервали 850-900 К ни ташкил қилади. 2-расмда ҳар хил энергияли Cs^+ ионлари имплантация қилинган ва T=800 К температурада қиздирилган Mo учун $C_{Cs}(d)$ боғланиш келтирилган. Шуни қайд этиб ўтамизки, ионлар энергияси 20-25 кэВ га ошириш сиртнинг чангланиш интенсивлиги ошиши ва қиздириш температурасининг Cs^+ учун 1000-1100 К, Ba^+ учун эса 1300-1400 К гача ошишига олиб келди. Шу билан бирга, еφ нинг максимал камайиши кузатилмайди. Ионларнинг олдиндан легирлаш энергияси 10-15 кэВ. Чиқиш ишининг энг камайиши ион-имплантация қилинган намунани кислород атмосферасида қиздирганда кузатилди. Cs^+ ионлари имплантация қилинган Mo ни кислород атмосферасида қиздириш еφ нинг 1,65-1,7 эВ гача камайишига олиб келди.

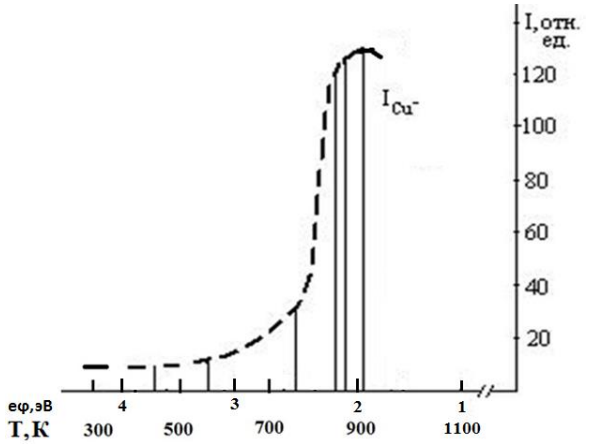


2-расм. Ҳар хил энергияли Cs^+ ионлари билан имплантация қилинган Mo даги Cs нинг чуқурлик бўйича тақсимот профилига T=800 К қиздиришнинг таъсири

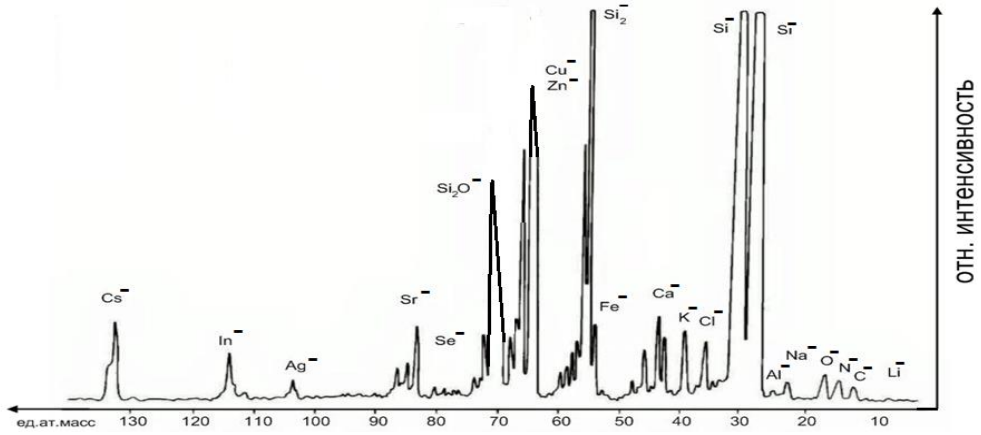
3-расмда Cu^- (I_{Cu}) манфий ионлари интенсивлигининг ҳароратга ва чиқиш ишига боғлиқлиги саноат намунаси бўлган Cu учун келтирилган. Кўриниб турганидек, Cu^- интенсивлигининг чўққиси кескин ошиши ҳароратнинг 800-900 К да кузатилди, ушбу ҳолат Cu манфий ионларининг максимал чиқиши билан тушунтирилади. Ҳароратнинг янада оширилиши Cu интенсивлигини камайишига олиб келди, бу юзада Cs атомларининг камайиши билан боғлиқ.

Мисол тариқасида 4-расмда яхши тозаланган, цезий ионлари билан имплантация қилинган ва кейинги қиздириш йўли билан чиқиш иши камайтирилган кремнийнинг ИМИЭ спектри келтирилган. Ушбу спектр таҳлили ўрганилаётган намуна сиртидаги деярли барча элемент атомларини аниқлаш имконини бериши мумкинлиги ҳақида хулосаларни беради.

Хусусий ҳолда, яхши тозаланган Si да Ag, Sr, Fe ларнинг мавжудлиги илгари аниқланмаган.



3-расм. Мис манфий ионлари интенсивлигининг (I_{Cu}) ҳароратга ва чиқиш ишига боғлиқлиги. Спектрлар Cu ни E_0= 6,7 кэВ энергияли Cs^+ ионлари билан бомбардимон қилинганда олинди



4-расм. Чиқиш иши камайтирилган яхши тозаланган кремний ИМИЭ масс-спектри. E_0 = 6,7 кэВ

Биз ИМИЭ сини стимуллаштириш усулини қаттиқ жисм сиртини элементар миқдорий таҳлил қилишга ҳаракат қилдик. Бунинг учун, олдин ион имплантацияланган ва сўнгра қиздириш билан чиқиш иши камайтирилган сиртдан чанглатилган манфий зарраларнинг масс-спектрларини олдик. Ушбу масс-спектр ёрдамида асосий элемент чўққиси интенсивлиги ўлчанади, масалан, мис (H_{Cu}) учун, ва барча аниқланган чўққилар ва уларнинг йиғиндисини (H) топиш:

$$H = \sum h_{Cu} + h_{Fe} + h_{Zn} + h_{Si} + h_{Ti} + h_{Mg} + h_{Ca} + \ldots. \qquad (1)$$

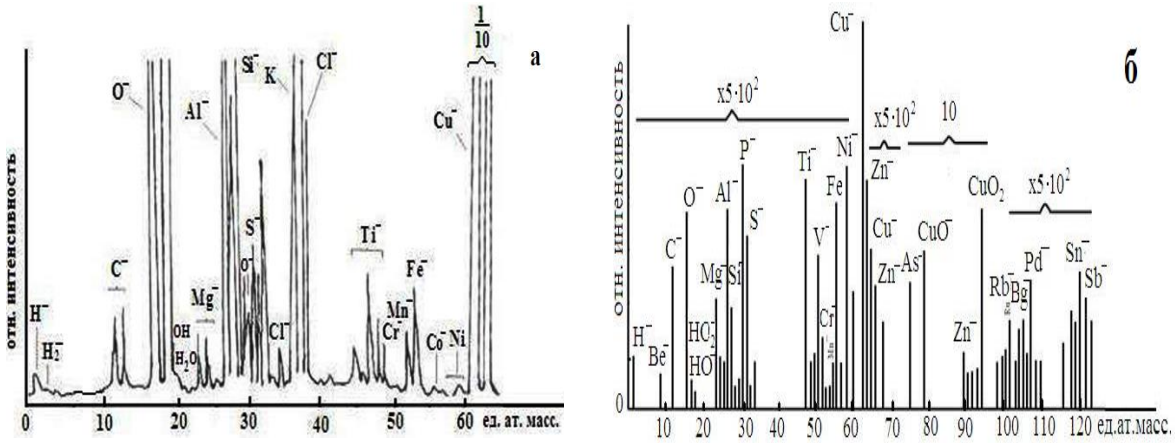
Ушбу чўққилар йиғиндиси 100% бирликка келтирилади, берилган шароитда нейтрал зарралар сиртдан эмиссияланмаганлиги ва ўз навбатида бундан бизни қизиқтирган киришмаларнинг (ат.% да) миқдорини топиш мумкин, масалан темир миқдорини (Fe) мис намунасида қуйидаги формула ёрдамида топилади:

$$X_{Fe} = (h_{Fe} / H) \times 100\% \quad (2)$$

Ҳисоблаш натижалари, темирнинг мисдаги коцентрацияси 0.0027 атом %.ни ташкил қилишини кўрсатди.

Тўртинчи бобда «**Al, Cu, W, Mo саноат намуналарининг сирт ва сирт ости қатламларининг элементар ва кимёвий таркибини экспериментал ўрганиш натижалари**» келтирилган.

Цезий ионларини имплантация қилиш ва кейинги қиздириш (Т=900 К гача) билан чиқиш иши камайтирилган (еφ=1,9 эВ) саноат намуналарининг ИМИ спектрлари таҳлили чанглатилган мусбат зарядланган зарралар масс-спектрларида аниқланмайдиган қатор максимумлар мавжудлигини кўрсатди. Мисол сифатида 5-расмда АГМК ва Узкабел заводларида ишлаб чиқарилган, махсус тозаланмаган мис катанкаси масс-спектрлари келтирилган. Бироқ, ўта юқори вакуум олиш, ионлар имплантацияси билан еφ ни минимумга олиб келиш учун намуна 700-800 К температурагача қиздирилди.



5-расм. Энергияси E_0=6.7 кэВ бўлган цезий ионлари билан мис катанкаси сирти чанглатилганда олинган манфий зарралар масс-спектрлари. а) «Узкабел» да, б) АГМК да ишлаб чиқарилган мис катанкаси масс-спектрлари

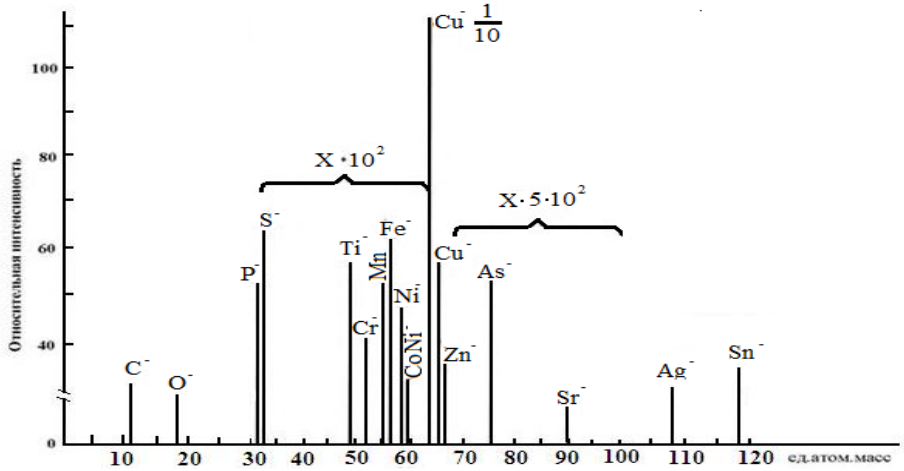
Шунингдек 3.4 бўлимда келтирилган усул ёрдамида сиртдаги элементларнинг яриммиқдорий таҳлили ўтказилди. 1-жадвалда ОЭС ва ИИМС усулларидан фойдаланиб Cu ва Al нинг тозаланган сиртида аниқланган асосий ва киришма элементлари атомларининг концентрацияси келтирилган. Спектрлар бир хил экспериментал шароитда олинган. Кўриниб турибдики, ОЭС га нисбатан ИИМС нафақат кўп миқдордаги элементларни, шу билан бирга нисбатан аниқроқ миқдорий натижалар олишга имкон беради.

6-расмда яхши тозаланган мис катанкаси учун манфий ионлар масс-спектри келтирилган. Сиртнинг якуний тозаланиши Т=1000 К да амалга оширилди. Кўриниб турибдики H, HO, H_2O, Be, CuO чўққилар деярли йўқ, C ва O чўққилари интенсивлиги эса кескин камайган. Шу билан бирга, сиртда мис коцентрацияси деярли 99,9 ат.% ни ташкил қилади.

1-жадвал.

Яхши тозаланган Cu ва Al намуналари сиртида аниқланган атомларнинг концентрацияси

Усул	Асосий ва киришма элементлари атомларининг концентрацияси, ат.% да								
Cu	Cu	P	S Cl	C Ca	O Fe	Ni Ag	Mn Se	As Pb	Sn Zn
ОЭС	97,1	0,2	0,19 0,018	1,1 0,3	0,482 0,36	0,25			
ВИМС	98,8	0,0019	0,0032 0,1203	0,1262 0,025	0,0512 0,0044	0,0376 0,0292	0,001 0,0015	0,0018 0,0024	0,0275 0,0028
Al	Al	Fe	Zn Ti	Mn Si	Cr Cu	Mg O	C		
ОЭС	99,42	0,330	0,032 0,015	0,030 0,123	0,020	0,030			
ВИМС	99,55	0,063	0,045 0,007	0,005 0,082	0,005 0,010	0,005 0,005	0,012		

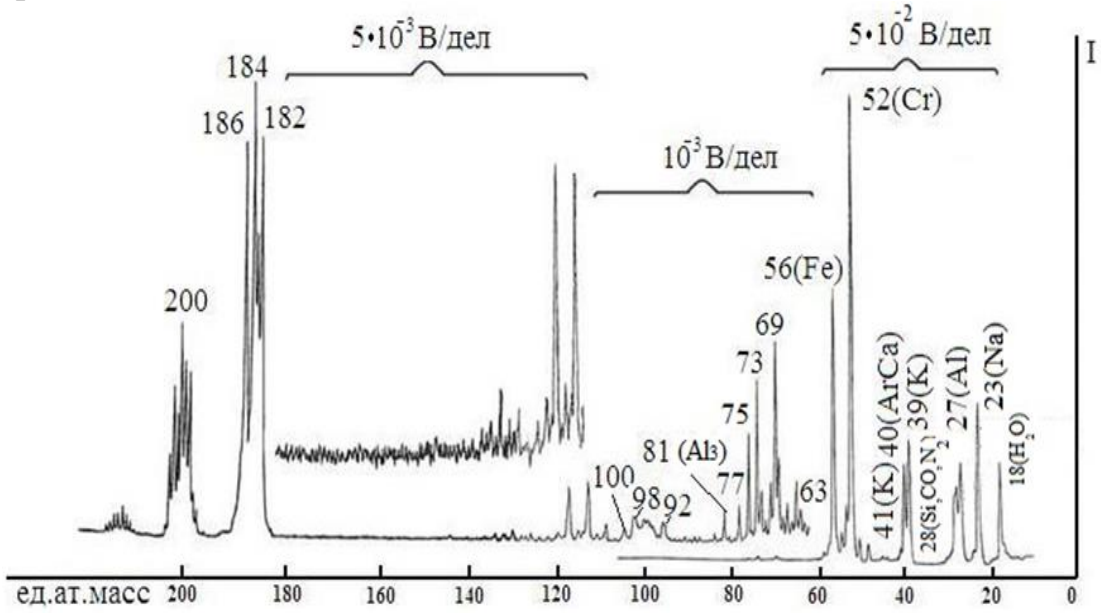


6-расм. Яхши тозаланган мис катанкасининг ИМИЭ масс-спектри. E_0=6,7 кэВ

Ҳатто яхши тозаланган мис катанкаси сиртида ўндан ортиқ киришма атомлари мавжуд: Ba, Pd, Si, As, Zn, S, P, O, C, Fe, Ne, Sn, Ag. Ушбу Fe, Ni, Si, Ag ларнинг мис катанкасида мавжуд бўлиши миснинг электр ўтказувчанлигини ёмонлаштириши кўрсатилди. Киришма атомларнинг

чуқурлик бўйича тақсимланиш профили ўрганилди. Қатор киришма атомларининг концентрацияси чуқурлик бўйича бир хил бўлмаслиги, яъни маълум бир қатламда бир киришманинг концентрацияси кўп, бошқасида кам бўлиши аниқланди. Бизнинг фикримизча, мис катанкасидаги киришма элементларининг тақсимланиш профилининг бундай характери мисни олиш технологияси, эриш температураси ва мис катанкасини қайта ишлаш (чўзиш) таъсирида ҳар хил элемент атомларининг ҳаракатчанлигига ҳамда уларнинг мис атомлари билан кимёвий бирикмалар ҳосил қилишга бўлган активлиги билан боғлиқдир. Бундай аналогик натижалар Al нинг саноат намуналари учун ҳам олинди.

Қийин эрувчи металлар саноат намуналари (толалари) электрон техника қурилмаларида, масалан, электровакуумли асбобларда катод сифатида кенг қўлланилади. Ушбу материалларнинг сифати сиртда киришма атомларининг концентрацияси ва уларнинг сирт ости қатламида тақсимланишига боғлиқ бўлади. Тадқиқ қилишдан олдин ушбу намуналар 10^{-9} мм.сим.уст. дан кам бўлмаган вакуум шароитида юқори температураларда қиздириш (W-2800 К, Мо-2500 К температурагача) билан тозаланди. УзКТЖМ вольфрам толаси учун масс-спектр 7-расмда келтирилган.



7-расм. W саноат намунасининг масс-спектри (ОАЖ УзКТЖМ)

Спектрда қуйидаги масса қийматларига эга бўлган бир каррали зарядланган ионлар чўққилари аниқланди: 18(H_2O), 23(Na), 24(Mg), 27(Al), 28(Si, CO, N_2), 39(K), 40(Ar, Ca), 41(K), 52(Cr), 54(Al_2), 56(Fe), 63(Cu), 65(Cu), 68, 73, 75, 77, 81(Al_3), 83, 92(Mo), 94(Mo), 95(Mo), 96(Mo), 97(Mo), 98(Mo), 100(Mo), 182(W), 183(W), 184(W), 186(W), 198-203(WO).

Аммо анализ, яхши газсизлантирилган W сирти юқори тозаликка эга бўлишини кўрсатди. Барча киришма атомлар концентрациялари йиғиндиси 0,5-1 % дан ошмайди. Киришма атомларининг W ва Мо да чуқурлик бўйича тақсимланиш профилини ўрганиш, барча элементлар учун чуқурлик ошиши

билан чўққилар интенсивлигининг камайишини кўрсатди. Элементлар таркиби ~3мкм чуқурликда стабиллашади.

ХУЛОСА

1. Турли табиатли материаллар сиртининг доимий минимал чиқиш иши шароитида элементлар ва кимёвий таркибини тадқиқ қилишга имкон берадиган иккиламчи-ионлар масс-спектрометри такомиллаштирилди. Қаттиқ жисмларнинг сиртости қатламига электромусбат металлар атомларини имплантация қилиш ва кейинги қиздиришга асосланган иккиламчи манфий ионлар эмиссиясини стимуллаштириш усули ишлаб чиқилди.

2. Намунага Cs^+ ионлари киритилгандан кейин, ўрганилаётган намуналарнинг чиқиш иши 1,9 эВ гача камайиши кўрсатиб берилди. Илк бор Cs^+ ионларининг оптимал энергияси 15-20 кэВ, дозаси эса Д~$(1\text{-}5)\cdot10^{16}$ ион$\cdot$см$^{-2}$ интервалда бўлиши аниқланди. Бунда, имплантация қилинган ионларнинг сиртости қатламидаги концентрацияси $\leq10^{19}$ см$^{-3}$ ни ташкил қилиб, бу ушбу қатламнинг элемент таркибига кучли таъсир кўрсатмайди. Ион-имплантация қилинган намуналарни кислород атмосферасида температурали активлаштириш еφ нинг 1,8 эВ гача камайишини кўрсатди.

3. Чиқиш ишининг (еφ) қиймати 1,9÷2 эВ дан камайганда деярли барча асосий ва киришма атомлари манфий ионлари интенсивлиги максимумгача ошиши аниқланди. Бунда юза чиқиш ишининг иккиламчи қиймати чанглатилган атомларнинг ионланиш патенциалидан кичик бўлиб, бу ИИМС сезгирлигини икки марта ошириш имконини беради.

4. Поли- ва монокристалл Cu, Al, W намуналари таркибининг ИИМС усули билан яриммиқдорий таҳлили ўтказилди ва ОЭС натижалари билан таққосланди. Cs^+ ионлари билан стимуллаштирилган мис ва алюмин катанкаларининг манфий зарядланган зарралар масс-спектрларида йигирмадан ортиқ элементларнинг чўққилари аниқланди. ОЖЕ спектрларида эса бор йўғи 8-10 элементлар аниқланди. Бироқ, тўлиқ миқдорий анализ ўтказиш учун, қатор факторларни, хусусий ҳолда, электронга мойиллиги, чангланиш коэффициенти, ионланиш потенциали, атом ўлчами ва б.қ. ларни ҳисобга олиш зарур бўлади.

5. ДАЖ Узкабел ва ОТМК да ишлаб чиқарилган мис ва алюмин катанкаларининг сирт ва сиртости қатлами таркибининг солиштирма анализи ўтказилди. Мис катанкасида Fe, Mg, Sn ва Ag киришмаларининг 0,8–1 мкм чуқурликгача концентрацияси профили бир хил бўлмаган характерга эга бўлиб, бу катанкаларни олиш технологияси ва эриш температураси таъсирида ҳар хил элемент атомларининг харакатчанлигига ва қайта ишлаш (чўзиш), ҳамда уларнинг матрица атомлари билан кимёвий бирикмалар ҳосил қилишга бўлган фаоллиги билан боғлиқлиги аниқланди.

6. Қийин эрувчи W ва Mo саноат металларида, ҳатто юқори температурали тозалашдан сўнг ҳам вакуумда кўп киришма элементлар

атомлари (Na, Al, Si, K, Cr, Fe ва б.қ.) қолиши аниқланди. Киришма атомлар чўққиларининг интенсивлиги сиртни 2,5–3 мкм чуқурликгача емирилиши билан монотон камайиб боради. Кейинчалик уларнинг интенсивликлари деярли ўзгармайди.

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

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

МУХТАРОВ ЗИЯДУЛЛА ЭРГАШЕВИЧ

СТИМУЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ИОННОЙ ЭМИССИИ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И НАГРЕВОМ

01.04.04 – Физическая электроника

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

Ташкент–2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2018.3.PhD/FM277.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

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

Научный руководитель:	**Исаханов Зинаобидин Абилпейзович,** доктор физико-математических наук
Официальные оппоненты:	**Ташмухаммедова Дилноза Артикбаевна,** доктор физико-математических наук, профессор
	Максимов Сергей Евлантиевич, кандидат физико-математических наук
Ведущая организация:	**Национальный университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится «____» _____2019г. в ____часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 по присуждению ученых степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз (адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (99871) 262–32–54, e-mail: info@iplt.uz.

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

Автореферат диссертации разослан «____» _____ 2019 года.
(Реестр протокола рассылки ____ от «_____» _____ 2019 года).

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

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

Б.Е.Умирзаков,
председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время во всем мире вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС) широко используется для анализа поверхности и объема материалов различной природы. Известно, что эмиссия нейтральных распыленных частиц с поверхности при ионной бомбардировке на 10^2–10^4 больше, чем эмиссия заряженных распыленных частиц. Поэтому для стимулирования вторичной ионной эмиссии (ВИЭ) и соответственно для увеличения чувствительности метода ВИМС применяются различные способы стимулирования. Для стимулирования вторичной положительной ионной эмиссии (ВПИЭ) на поверхность бомбардируемого твердого тела осаждают электроотрицательные атомы различных элементов, в частности кислорода или йода, а для стимулирования вторично-отрицательной ионной эмиссии (ВОИЭ) осаждают электроположительные атомы различных элементов, в частности атомы щелочных металлов.

В последние годы во многих научных центрах мира особое внимание уделяется использованию указанных выше методов для стимулирования как ВПИЭ, так и ВОИЭ. Однако возникла проблема сохранения степени покрытия поверхности атомами-активаторами на время эксперимента, необходимое для получения достаточных данных. При реализации метода ВИМС поверхность мишени бомбардируется пучком ионов, и часть атомов из адсорбированного слоя распыляется и слетает с поверхности.

В последнее время в Республике Узбекистан активно проводятся научно-исследовательские работы по актуальным проблемам физики поверхности твердых тел, связанным с определением примесного состава и количественного анализа материалов, необходимых для микро- и наноэлектроники. Поэтому в последнее время разработаны методы и приемы непрерывного осаждения на поверхность атомов-активаторов во время бомбардирования ионным пучком. Однако в этом случае проблематично сохранение степени покрытия поверхности различными активаторами, которые обеспечивали бы постоянство работы выхода поверхности. Для этого необходимо устройство для подачи атомов активаторов на поверхность твердого тела на время эксперимента. Кроме того, при применении этого метода необходимо проводить сложные расчеты, позволяющие оценить поток частиц активатора на поверхность твердого тела и их обратный отлет с поверхности при ионной бомбардировке. Эти расчеты выполняются с помощью параметров пучка бомбардирующих ионов и потока активатора, падающего на поверхность. Очевидно, следить за постоянством этих параметров во время проведения эксперимента очень сложно, а зачастую невозможно. Поэтому разработка методики, позволяющей получить минимальную и стабильную работу выхода поверхности исследуемых образцов при снятии масс-спектров отрицательных ионов, является актуальной проблемой современного электронного материаловедения.

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

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

Степень изученности проблемы. Исследования по увеличению чувствительности ВИМС методом уменьшения работы выхода поверхности проводятся более 50 лет. Огромный интерес для исследователей в этой области науки представляет изучение элементного состава, структуры и физических свойств материалов. Первые работы по уменьшению работы выхода поверхности (1970–1980) проводились в Институте электроники АН РУз, в лаборатории «Ионного распыления» А.Х. Аюхановым и его учениками. Эту работу продолжили ученые Института электроники под руководством профессоров А.А. Алиева, Н.Х. Джемилева. Зарубежные ученые М. Пруттон, Г. Слодзиан, М.Л. Йу, Бернхеим и др. позволили получить богатую информацию об особенностях этого явления, на основании которой был сделан ряд новых выводов о закономерностях отрицательно-ионного распыления и возможностей его применения. В этих работах для уменьшения работы выхода (еφ) сначала использовали метод осаждения на поверхность атомов электроположительных металлов. Следующим шагом подобных исследований были масс-спектры, полученные при бомбардировке ионами щелочных металлов с таким расчетом, что на поверхности всегда имелся приблизительно один монослой атомов бомбардирующего металла. Для увеличения времени сохранения постоянства минимальной работы выхода в данной работе был использован новый метод стимулирования ВОИЭ, основанный на имплантации ионов щелочных металлов в поверхностный слой твердого тела с последующим его нагревом.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа. 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), № ФА-Ф2-Ф102 «Ориентационная зависимость потери энергии ионами и электронами при прохождении их через твердое тело различной модификации» (2007–2011), № Ф2-ФА-Ф161 «Механизмы формирования свободных тонких пленок (Al, Cu, Ag и Me-Si) и наноразмерных гетероструктур, созданных на поверхности кристаллов (W, WO_n, TiN, CdTe, SiO_2) методом ионной имплантации, и изучение их физико-химических свойств» (2012–2016) и № ОТ-Ф3-13. «Механизмы формирования свободных многослойных нанопленочных структур кремний–силицид–металл и изучение их электронной и кристаллической структуры» (2017–2020).

Целью диссертационной работы являются разработка эффективного метода стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии имплантацией ионов щелочных металлов в приповерхностные слои твердого тела в сочетании с отжигом и проведение предварительного полуколичественного анализа элементного состава поверхности исследуемых образцов.

Задачи исследования:

модернизировать и усовершенствовать экспериментальную установку ВИМС для исследования спектров, распыленных положительных и отрицательных ионов по современным требованиям масс-спектрометрического анализа;

изучить в идентичных условиях эксперимента закономерности формирования масс-спектров положительно и отрицательно заряженных частиц, распыленных с поверхности материалов различной природы (металлы Cu, Al, Mo, W, п/п Si и диэл. SiO_2, WO_2) ионами Cs^+;

определить оптимальные режимы (энергия и дозы ионов, температура прогрева) и типы ионов для стимулирования ВОИЭ, основанного на имплантации ионов щелочных металлов в сочетании с отжигом;

изучить взаимосвязь между температурой прогрева и увеличением интенсивности пиков распыленных отрицательных частиц. Определить наименьшее значение еφ, при котором происходит максимальная ионизация распыленных частиц;

изучить профили распределения примесных атомов по глубине стандартных и промышленных образцов. Провести полуколичественный анализ состава поверхности с использованием метода стимулирования ВОИЭ. Полученные данные сравнить с результатами ЭОС.

Объектом исследования являются стандартные и промышленные образцы Cu, A1, Mo, W, WO_2, Si, Si-Me, пленки $Si0_2$.

Предметом исследования являются стимулирование вторичной отрицательной ионной эмиссии с целью увеличения чувствительности метода ВИМС, позволяющей получить минимальную и стабильную работу выхода поверхности исследуемых образцов, а также закономерности формирования масс-спектров положительно и отрицательно распыленных заряженных частиц.

Методы исследования. Вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС) отрицательных и положительных ионов, электронная оже-спектроскопия (ЭОС).

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

разработан и предложен эффективный метод стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии, основанный на имплантации ионов электроположительных металлов в приповерхностный слой твердого тела и последующем его нагреве. Обнаружено, что в идентичных условиях ВИМС отрицательных ионов дает более полную информацию о составе примесных атомов исследуемых материалов относительно ВИМС положительных ионов;

установлены оптимальные условия ионной имплантации и отжига, приводящие к максимальному уменьшению $e\varphi$ поверхности и максимальному увеличению выхода отрицательных ионов. Показано, что при $e\varphi=1.9\div2$ эВ интенсивность пиков всех элементов достигает максимального значения;

выявлена взаимосвязь между изменениями работы выхода и концентрации эмитированных с поверхностных слоев отрицательных ионов. В частности, показано, что при отжиге в вакууме Mo, имплантированного ионами Cs^+ с E_0=15–20 кэВ, работа выхода поверхности уменьшается до 1.9 эВ, а при отжиге в атмосфере кислорода до 1.8 эВ;

вычислено концентрационное количество элементного и химического состава поверхности стандартных и промышленных материалов различной природы с использованием метода стимулирования ВОИЭ. Показано, что стимулирование ВОИЭ позволяет определить наличие ряда примесных атомов, которые невозможно обнаружить другими методами ВИМС и ОЭС;

получены концентрационные профили распределения примесных атомов по глубине промышленных образцов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: предложенный метод стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии имплантацией ионов щелочных металлов в поверхностный слой твердого тела и последующим его нагревом позволяет обнаружить наличие примесных атомов с точностью до 0,0001 ат.%;

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

Достоверность результатов исследований 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 способом. Результаты и выводы основаны на базовых

положениях современных теоретических и экспериментальных работ о физических механизмах взаимодействия заряженных частиц с кристаллами.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Разработанный способ стимулирования ВОИЭ может быть использован для определения с высокой точностью элементного состава материалов различной природы, используемых в приборах микро-, опто- и наноэлектроники. Новый подход к стимулированию эмиссии отрицательных заряженных частиц вносит важный вклад в теорию распыления заряженных и нейтральных частиц с поверхности твердых тел при ионной бомбардировке.

Модернизированный прибор и предложенный метод оценки концентрации атомов очень перспективны для проведения сертификации материалов, выпускаемых различными промышленными предприятиями. Полученные результаты по определению элементного состава поверхности и приповерхностных слоев могут применяться при производстве промышленных катанок Cu, Al, W и Mo, которые производятся на предприятиях ОАО УзКТЖМ, ГАО Узкабель, АГМК.

Внедрение результатов исследования. На основе применения эффективного метода стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии имплантацией ионов активных металлов в поверхностные слои материалов:

экспериментальные результаты, полученные по исследованию стимулирования ВОИЭ предварительной имплантацией ионов щелочных металлов в поверхностный слой твердого тела с последующим его нагревом, и определение типа, энергии, дозы ионов и температуры прогрева, которые позволяют обеспечить стабильную минимальную работу выхода поверхности, использованы в зарубежных журналах для определения концентрации очень малых примесных атомов на поверхности и в приповерхностных областях твердых тел (Applied Physics 118, 073303 (2015), IF: 2.101; Technical Physics, 2015, V.60, № 4, pp. 621-623, IF: 0.702; Docteur en sciences de L'UNIVERSITE Paris XI, Orsay, Yang XIANG, 2012 и т.д.). Использование научных результатов позволило определить концентрации очень малых (0,0001 ат.%) примесных атомов на поверхности и в приповерхностных областях материалов различной природы;

результаты исследования по стимулированию эмиссии отрицательных ионов, уменьшению работы выхода поверхности и количественный анализ элементного состава образцов использованы в указанном ниже проекте для получения пучков кластерных ионов, а также при изучении профиля распределения атомов по глубине в различных материалах: № ФА-Ф2-Ф162 «Взаимодействие многоатомных частиц с поверхностью твердого тела» (Справка № 2/1255-728 Академии наук Республики Узбекистан от 14 марта 2019 года). Использование научных результатов во вторичном масс-спектрометре при взаимодействии частиц энергией 4–20 кэВ с поверхностью позволяет изучить происходящие вторичные процессы, «молекулярные»

эффекты, то есть вторичные нелинейные неаддитивные процессы при бомбардировке пучками кластерных ионов, и получать кластерные ионы, используемые для бомбардировки Au_m^-(m=1-9), Si_m^-(m=1-6), C_m^-(m=1-12), Bi_m^-(m=1-10) при исследовании. Использование научных результатов позволило получить профили распределения атомов по глубине исследуемых материалов.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были обсуждены на 7 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По материалам диссертации опубликован 21 научный труд, из них 6 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, 15 тезисов в изданиях международных и республиканских научно-практических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков опубликованных работ и использованной литературы. Работа содержит 134 страницы машинописного текста, включая 46 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определено соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, приведена степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении в практику результатов исследования и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе дается «**Обзор экспериментальных работ по увеличению чувствительности ВИМС и возможности использования этого метода для количественного анализа состава поверхности твердых тел»**. Анализ литературы показал, что в настоящее время для этих целей используется несколько методов.

Одним из способов количественного анализа является использование эталонных образцов. Однако этот метод имеет ряд ограничений. Во-первых, для ряда многокомпонентных материалов создать эталонные образцы практически невозможно. Во-вторых, даже в эталонных образцах в процессе ионной бомбардировки концентрация различных атомов по глубине существенно меняется.

Другим методом увеличения чувствительности ВИМС является метод стимулирования ВПИЭ и ВОИЭ путем напыления атомов или ионной

имплантации, которые приводят к резкому изменению работы выхода поверхности. Однако эти методы тоже не получили широкого распространения, так как при их использовании для стимулирования как ВПИЭ, так и ВОИЭ возникла проблема сохранения степени покрытия поверхности атомами-активаторами на время, необходимое для получения достаточных данных. При реализации метода ВИМС поверхность мишени бомбардируется пучком ионов и соответственно адсорбированный слой распыляется и слетает с поверхности. На основе проведенного критического анализа теоретических и экспериментальных работ сформулированы основные задачи диссертации.

Во второй главе описываются **«Экспериментальная установка, подготовка ее к измерениям и методика проведения эксперимента»**. Нами была использована установка ВИМС на базе усовершенствованного стандартного масс-спектрометра МИ-1201Б. Создан и налажен аналитический прибор: вторичный ионный масс-спектрометр с достаточно большой (10^5–10^6) чувствительностью и разрешающей способностью по массам. С помощью этой установки можно снять как положительные, так и отрицательные масс-спектры. Пучок положительно заряженных ионов цезия (Cs^+) получали путем поверхностной ионизации щелочно-галоидной соли CsCl в ионном источнике. Энергия первичного ионного пучка варьировалась в области 3–20 кэВ. Ионно-оптическая система установки была усовершенствована для изучения масс-спектров отрицательных и положительных ионов щелочных металлов. Пучок ионов щелочных металлов, сформированный ионной пушкой, бомбардирует изучаемый образец. Образец, испаритель, нагреватель образца и термопара установлены в специальной коробке, изготовленной из танталовой пластинки. Распыленные с поверхности мишени ионы направляются к масс-анализатору с помощью фокусирующей, вытягивающей, ускоряющих и отклоняющей линзы. Показано, что метод стимулирования ВОИЭ примерно на два порядка повышает чувствительность масс-спектрометра и дает возможность проводить полуколичественный элементный анализ поверхности исследуемого материала.

Третья глава посвящена **«Выбору ионов-активаторов, определению оптимальных условий ионной имплантации и отжига, позволяющих получить стабильную минимальную работу выхода поверхности при снятии полных спектров ВОИЭ»**. Здесь приводится сравнительный анализ выхода вторичных отрицательных ионов с поверхности образцов Al, Cu, Mo, W, WO_2, Si-Me, Si и SiO_2, стимулированных различными способами**.**

Исследована ионно-ионная эмиссия с чистых поверхностей различных металлов и полупроводников. Начальный элементный и химический состав бомбардирующих ионов варьировался в интервале 5–10 кэВ, ток первичного пучка составлял порядка 10^{-9}–10^{-10} А/см^2. Были сняты масс-спектры положительно и отрицательно заряженных частиц с чистых поверхностей

изучаемых образцов. Поверхность образцов очищалась нагревом вплоть до температуры плавления. Вакуум в рабочей камере был в пределах 10^{-8} Торр. Для всех исследуемых образцов были сняты масс-спектры положительно и отрицательно заряженных распыленных частиц, полученные при бомбардировке их поверхности пучком ионов цезия энергией E=6,7 кэВ. Все масс-спектры были получены при одинаковых условиях эксперимента и усилениях измерительного тракта.

Анализ показал, что в масс-спектре отрицательно заряженных распыленных частиц количество и интенсивность максимумов различных элементов много больше таковых, чем в масс-спектре положительно заряженных распыленных частиц с поверхности. В частности, в спектре ВОИЭ Cu обнаруживаются дополнительные максимумы F, K, Ca, As, Zn. Обнаруженный экспериментальный факт связан с тем, что при бомбардировке поверхности меди пучком ионов цезия на ней присутствуют адсорбированные атомы цезия, так как коэффициент прилипания их к поверхности близок к единице. Это снижает работу выхода поверхности и соответственно стимулирует ВОИЭ. Однако в процессе исследования ВОИЭ нами замечено, что интенсивность максимумов в спектре отрицательно заряженных частиц нестабильна во времени, что, очевидно, связано с изменением числа адсорбированных атомов при ионной бомбардировке. Для устранения данной проблемы мы выдвинули идею о том, что исследуемый образец должен заранее имплантироваться ионами щелочных металлов до накопления определенной дозы, например, до 10^{18}–10^{19} атом/см^3, и при исследовании ВОИЭ нагреваться до определенной температуры, при которой на поверхности сохраняется оптимальное покрытие адсорбированных атомов щелочных или щелочноземельных металлов. Последнее должно оцениваться по достижении максимума (пика) интенсивности элемента с малым электронным сродством, например, магния в спектре ВОИЭ.

Выяснено, что в случае предварительно имплантированного образца можно найти такой предел температуры нагрева, когда ВОИЭ становится максимальной и стабильной на достаточно большое время. В этом случае на поверхности присутствует оптимальное покрытие из адсорбированных атомов цезия, при котором ее работа выхода минимальная и стабильна за счет постоянной диффузии имплантированных атомов из объема образца на поверхность. Последнее, в свою очередь, приводит к постоянному возобновлению покрытия поверхности адсорбированными атомами цезия в процессе непрерывного распыления её ионной бомбардировкой. Установлено, что при таких условиях поверхности заранее имплантированного образца, т.е. когда ее работа выхода минимальна (для молибдена 1,9 эВ) и стабильна во времени, наблюдается максимальное стимулирование ВОИЭ, и соответственно выход отрицательных заряженных частиц с такой поверхности становится максимальным. Для оценки этого факта применен метод детектирования нейтральных частиц, рассеянных и распыленных поверхностью. Показано, что в указанных выше условиях

поверхности, т.е. для предварительно имплантированного щелочными ионами и нагретого образца, эмиссия нейтральных частиц уменьшается до минимума.

Наши дальнейшие исследования были направлены на выбор типа иона, определение оптимальной энергии и дозы ионов, а также температуры нагрева. Наибольшее уменьшение eφ поверхности наблюдалось при использовании ионов Cs^+ и Ba^+.

На рис. 1 приведены зависимости работы выхода eφ от температуры нагрева для образцов Mo, легированных ионами Ba^+ и Cs^+ с разными энергиями, при дозе насыщения Д~$6\cdot10^{16}$ $см^{-2}$.

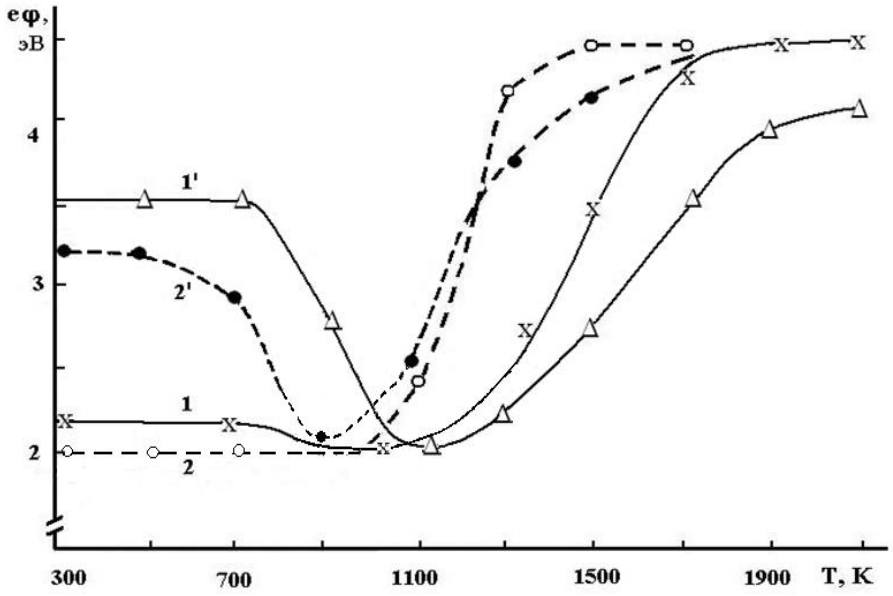


Рис. 1. Изменение работы выхода поверхности от температуры нагрева для Mo, имплантированного ионами $Ba^+(1,1^1)$ и $Cs^+(2,2^1)$, при Д=$6\cdot10^{16}$$см^{-2}$ с разными энергиями: 1, 2 – E_0=0,5 кэВ; 1^1, 2^1 – E_0=5 кэВ

Прогрев при каждой температуре продолжался в течение 30 минут. Измерения проводились после остывания мишени. Видно, что изменение eφ ионно-легированного Mo при термообработке зависит от энергии бомбардирующих ионов. При низких энергиях ионов значение eφ до T≈700–800 K практически не меняется. Дальнейшее увеличение температуры для Mo, легированного ионами Cs^+, приводило к быстрому росту eφ до 3,5–4 эВ, а для Mo, легированного ионами Ba^+, кривая eφ(T) проходит через небольшой минимум в области T=900–1000 K. По-видимому, в случае Ba^+ на поверхности образуется пленка толщиной больше, чем d=0,5–1 монослоя. После прогрева при T=900–1000 K из-за частичного испарения Ba с поверхности толщина пленки уменьшается до оптимальной. В интервале T=1100–1600 K работа выхода возрастает от ~2 эВ до ~4 эВ. При высоких энергиях ионов кривая eφ(T) проходит через минимум: в случае Cs^+ при T=850–900 K, а в случае Ba^+ при T=1000–1100 K.

Однако анализ спектров ВОИЭ показал, что при низких энергиях E<5 кэВ и высоких дозах (Д>10^{16} $см^{-2}$) ионов, хотя eφ образцов резко уменьшается

и они выдерживают значительные токовые и температурные нагрузки, их поверхностная область сильно обогащается атомами легирующей примеси (до 30-40 ат.%). Это существенно влияет на состав и структурные свойства поверхностных слоев, а в некоторых случаях может привести к образованию химических соединений (например, в случае кремния). Влияние внедренных атомов будет несущественным, если их концентрация меньше $\leq 10^{20}$ ат·см$^{-3}$. Такая концентрация достигается только при E_0>10 кэВ. В частности, концентрация Cs в случае имплантации Mo с E_0=14–15 кэВ в приповерхностном слое составляла всего 1–2 ат.%. Прогрев ионно-легированного Mo образца приводил к перераспределению атомов Cs. Оптимальная температура, при которой наблюдается уменьшение eφ до минимума, лежала в пределах 850–900 К. На рис. 2 приведены зависимости $C_{Cs}(d)$, полученные после прогрева при T=800 К Mo, имплантированного ионами Cs^+ с разными энергиями. Отметим, что увеличение энергий ионов до 20–25 кэВ приводило к увеличению интенсивности распыления поверхности и повышению температуры нагрева до 1000–1100 К для ионов Cs^+, 1300–1400 К для ионов Ba^+. При этом максимального уменьшения eφ не наблюдалось. Нами установлено, что оптимальная энергия ионов предварительного легирования лежит в пределах 10–15 кэВ. Наибольшее уменьшение работы выхода наблюдалось при прогреве ионно-имплантированного образца в атмосфере кислорода. Прогрев в атмосфере кислорода Mo, имплантированного ионами Cs^+, приводил к уменьшению eφ до 1,65–1,7 эВ.

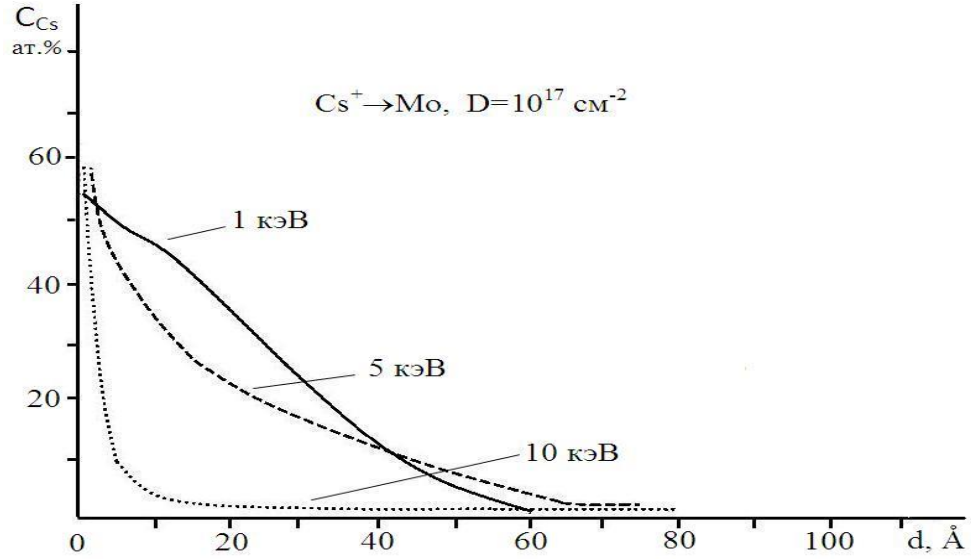


Рис. 2. Влияние прогрева при T=800 К на профиль распределения Cs по глубине для Mo, имплантированного ионами Cs^+ с разными энергиями

На рис. 3 приведена зависимости интенсивности выхода отрицательных ионов Cu^- (I_{Cu}) от температуры и работы выхода промышленного образца Cu. Видно, что резкое увеличение интенсивности пика Cu^- наблюдается при температуре 800–900 К, что объясняется максимальным выходом отрицательных ионов Cu. Дальнейшее увеличение

температуры приводит к уменьшению интенсивности Cu, что связано с уменьшением атомов Cs на поверхности.

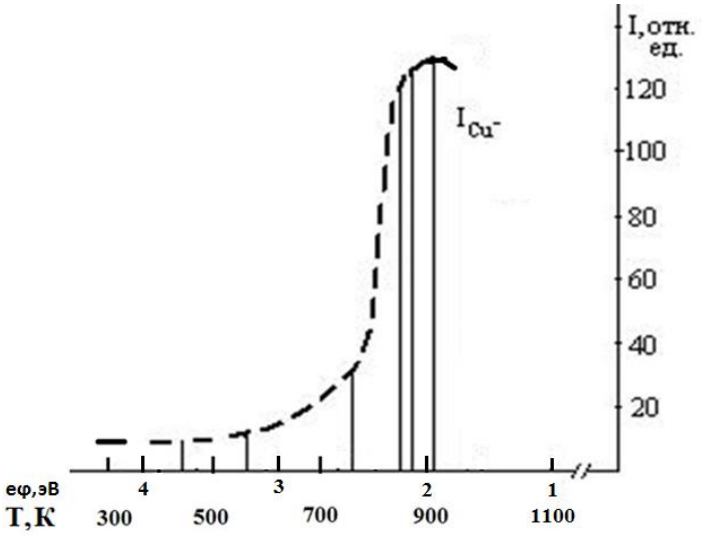


Рис. 3. Зависимости интенсивности выхода отрицательных ионов меди (I_{Cu}) от температуры и работы выхода. Спектры сняты при бомбардировке Cu ионами Cs^+ с E_0=6,7 кэВ

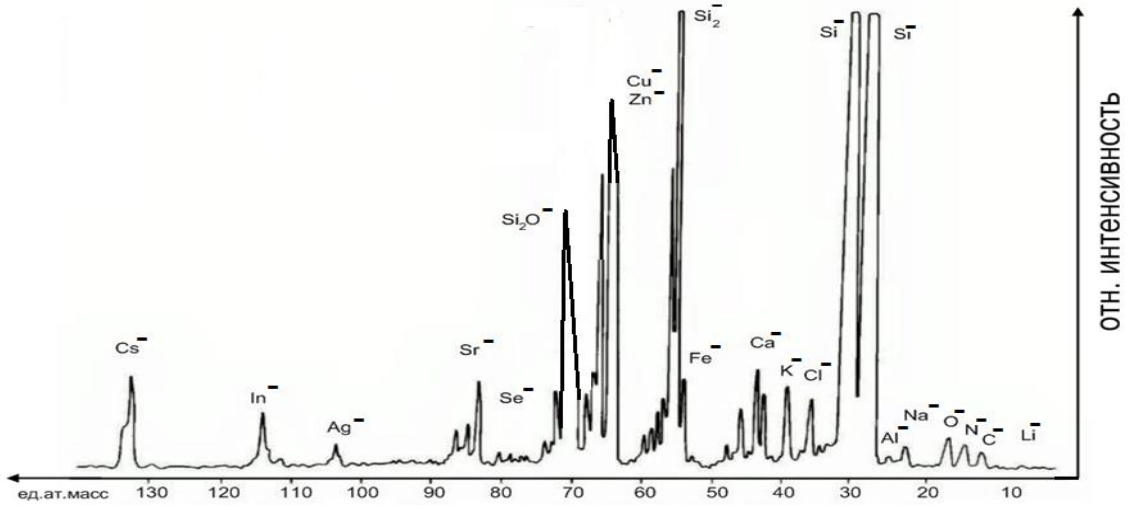


Рис. 4. Масс-спектр ВОИЭ хорошо очищенного кремния со сниженной работой выхода. E_0 = 6,7 кэВ

В качестве примера на рис. 4 приведен спектр ВОИЭ хорошо очищенного кремния со сниженной работой выхода, достигнутой путем ионной имплантации цезия в поверхностный слой и последующего нагрева. Анализ этого спектра позволяет сделать вывод, что стимулирование ВОИЭ позволяет обнаружить практически атомы всех элементов, содержащихся на поверхности исследуемого образца. В частности, ранее наличие Ag, Sr, Fe на поверхности хорошо очищенного Si не обнаружено.

Мы попытались применить метод стимулирования ВОИЭ для проведения количественного элементного анализа поверхности твердого тела. Для этого снимались масс-спектры отрицательно заряженных распыленных частиц с поверхности, обладающей минимальной работой

выхода в результате обработки ее ионной имплантацией и нагревом. С помощью масс-спектров измеряются интенсивности пика иона базового (основного) элемента, например, для меди (H_{Cu}), и пиков всех обнаруживаемых элементов и находят их сумму (H):

$$H = \sum h_{C\,u} + h_{Fe} + h_{Zn} + h_{S\,i} + h_{T\,i} + h_{Mg} + h_{Ca} + \ldots. \qquad (1)$$

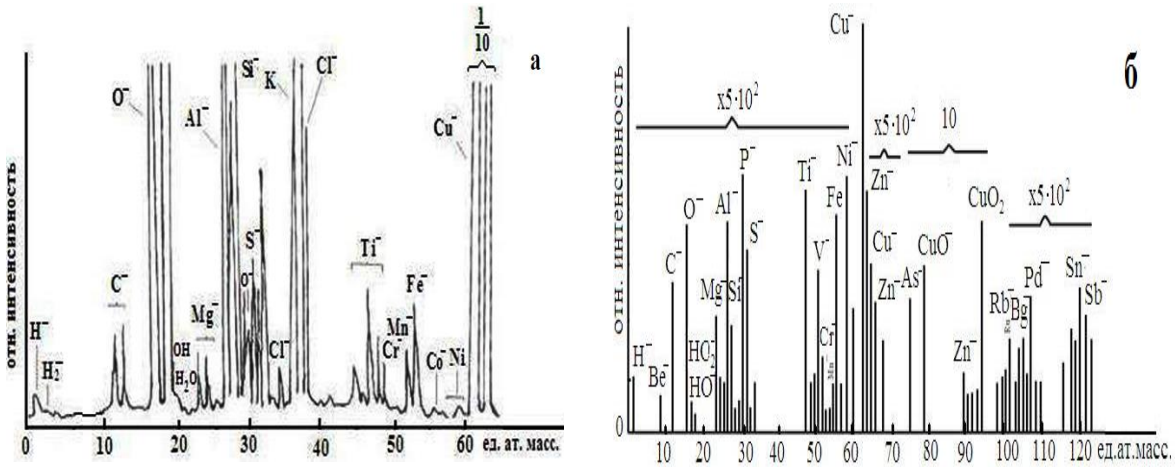
Приравняв сумму интенсивностей этих пиков к 100%, так как в указанных условиях поверхности нейтральные распыленные частицы с нее не эмитируются и, следовательно, можно найти количество интересующей нас примеси (в ат.%), например, примеси железа (Fe) в медном образце, с помощью следующей формулы:

$$X_{Fe} = (h_{Fe} / H) \times 100\% \qquad (2)$$

Результаты расчета показали, что концентрация железа в меди равна 0.0027 ат. %.

В четвертой главе приводятся **«Результаты экспериментальных исследований по определению элементного и химического состава поверхности и приповерхностных слоев промышленных образцов Al, Cu, W, Mo»**.

Анализ спектров ВОИ промышленных образцов со сниженной работой выхода (eφ=1,9 эВ), достигнутой путем ионной имплантации цезия в поверхностный слой и последующего нагрева (до Т=900 К), показал, что в них содержится ряд максимумов, которые не обнаруживаются в масс-спектрах положительно и отрицательно заряженных распыленных частиц. В качестве примера на рис. 5 приведены масс-спектры для медной катанки производства АГМК и Узкабель, не подвергнутой специальной очистке. Однако как для получения сверхвысокого вакуума, так и для уменьшения eφ до минимума после ионной имплантации образцы прогревались до температуры 700–800 К.



а – масс-спектр медной катанки производства Узкабель; б – масс-спектр медной катанки производства АГМК.

Рис. 5. Масс-спектры отрицательно заряженных распыленных частиц поверхности медной катанки под действием пучка ионов цезия энергией E_0=6.7 кэВ

Проводился также полуколичественный анализ элементного состава поверхности методом, приведенным в разделе 3.4. В табл. 1 приведены концентрации атомов основных и примесных элементов, обнаруженных на очищенных поверхностях Cu и Al, при использовании методов ОЭС и ВИМС.

Таблица 1

Концентрация атомов на поверхности хорошо очищенных образцов Cu и Al

Метод	Концентрация атомов основных и примесных элементов, ат.%								
Cu	Cu	P	S Cl	C Ca	O Fe	Ni Ag	Mn Se	As Pb	Sn Zn
ОЭС	97,1	0,2	0,19 0,018	1,1 0,3	0,482 0,36	0,25			
ВИМС	98,8	0,001 9	0,003 2 0,120 3	0,1262 0,025	0,0512 0,0044	0,0376 0,0292	0,001 0,0015	0,0018 0,0024	0,0275 0,0028
Al	Al	Fe	Zn Ti	Mn Si	Cr Cu	Mg O	C		
ОЭС	99,42	0,330	0,032 0,015	0,030 0,123	0,020	0,030			
ВИМС	99,55	0,063	0,045 0,007	0,005 0,082	0,005 0,010	0,005 0,005	0,012		

Спектры сняты при одинаковых условиях эксперимента. Видно, что ВИМС позволяет обнаружить не только большее количество элементов по сравнению с ЭОС, но и определить более точные количественные данные.

На рис. 6 приведены масс-спектры отрицательных ионов для хорошо очищенной поверхности медной катанки.

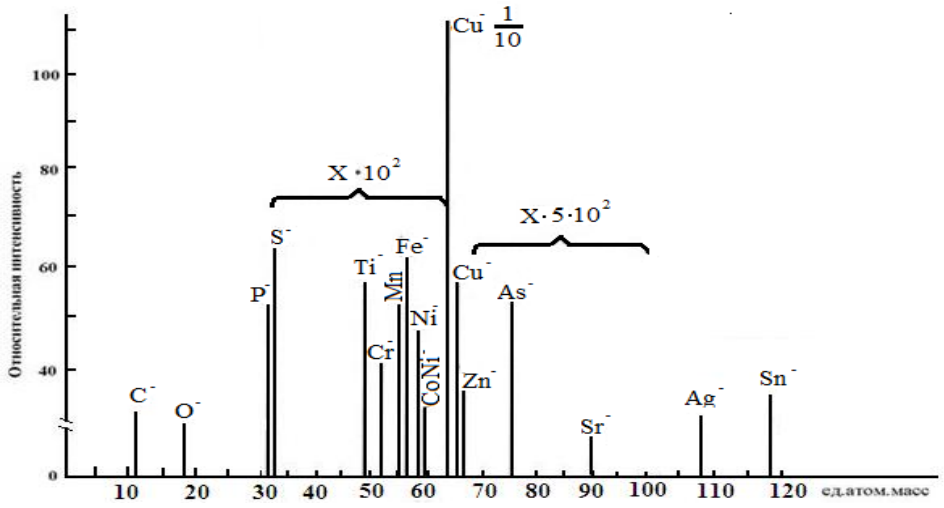


Рис. 6. Масс-спектр ВОИЭ хорошо очищенной медной катанки. E_0=6,7кэВ

Окончательная очистка поверхности осуществлялась при T=1000 K. Видно, что в спектре практически отсутствуют пики H, HO, H_2O, Be, CuO, а также резко уменьшены интенсивности пиков C и O. При этом концентрация меди на поверхности составляет почти 99,9 ат.%. Однако даже на хорошо очищенной поверхности медной катанки присутствуют примесные атомы более десяти элементов: Ba, Pd, Si, As, Zn, S, P, O, C, Fe, Ne, Sn, Ag. Показано, что наличие атомов Fe, Ni, Si, Ag ухудшает электропроводность медной катанки. Изучены профили распределения атомов примесных элементов по глубине. Установлено, что концентрации ряда примесных элементов по глубине изменяются неравномерно, т.е. если на определенной толщине концентрация одной примеси больше, то на другой она меньше. Такой характер профиля распределения примесных элементов медной катанки, по нашему мнению, обусловлен технологией получения меди и подвижностью атомов различных элементов под действием температуры плавления и обработки (растяжки) медной катанки, а также активностью их к химическим соединениями с атомами меди. Аналогичные результаты получены для промышленных образцов Al.

Промышленные образцы (проволоки) тугоплавких металлов широко используются в приборах электронной техники, в частности в качестве катодов электровакуумных приборов. Качество этих материалов зависит от концентрации примесных атомов на поверхности и их распределения в приповерхностном слое. Перед исследованием эти образцы очищались высокотемпературным прогревом (W – до температуры 2800 K, Mo – 2500 K) при вакууме не хуже, чем 10^{-9} мм рт.ст. Масс-спектр для вольфрамовой проволоки УзКТЖМ представлен на рис. 7.

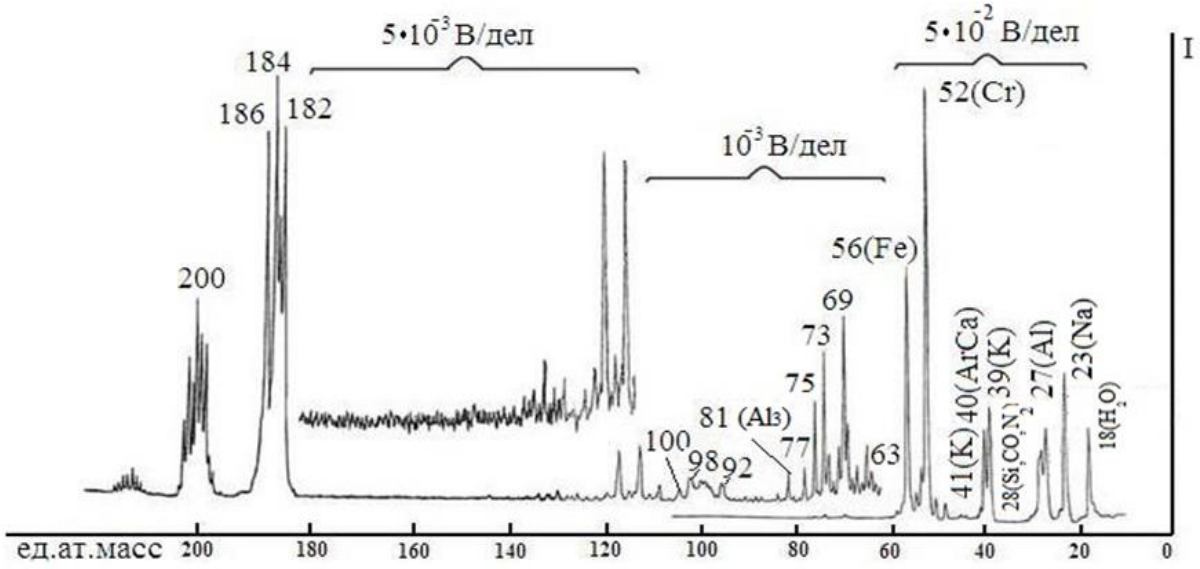


Рис. 7. Масс-спектр промышленного образца W (ОАО УзКТЖМ)

В спектре обнаруживаются пики, соответствующие однократно-заряженным ионам с массовыми числами 18(H_2O), 23(Na), 24(Mg), 27(Al), 28(Si, CO, N_2), 39(K), 40(Ar, Ca), 41(K), 52(Cr), 54(Al_2), 56(Fe), 63(Cu), 65(Cu), 68, 73, 75, 77, 81(Al_3), 83, 92(Mo), 94(Mo), 95(Mo), 96(Mo), 97(Mo), 98(Mo), 100(Mo), 182(W), 183(W), 184(W), 186(W), 198-203(WO).

Однако анализ показал, что поверхность хорошо обезгаженного W обладает высокой чистотой. Концентрация всех примесных атомов в сумме не превышает 0,5–1 %. Изучение профиля распределения примесных атомов по глубине W и Mo показало, что для всех элементов сначала с ростом глубины наблюдается спад интенсивности пиков. Элементный состав стабилизируется на глубине ~ 3 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования, проведенного по теме «Стимулирование вторичной отрицательной ионной эмиссии материалов различной природы имплантацией ионов щелочных металлов и нагревом», сделаны следующие выводы.

1. Модернизован вторично-ионный масс-спектрометр, позволяющий проводить исследования элементного и химического состава в условиях постоянной минимальной работы выхода поверхности материалов различной природы. Использован эффективный метод стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии, основанный на имплантации ионов электроположительных металлов в приповерхностный слой твердого тела и последующем его нагреве.

2. Установлено, что после внедрения в образец ионов Cs^+, работа выхода поверхности исследуемых образцов уменьшается до 1,9 эВ. Установлено, что оптимальная энергия ионов Cs^+ лежит в пределах 15–20 кэВ, а доза – Д~$(1\text{-}5)\cdot10^{16}$ ион·см$^{-2}$. При этом концентрация имплантированных ионов в приповерхностном слое составляет $\leq10^{19}$ см$^{-3}$, что

не существенно влияет на элементный состав этого слоя. Температурная активация ионно-имплантированных образцов в атмосфере кислорода приводит к уменьшению eφ до 1,8 эВ.

3. Установлено, что при работе выхода (eφ) меньше 1,9÷2 эВ интенсивность отрицательных ионов практически всех основных и примесных атомов увеличивается до максимума. При этом удвоенное значение работы выхода поверхности становится меньше, чем потенциал ионизации распыленного атома, что позволяет увеличить чувствительность ВИМС примерно на два порядка.

4. Проведены полуколичественный анализ элементного состава поверхностных слоев поли- и монокристаллических образцов Cu, Al, W методом ВИМС и сравнение с результатами ОЭС. В масс-спектрах отрицательно заряженных частиц медной и алюминиевой катанок, стимулированных ионами Cs^+, обнаруживаются пики более двадцати элементов. В оже-спектрах обнаруживается всего 8–10 элементов. Однако установлено, что для проведения полного количественного анализа требуется учет ряда факторов, в частности связанные со сродством к электрону, коэффициентом распыления, потенциалом ионизации, размером атома и др.

5. Проведен сравнительный анализ состава поверхности и приповерхностных слоев медной и алюминиевой катанок, произведенных в ГАО Узкабель и АГМК. Профили примесей Fe, Mg, Sn и Ag до глубины 0,8–1 мкм имеют неравномерный характер, что обусловлено технологией получения катанок и подвижностью атомов различных элементов под действием температуры плавления и обработки (растяжки), а также активностью их к химическим соединениям с атомами матрицы.

6. Установлено, что в составе промышленных тугоплавких металлов W и Mo даже после высокотемпературной очистки в вакууме сохраняется большое количество элементов примесных атомов (Na, Al, Si, K, Cr, Fe и др.). Интенсивность пиков примесных атомов по мере травления поверхности монотонно уменьшается до глубины 2,5–3 мкм. Затем их интенсивность практически не меняется.

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

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

MUKHTAROV ZIYADULLA ERGASHEVICH

STIMULATION OF SECONDARY NEGATIVE ION EMISSION DIFFERENT NATURE BY IMPLANTATION OF ALKALINE MENAL IONS AND HEATING

01.04.04 – Physical electronics

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

TASHKENT – 2019

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B2018.3.PhD/FM277.

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

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

Research supervisors:	**Isakhanov Zinaobidin Abilpeyzovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Official opponents:	**Tashmukhammedova Dilnoza Artikbaevna** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
	Maksimov Sergey Evlantiyevich Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Leading organization:	**The National University of Uzbekistan**

Defense will take place on «___» _____2019 at _____ at the meeting of scientific council number DSc.30.05.2018. FM/T.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

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

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

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

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

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

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

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The optimal conditions for ion implantation and annealing to stimulate secondary negative ion emission were established and the following regularities were determined: it was found out that in the case of a pre-implanted sample, it is possible to find such a heating temperature when secondary negative ion emission (SNIE) becomes to maximum and stable for a sufficiently long time. In this case, an optimal coating of adsorbed caesium atoms is present on the surface in which its work function is the most minimal and stable due to the constant diffusion of implanted atoms from the sample volume to the surface. It has been established that under such conditions of the surface of a pre-implanted sample, the yield of neutral sputtered particles from such a surface is practically reduced to zero. On basis of above, under certain conditions, it is possible to conduct a quantitative analysis of the elemental composition of the samples under study by secondary ion mass spectrometry (SIMS) methods.

The aim of the research work. Development of method of secondary negative ion emission stimulation by implantation of alkali metals ions into the surface layer of a solid followed by annealing and study of SNIS application for quantitative analysis of the elemental composition of the surface of complex composition materials.

The objects of research work films and industrial samples of Cu, Al, Mo, W, WO_2, Si, Si-Me, thin film - SiO_2.

The scientific novelty of the research is as follows:

an effective method of stimulating secondary negative ion emission based on the implantation of ions of electropositive metals in the near-surface layer of a solid and its subsequent heating is proposed. It was found that under identical conditions, negative ion of SIMS gives more complete information on the composition of impurity atoms of the investigating materials, relative to the positive ions of SIMS;

optimal conditions for ion implantation and annealing of a maximum decrease of $e\varphi$ and maximum increase in the yield of negative ions which out from the surface were determined. It is shown that at $e\varphi$=1.9÷2 eV the yield of the neutral particles is practically not observed;

the relationship between changes in the work function and concentration, emitted from the surface layers of negative ions is revealed. It is particularly shown that when Mo is annealed in a vacuum implanted by Cs^+ ions with E_0=15-20 keV, the work function of the surface decreases to 1.9 eV and when annealed in an oxygen atmosphere up to 1.8 eV;

a quantitative analysis of the elemental and chemical composition of standard and industrial materials of a different nature using the stimulation method of SNIE. It is shown that the stimulation of the SNIE makes it determine the presence of a number of impurity atoms, which can not be detected by other methods of SIMS and AES;

the concentration profiles of the distribution of impurity atoms over the depth of industrial samples have been studied.

Implementation of the research results. Based on the application of an effective method of stimulating the secondary negative ion emission by implanting active metal ions into the surface layers of materials:

the experimental results obtained in the thesis on the study of stimulation of the SNIE of the preliminary implantation of alkali metal ions into the surface layer of a solid with its subsequent heating and type determination, energy, ion dose and heating temperature, which allow stable minimum work function of surface have been applied in the investigations for providing the minimum work function of surface and developing ionization methods in foreign journals (Applied physics 118, 073303 (2015), IF: 2.101; Technical Physics, 2015, V.60, № 4, pp. 621-623, IF: 0.702; Docteur en sciences de L'UNIVERSITE Paris XI, Orsay, Yang XIANG, 2012 etc.). Using scientific results made it possible to determine the concentrations of very small impurity atoms (0.0001 at. %) on the surface and near-surface regions of materials of different nature;

the results of the research on stimulating the emission of negative ions, decreasing of the surface work function and quantitative analysis of the elemental composition of materials of different nature, were used in the implementation of projects: No. ФА-Ф2-Ф162 “Interaction between polyatomic particles with solid surface” (Reference № 2/1255-728 from 14th March 2019, Academy of Science of the Republic of Uzbekistan).

Using the scientific results in the secondary mass spectrometer in the interaction of particles with an energy of 4–20 keV with the surface give a possibility to study occurring secondary processes, “molecular effects”, i.e. secondary nonlinear non-additive processes during bombardment by cluster ion beams and the production of cluster ions used for the bombing of Au_m^-(m=1-9), Si_m^-(m=1-6), C_m^-(m=1-12), Bi_m^-(m=1-10) during the investigation. The use of scientific results gave the possibility to obtain the distribution of atoms in the depth of the materials under study.

The outline of the thesis. The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion and references including 47 figures and 9 tables. The text of the dissertation is set out on 133 pages of text.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
Список опубликованных работ
List of published works
I бўлим (Часть I; Part I)

1. Алиев А.А., Мухтаров З.Э, Умаров Ф.Ф. Ориентационная зависимость энергетического распределения ионов, прошедших через тонкие кристаллы // Поверхность: рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – Москва, 2004. №8. – С. 10–14.

2. Алиев А.А., Исаханов З.А., Мухтаров З.Э., Рузибаева М.К. Стимулирование вторичной отрицательной ионной эмиссии имплантацией ионов щелочных металлов в поверхностный слой твердого тела и последующего его нагрева // Журнал технической физики, 2010, том 80, вып. 1. – С. 110–116.

3. Исаханов З.А., Мухтаров З.Э., Умирзаков Б.Е., Рузибаева М.К. Оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии // Журнал технической физики, 2011, том 81, №4. С. 117–120.

4. Умирзаков Б.Е., Исаханов З.А., Рузибаева М.К., Мухтаров З.Э., Холматов А.С. Изучения профилей распределения атомов по глубине свободных нанопленочных систем типа Si–Me // ЖТФ, 2015, Т. 85, вып. 4. С. 123–125.

5. Мухтаров З.Э., Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е. Влияние низкоэнергетической имплантации ионов Ba^+ на состав и эмиссионные свойства W и WO_2 // Научно-техн. сборник «Электронная техника ». Серия 1, СВЧ-Техника, выпуск 2(529) 2016. – С .81–85.

6. Isakhanov Z.A., Kodirov T., Halmatov A.S., Ruzibaeva M.K., Muhtarov Z.E., Umirzakov B.E. Effect of Co^+-Ion Implantation on the Composition and Properties of Free Si–Cu Nanofilm Structures // J. of Surface Investigation, X-ray, Sinchrotron and Neutron Techniques. Vol.11, No.1, 2017, P.152-155.

II бўлим (Часть II; Part II)

7. Aliev A.A., Kuramboev K., Muhxtarov Z.E. The method of quantitative elemental analysis of solid using secondary ion mass spectrometry // XXIV ICPEAC – 2005. Argentina. 2005. P.152.

8. Алиев А.А., Курамбаев К., Мухтаров З.Э. Разработка научной основы метода количественного элементного анализа твердых тел с помощью ВИМС // Российская конф. по взаимодействию ионов с поверхностью. – ВИП-2005. – Россия, Звенигород, 2005. – С. 367–370.

9. Мухтаров З.Э., Косимов И.О. Количественный элементный анализ твердых тел с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии // Конф. «Табиий фанларнинг долзарб муаммолари». Самарканд. – 2008. – С. 81-82.

10. Исаханов З.А., Мухтаров З.Э., Рузибаева М.К., Курбанов Р. «Анализ

твердых тел с помощью ВИМС имплантированных ионами щелочных металлов // Труды XIX межд. конф. по взаимодействию ионов с поверхностью. – ВИП-2009, Т. 2, 21–25 августа 2009 года. Россия, Звенигород. – С. 85–88.

11. Исаханов З.А., Мухтаров З.Э., Курбанов Р. Влияние изменения работы выхода поверхности на эмиссию вторичных ионов поликристаллического алюминия // Тез. докл. 5-/ой Респ. конф. по физической электронике, посвящённой 100-летию со дня рождения У.А. Арифова, UzPEC-5, Ташкент, 28 –30 октября, 2009. – С. 76.

12. Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Мухтаров З.Э., Курбанов Р., Донаев С. Влияние ионной имплантации и термической активировки на эмиссию отрицательных ионов из Mo» // XXXXI Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК-2011). Москва, НИИЯФ, МГУ, 31 мая –2 июня 2011 года. – С. 95.

13. Умирзаков Б.Е., Исаханов З.А., Курбанов Р., Мухтаров З.Э. Стимулирование отрицательной ионной эмиссии с поверхности SiO_2 ионной имплантацией в сочетании с отжигом // Сбор. трудов Респ. научно-практ. конф. «Нанотехнология в использов. возобнов. источ. энергии: проблемы и решения», 27-28 апреля 2012 года. КарГУ, Карши. – С. 12-13.

14. Исаханов З.А., Умирзаков Б.Э., Мухтаров З.Э., Раззоков У.Н. Температурные зависимости работы выхода вторичных ионов с поверхностей Mo, имплантированных ионами Ba^+ и Cs^+ // XXXXII Межд. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК). МГУ, Москва, 29–31 мая 2012 года. – С. 87.

15. Исаханов З.А., Кадыров Т., Мухтаров З.Э. Влияние имплантации ионов активных металлов на состав и структуру поверхности поли- и монокристаллов W и WO_n // Труды межд. конф. «Актуальные проблемы физической электроники», 28 ноября 2012 года. Ташкент, ИИПиЛТ АН РУз. – С. 58-59.

16. Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Мухтаров З.Э., Исаханов У.З. Влияние уменьшения работы выхода поверхности W на интенсивность ионизации нейтральных атомов, образующихся при ионной бомбардировке // Межд. конф. по актуальным проблемам молекулярной спектрос. конденсированных сред. 29 –31 мая 2013 года. СамГУ, Самарканд. – С. 109.

17. Исаханов З.А., Кадыров Т., Мухтаров З.Э., Рузибаева М.К. Профили распределения примесных атомов по глубине промышленных образцов молибдена // Межд. конф. по физической электронике, UzPEC-6, Ташкент, 23 –25 октября 2013 года. – С. 98–100.

18. Умирзаков Б.Е., Исаханов З.А., Мухтаров З.Э., Исаханов У.З. Влияния имплантации ионов цезия и последующего отжига на состав, структуру и физические свойства монокристалла молибдена // Межд. конф. по физической электронике, UzPEC-6, Ташкент, 23–25 октября 2013 года. – С. 100–102.

19. Исаханов З.А., Мухтаров З.Э., Умирзаков Б.Е., Рузибаева М.К., Нормурадов М.Т., Исаханов У.З. Оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для стимулирования вторичной отрицательной ионной эмиссии // Труды III Респ. конф. «Актуальные проблемы современной физики и астрофизики», 23 мая 2015 года. КарГУ, Карши. – С. 117.

20. Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Мухтаров З.Э., Курбанов Р. Изменение состава, структуры и физические свойства ионно-легированных образцов W и WO_2 после технологических обработок // XLVI Межд. конф. по ФВЗЧК, МГУ, 31 мая–2 июня 2016 года. Москва. – С. 156.

21. Исаханов З.А., Мухтаров З.Э., Умирзаков Б.Е., Содикжанов Ж.Ш. Сравнительный количественный анализ состава поверхности промышленных образцов тугоплавких металлов методом ЭОС и ВИМС // V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии». ЛАПЛАЗ-2019. – Россия, Москва, 2019. – С. 93-94.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.

Босишга рухсат этилди: ..... 2019 йил.
Бичими 60x84 $^{1}/_{16}$, «Times New Roman» гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3. Адади: 100. Буюртма: №.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.