

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSC.02/30.12.2019.FM/Т.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**
ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

КАХРАМОНОВА ГУЛИСТОН ПАРДАЕВНА

**GaAs, Ta, Tb, Tm ЭЛЕМЕНТЛАРИНИ КЛАСТЕР ВА КҮП ЗАРЯДЛИ
ИОНЛАР БИЛАН БОМБАРДИМОН ҚИЛИНГАНДА ИККИЛАМЧИ
ЭМИССИЯ ЖАРАЁНЛАРИ**

01.04.04 - Физик электроника

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

Тошкент – 2025

УДК 539.104: 537.581: 535.376

**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**

Кахрамонова Гулистан Пардаевна

ГаAs, Та, Tb, Тm элементларини кластер ва кўп зарядли ионлар билан
бомбардимон қилинганда иккиламчи эмиссия
жараёнлари..... 3

Кахрамонова Гулистан Пардаевна

Вторично-эмиссионные процессы при бомбардировке элементов
ГаAs, Та, Tb, Тm кластерными и многозарядными
ионами..... 21

Kakhramonova Guliston Pardayevna

Secondary emission processes during bombardment of elements GaAs, Ta,
Tb, Tm with cluster and multiply charged ions 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 44

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSC.02/30.12.2019.FM/Т.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**
ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

КАХРАМОНОВА ГУЛИСТОН ПАРДАЕВНА

**GaAs, Ta, Tb, Tm ЭЛЕМЕНТЛАРИНИ КЛАСТЕР ВА КҮП ЗАРЯДЛИ
ИОНЛАР БИЛАН БОМБАРДИМОН ҚИЛИНГАНДА ИККИЛАМЧИ
ЭМИССИЯ ЖАРАЁНЛАРИ**

01.04.04 - Физик электроника

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

Тошкент – 2025

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси
Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инноватциялар вазирлиги хузуридаги Олий
аттестация комиссиясида B2025.1.PhD/FM1242 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-саҳифаси
(www.iplt.uz) ҳамда «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталаида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Усманов Дилшадбек Турсунбаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор.

Расмий оппонентлар:

Кутлиев Учкун Отобоевич
физика-математика фанлари доктори, профессор.

Сайдумаров Илхомжон Миралимович
физика-математика фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Тошкент Давлат Техника Университети

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти хузуридаги илмий
даражалар берувчи DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 рақами илмий кенгашнинг 2025 йил «16» декабр
соат 16⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-үй.
Тел./факс: (+998-71) 262-32-64, 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 (№19 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри,
Дўрмон йўли кўчаси, 33-үй. Тел: (+998-71) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2025 йил «02» декабр куни тарқатилди.
(2025 йил «02» декабрдаги № 19 рақами реестр баённомаси)



Х.Б. Ашуров

Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш раиси, техника фанлари
доктори, профессор.

И.Д. Ядгаров

Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш илмий котиби, физика-
математика фанлари доктори,
профессор.

У.К. Махманов

Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
физика-математика фанлари доктори,
профессор.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда наноматериаллар ва нанотехнологияларни ҳар соҳага кенг кўламда жорий этиш хозирги вақтда ривожланиб бормоқда. Замонавий техник тараққиёт учун нанотехнологияларни жорий этишнинг улкан истиқболларидан бири қаттиқ жисмлар сиртини, таҳлил қилишнинг самарали янги ва такомиллаштирилган наноструктуравий усулларини ишлаб чиқиши ва уларни ишлаб чиқишига тадбиқ қилиш катта илмий, амалий аҳамиятга эгадир. Нано-микроэлектроника соҳани ўрганишда масс-спектрометрик ионлашиш усуллари, хусусан, иккиламчи ион масс-спектрометрияси (ИИМС) усули жуда муҳим ўринлардан бири саналади. Кластер ва кўп зарядли ионларни иккиламчи ионлар эмиссиясида қўлланилиши, ушбу соҳанинг янада ривожланишига катта ҳисса қўшади.

Жаҳонда хозирги вақтда кластер ва кўп зарядли ионлар билан қаттиқ жисмларни бомбардимон қилиш, чизиқли тўқнашув каскадларининг нисбатан яхши ўрганилган ҳудудидан чизиқли бўлмаган зич каскадларнинг шаклланиши билан боғлиқ янги эмиссия ҳодисаларини ўрганишга ўтишни кузатиш учун ноёб имкониятни беради. Кластер бомбардимонининг ўзига хос хусусияти шундаки, кластер ионини ташкил этувчи бир нечта атомларнинг бир вақтнинг ўзида кичик (бир неча ангстремлар тартибида) сирт майдонига таъсири натижасида ҳар бир атом томонидан ҳосил қилинган каскадлар интерференциялашади ва чизиқли бўлмаган зич каскадли тўқнашувлар ҳосил бўлади. Бундай ҳолда, ионнинг секинлашиши вақтида юқори энергияни чиқариш зичлиги билан боғлиқ бўлган иккиламчи эмиссия жараёнларида бир қатор янги эфектлар пайдо бўлади. Масалан, кластер ионлари билан бомбардимон қилишга ўтишда йирик молекулалар самарадорлигининг юзлаб ва минглаб марта ортиши, органик ва биоорганик материалларни ИИМС усулидан фойдаланиб таҳлил қилишда нафақат миқдорий, балки сифат жиҳатидан ҳам катта ютуқларга эришишга олиб келади. Шунингдек, кластер ва кўп зарядли ионларининг қаттиқ жисмнинг юзаси билан ўзаро таъсирида кечадиган фундаментал жараёнларни ўрганиш, бу ҳодисанинг физика моҳиятини аниқ тушуниш, шунингдек замонавий технологияларда ундан мақсадли ва тўлиқ фойдаланиш физик электрониканинг долзарб муаммоларидан бири ҳисобланади.

Республикамизда кўп атомли зарраларнинг қаттиқ жисм юзаси билан ўзаро таъсири жараённида содир бўладиган ноаддитив (қўшилмайдиган) жараёнларни ўрганиш долзарблиги ионли чангланишнинг физик механизмлари ҳақида янги маълумотларга эга бўлиш имконияти ҳамда ушбу ҳодисаларнинг замонавий технологияларда амалий қўллаш эҳтимоли билан белгиланади. Бундай бомбардимон шароитларида битта тезлаштирилган кластер ёки кўп зарядли ионни ташкил этувчи атомлар $\sim 10^{-15}$ сония ичида юзанинг битта элементар ячейка майдонига тушади. Бу эса бир атомли ионлар билан бомбардимон қилишда ҳосил бўлиши мумкин бўлмаган ҳолатда, сиртда энергиянинг аномал юқори локал зичлигининг ажралиб чиқишига олиб келади.

Бундай шароитлардаги иккиламчи эмиссия жараёнларини ўрганиш, ушбу жараёнларнинг механизмлари ҳақида янги маълумотларни олиш имконини беради. Иккиламчи эмиссия жараёнларида ноаддитив ва ночизиқли жараёнлар ҳозирги вақтгача етарли даражада ўрганилмаган соҳалардан бири ҳисобланади.

Ушбу диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022-йил 28-январдаги “Янги Ўзбекистонни 2022-2026-йилларда ривожлантириш стратегияси тўғрисида”ги ПФ-60-сонли қарори, 2017-йил 7-февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги “2030-йилгача фанни ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида”ги 2020-йил 29-октябрдаги ПФ-6097-сон, шунингдек, 2019-йил 22-августдаги “Иқтисодиёт ва ижтимоий соҳаларда энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантириш бўйича жадал чора-тадбирлар тўғрисида”ги ПҚ-4422-сон қарори ва Республикаизда сўнгти йилларда бу соҳага тегишли бошқа меъёрий ҳужжатларда назарда тутилган вазифаларни бажаришга етарли даражада хизмат қиласди.

Тадқиқотнинг республикада фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси илм-фан ва технологияларни ривожлантиришнинг асосий устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган: III. “Энергетика, энергия ва ресурсларни тежаш, транспорт, машина ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобларни ривожлантириш” ва ва ПФИ-2 “Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик” соҳаларининг ривожланишига хизмат қиласди.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтгача ИИМС усули билан жуда кўп элементлар, уларнинг аралашмалари, органик ва биоорганик моддалар тадқиқ қилинган. ИИМС усули бу, намуналарнинг бир қанча физиковий ва кимёвий хоссаларини ўрганиш учун жуда муҳим усулларидан биридир. Ўрганилаётган намуналарнинг атомар, молекуляр, кластер ва кўп зарядли ионлар билан бомбардимон қилинганда сирт ва сиртнинг юза остки қатламларида ўзаро таъсир натижасида вужудга келаётган жараёнларнинг ўрганиш имкониятини беради. А. Вухер (Германия), А. Делькорте (Бельгия), Ж. Матсую (Япония), А. Толсогузов (Россия) ва дунёнинг кўплаб бошқа етакчи илмий марказларида ИИМС усулида кластер, кўп зарядли ионлар билан намуналарнинг тадқиқи билан шуғулланиб келишяпти. Лекин уларнинг аксарият қисми намуналарни чангланиш жараёнида ҳосил бўладиган иккиламчи зарраларнинг тадқиқини, юқори энергияли бирламчи ионлар ёрдамида тадқиқотлар олиб боришган.

Республикаизда бу соҳада Ў.Х. Расулов, С.Ф. Белых, С.Н. Морозов, С.В. Верхотуров, Н.Х. Джемелевлар, С.Е. Максимов ва Д.Т. Усмановлар кўплаб илмий тадқиқотлар олиб боришган. Ҳозирги кунда иккиламчи эмиссия жараёнларида юз берадиган иккиламчи ионларни ночизиқли ва ноаддитив чиқишиларини кичик энергияли кластер ва кўп зарядли ионлар билан тадқиқ

қилиш, иккиламчи ионлар эмиссиясини фундаментал характеристикаларини ўрганишда нихоятда мухим ҳисобланади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим ёки илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.

Диссертация тадқиқоти Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг қўйидаги базавий молиялаштириш бўйича илмий-тадқиқот ишлари режаларига мувофиқ амалга оширилган: “Вакуум ва атмосфера шароитида кўпатомли зарраларнинг қаттиқ жисм сирти билан ўзаро таъсири, фаол органик моддаларнинг янги ионлашув услубларини ривожлантириш” (2021–2023); “Суистеъмол қилинувчи моддаларнинг қаттиқ жисм сиртидан термоион эмиссияси ҳамда иккиламчи эмиссия жараёнларни тадқиқ қилиш” (2024-2025).

Тадқиқотнинг мақсади иккиламчи ионлар масс-спектрометрияси усули билан қаттиқ жисмлар сиртини кичик энергияли, кўп атомли кластер ва кўп зарядли ионлар билан бомбардимони вақтидаги иккиламчи эмиссия жараёнларида ноизиқли ва ноаддитив эфектларни тадқиқ қилишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари қўйидагилардан иборат:

GaAs нишонини 1-10 кэВ энергияли Bi_m^+ ($m=1-5$) кластер ионлари билан бомбардимони вақтида галлий ионларининг ноизиқли ва ноаддитив чиқишини тадқиқ қилиш ва иккиламчи ионларни ионлашиш эҳтимоллигини баҳолаш;

сирт ионлашишга асосланган ионлар манбасини такомиллаштириш, ҳамда GaAs нишонини кластер ионлар билан бомбардимони вақтида ҳосил бўлаётган нейтрал галлий атомларини пост ионлашиш усулида тадқиқ қилиш;

GaAs нишонини 1-10 кэВ энергияли Bi^{q+} ($q=1-6$) кўп зарядли ионлар билан бомбардимон вақтида иккиламчи ионлар чиқишишидаги ноизиқли ва ноаддитив жараёнларни тадқиқ қилиш;

Та нишонини 2-12 кэВ энергияли Bi_m^+ ($m=1-4$) кластер ва кўп зарядли ионлар билан бомбардимон вақтидаги ион-фотон эмиссиясида ноизиқли ва ноаддитив жараёнларни тадқиқ қилиш;

Tb ва Tm нишонларида 1-21 кэВ энергияли Au_m^- ($m=1-9$) ва Bi_m^- ($m=1-7$) манфий кластер ионлар билан бомбардимон вақтидаги иккиламчи ионлар, ион-фотон ва иккиламчи электрон эмиссияларини тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида галлий арсенид (GaAs), Та (тантал), Tb (тербий), Tm (тулий) элементлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети иккиламчи ионлар, ион-фотон ва ион-электрон эмиссия жараёнларидағи ноизиқли ва ноаддитив эфектлардир.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертация ишида иккиламчи ионлар масс-спектрометрияси, сиртий ионлашув, ион-электрон эмиссияси ва ион-фотон эмиссияси эгри чизиклари усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қўйидаги натижалардан иборат:

биринчи бор сиртий ионлашишга асосланган пост ионлашиш усули билан иридий эмиттери юзасида GaAs нишонини 1-10 кэВ энергия диапазонида Bi_m^+

($m=1-5$) кластер ионлари билан бомбардимон қилиш натижасида ҳосил бўлган нейтрал галлий атомлари мусбат ионларга айлантирилди ва нейтрал галлий атомлари учун бомбардимон кластер ионида ҳар бир атомга энергия ортиши билан ноаддитивлик коэффициентларининг камайиш тенденцияси аниқланди;

GaAs нишони 2-10 кэВ энергия диапазонидаги кўп зарядли Bi^{q+} ионлари билан бомбардимон қилинганда, матрица ионлари (Ga^+ , Ga^{2+} , As^+), шунингдек, адсорбсияланган ионлар ва аралашмалар ионлари (C^+ , H_2O^+ , Na^+ , Al^+ , K^+ , Ni^+ , Cu^+ , Cs^+ , Bi^{n+}) чиқишининг кўп марта ортиши, бирламчи бомбардимон қилаётган ионлар зарядини ортиши билан боғлиқлиги ва бу боғлиқлик кўпроқ ионлашиш потенциали юқори бўлган ионлар учун характерли эканлиги аниқланди. Бу эса уриб чиқарилган ионлар тўғридан-тўғри тўқнашув натижасида чангланган атомлар орасидаги заряд алмашинуви билан тушунтирилади;

Та нишон сиртида Bi_m^{q+} ($m=1-4$), ($q=1-6$) кластер ва кўп зарядли ионлар билан бомбардимон қилинганда ион-фотон эмиссия (ИФЭ) чиқиши бирламчи висмут кластер ионларида атомлар сонининг ортиши билан сиртда энергиянинг локал зичлашиши, қўзғалган атомлар улушининг кўпайиши ҳамда ионлардаги юқори потенциал энергия, сирт билан электрон алмашинуви натижасида ИФЭ чиқишининг ноаддитив ортиши аниқланди;

Бирламчи кластер ва кўп зарядли ионлардаги атомлар сони ва энергиясини ортиши билан тантал ИФЭси интеграл чиқишининг ноаддитив ўсиши, зич тўқнашув каскадлари соҳасидан атомларнинг қўшимча чиқиши ва қўзғалиши билан боғлиқ бўлиб, бу эса юза термал чўққиларининг ҳосил бўлишига олиб келиши, шунингдек ИФЭ чиқиши кўп зарядланган ионларнинг зарядига $q < 4$ бўлганда заиф боғлиқ экани ва заряд 3 дан 6 гача ортганидагина ортиши аниқланди;

Tm ва Tb нишонларининг Bi ва Au кластер ионлари билан бирламчи ионлардаги атомлар сонини ортиш жараёнида сиртда- энергия зичлашиши, электрон қўзғалиши ва локал қизиш жараёнларини бир вақтда кучайиши натижасида ИФЭсининг ноаддитив ортиши аниқланди;

ИФЭ тадқиқотлари Tm нишонининг сиртини Bi кластер ионлари билан бомбардимон қилинишида интеграл ИФЭси коэффициентларининг бомбардимон қилувчи ионларидағи атомлар сони ортиши билан ноаддитив ўсиши кузатилди, бу ноаддитив ўсиш сиртдаги термал чўққилари соҳаларидан тарқалган атомларнинг қўшимча уйғотилиши билан боғлиқлиги аниқланди.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қўйидагилардан иборат:

Сезгир ва селектив сирт ионлашиш усулига асосланган нейтрал атомларни тадқиқи учун замонавий пост ионлашиш усулларига нисбатан 100 марта аниқлиқдаги тизим такомиллаштирилиб, натижалар ҳозирги лазер пост ионлашиш усулларига нисбатан сезгирроқ ва арzonроқ бўлишига эришилди;

ИИМС усули тадқиқ қилинаётган GaAs, Ta, Tb, Tm элементлари учун такомиллаштирилиб, қаттиқ жисмларининг сирт диагностикаси учун қўллаш имконияти ўрганилди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги иккиламчи ионлар масс-спектрометрияси, ион-фотон эмиссия, ион-электрон эмиссия усулларини қўллаш, тажрибалар шароити ва статистикасини батафсил ва тўлиқ таҳлил қилиш, юқори аниқликдаги замонавий ўлчаш асбобларини қўллаш билан асосланган;

олинган экспериментал натижалар синчковлик билан амалга оширилган ҳисоб-китобларга асосланади ва мумкин бўлган хатоликлар даражасини ҳисобга олган ҳолда статистик усулларни қўллаб қайта ишланган; олинган экспериментал натижалар ва келтирилган хуносалар юқори вакуумли муҳитда иккиламчи ионлар эмиссиясининг ионланиш механизмларини ўрганишга бағишиланган замонавий тадқиқотлар маълумотларига мос келади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг *илмий аҳамияти* ҳозирда долзарб бўлган яримўтказгич GaAs ва Ta, Tm Tb элементларининг кластер ва кўп зарядли ионлар билан бомбардимон вақтидаги иккиламчи эмиссия жараёнларида содир бўладиган ночизиқли ва ноаддитив эфектларни комплекс тадқиқи иккиламчи ион эмиссия механизми қонуниятларини аниқлашга катта ҳисса қўшади.

Тадқиқот натижаларининг *амалий аҳамияти* шундан иборатки ушбу тадқиқотлар юқори селектив ва сезгир сирт-ионлаш усуллари ҳамда ускуналарини ишлаб чиқиш ва қўллаш билан боғлиқ бўлиб, бу материалшунослик, юза диагностикаси, нанотехнология эҳтиёжлари учун иккиламчи ионлар масс-спектрометрияси усулини такомиллаштириш масалаларини қамраб олади. Хусусан,nanoструктуравий технологияларда қўллаш учун, хусусан, яримўтказгичларда ўта нозик аралашмалар таркибини ўлчаш учун кластерли микро-зонд яратиш долзарб масала ҳисобланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Яримўтказгич GaAs ва Ta, Tm Tb элементларининг кластер ва кўп зарядли ионлар билан бомбардимон вақтидаги иккиламчи эмиссия жараёнларида содир бўладиган ночизиқли ва ноаддитив эфектларни комплекс тадқиқи натижалари асосида:

-ярим ўтказгич галлий арсенид нишонини кичик энергияли (1-10 кэВ) висмут кластер ва кўп зарядли ионлар билан бомбардимон вақтидаги олинган илмий натижалар № IL-4821091667-сонли «Оксид яримўтказгич бетартиб материалларда диэлектрик-металл ўтишлари ва электр ўтказувчанлиги механизмлари» номли илмий лойиҳани бажаришда фойдаланилган (Ўзбекистон Миллий Университетининг 25.09.2025 йилдаги №01/11-20230-сонли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши материалнинг электрон ва структуравий хусусиятларини ўзгартириш, шунингдек ион бомбардимони орқали ҳосил бўладиган юза дефектлари ва эмиссия жараёнларини оксид аморф яримўтказгичларда диэлектрик-металл ўтиш механизмларини чуқурроқ англаш ва физика-кимёвий фундаментал қонуниятларни тушунтириш имконини берган.

-Та нишоннинг юзасини кластер ва кўп зарядланган Bi_m^{q+} ($m=1-4$), ($q=1-6$) ионлари билан бомбардимон қилиниш шароитида ион-фотон эмиссия

жараёнларини тадқиқ қилишда олинган илмий натижалар № MRB-2021-521-сонли «Алюминий ва тантал оксидлари асосида янги мустаҳкам наноструктурали материалларни яратиш» номли илмий амалий лойиҳани бажаришда фойдаланилган (Ислом Каримов номидаги Тошкент Давлат Техника Университетининг 27.09.2025 йилдаги №01/9-14-2630-сонли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг лойиҳада қўлланилиши алюминий қотишмасини тантал оксида билан легирлаш жараёнида тантал оксидининг алюминий қотишмасидаги тақсимланиши ўрганиш, шунингдек икки қаватли юпқа плёнкали Ta/Al тизимини кислотали электролитларда электрокимёвий анодлаш натижасида ҳосил бўлган анод алюминий ва тантал оксидларининг композит матрица тизимига айлантириш технологиясининг илмий асосларини чуқурроқ тушуниш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация иши натижалари 8 та халқаро ва республика анжуманларида маъруза ва мухокама қилинган.

Тадқиқот натижаларнинг эълон қилинганлиги. Диссертация ишининг мавзуси бўйича олинган илмий натижалар 13 та илмий ишларда баён қилинган бўлиб, улардан 5 таси илмий мақола, шу жумладан 3 та чет эл ва 2 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан докторлик диссертациясининг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларида нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулосалар, чоп этилган ишлар рўйхати, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 123 бетни ташкил қилиб, 40 та расмлар ва 2 жадвалларни ўз ичига олган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

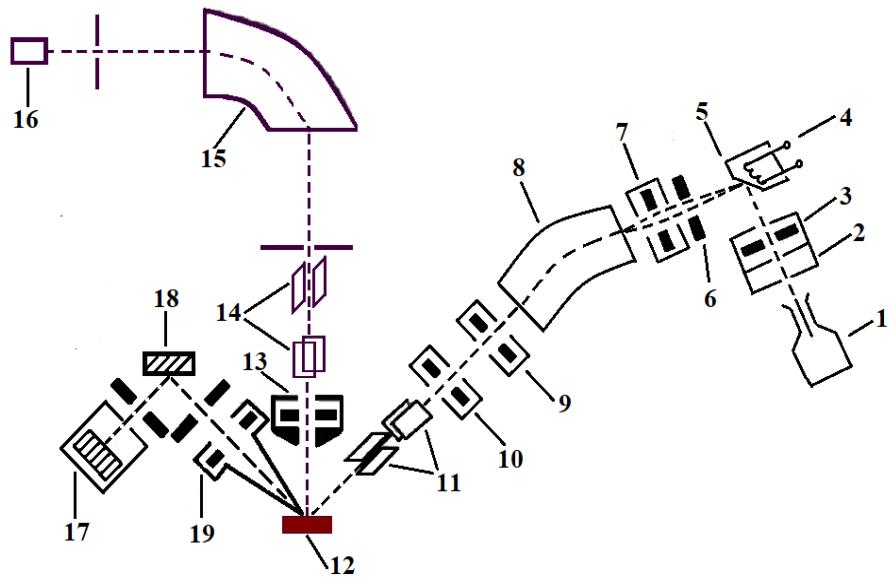
Диссертациянинг кириш қисмида танланган мавзунинг долзарблиги ва зарурати асосланган бўлиб, олиб борилган илмий тадқиқотларнинг асосий мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот обьекти, предмети ва усууллари аниқланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологиялари ривожланишининг асосий устувор йўналишларига мослиги, илмий янгилиги қўрсатилган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, улардан амалда фойдаланилганлиги, илмий натижаларнинг чоп этилганлиги ва апробацияси ҳамда диссертациянинг тузилиши ва ҳажми бўйича қисқача маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “**Иккиламчи эмиссия жараёнларининг тадқиқининг ҳозирги ҳолати**” деб номланган биринчи бобида атомар, кластер, кўп зарядли ва молекуляр бирламчи ионлар билан нишон сиртини бомбардимон вақтида иккиламчи эмиссия чиқишиларидаги физик жараёнлар таҳлилини ҳозирги ҳолати батафсил баён қилинган. Яримўтказгич GaAs ва Ta, Tm Tb элементларининг иккиламчи ион масс-спектрометриясидаги тадқиқотлари келтирилган. Шунингдек, иккиламчи ионлар эмиссияси, ион-фотон эмиссия, ион-электрон эмиссия жараёнлари ҳакида маълумотлар келтирилган. Кўп атомли кластер, молекуляр ва кўп зарядли ионлар билан нишонни

бомбардирмон вақтида нишон сиртидан иккиламчи эмиссия чиқишиларини кескин ортиши, бу эса сиртда содир бўлаётган жараёнларни чукурроқ тушунишга ёрдам бериши аниқланган. Ҳозирги вақтга келиб иккиламчи эмиссия жараёнларида жараёнларидаги кластер ва кўп зарядли ионлар билан нишон сиртини бомбардирмон вақтидаги чизиқли каскадлар етарлича ўрганилган. Боб охирида асосий хulosалар ва муаммонинг қўйилиши ёритилган. Адабиётлар таҳлилидан шуни хулоса қилиш мумкинки, ушбу соҳадаги ютуқларга қарамай ночизиқли каскадлар ва ноаддитв эфектлар бомбардимон қилувчи бирламчи ионларнинг паст энергияларида етарли даражада тадқиқ қилинмаган. Ҳозирги вақтгача, кўп атомли кластерларнинг чангланиш механизми ҳали тўлиқ ўрнатилмаган ва уни тўла ишлаб чиқиш учун кейинги экспериментал тадқиқотлар талаб этилади. Шунинг учун яримўтказгичлар ва нодир ер элементларида кичик энергияли бирламчи кластер ва кўп зарядли ионлар билан бомбардимон вақтидаги иккиламчи эмиссия жараёнларидаги ночизиқли каскадлар ва ноаддитв эфектларини ўрганиш иккиламчи эмиссия вақтидаги кластер ионларни чангланиш механизмларини тушунишга ёрдам беради. Бундай тадқиқотларнинг долзарблиги, бир томондан, ионларни чангланиш жараёнлари хақида фундаментал билимларни олиш зарурати билан, иккинчи томондан, кластерлардан кўп қиррали амалий фойдаланиш истиқболлари билан белгиланади.

Диссертациянинг **“Тажриба ускуналари ва тадқиқот усуллари тавсифи”** деб номланган иккинчи бобида экспериментал қурилмалар, намуналар, реагентлар ва услубиятлар батафсил тавсифланган. Диссертацияда қўйилган илмий тадқиқот мақсад ва вазифаларини бажариш учун такомиллаштирилган масс-спектрометр қурилмасидан, мусбат, манфий кластер ва кўп зарядли V_1 ва Au ионлар манбаси, нейтрал компонентларни тадқиқ қилиш учун такомиллаштирилган сиртий ионлашув ионлар манбаси ва ион-фотон эмиссияни (ИФЭ) ўлчаш тизимларидан фойдаланилган. Иккиламчи эмиссия жараёнларида юзага келадиган ночизиқли каскадлар ва ноаддитив эфектларни ўрганиш учун такомиллаштирилган икки фокусировкали статик магнитли масс-спектрометр МИ-1201 қурилмасидан фойдаланилган. Масс-спектрометр бирламчи кластер ва кўп зарядли ион манбалари, бирламчи ионларнинг магнит сепаратори ва масс-спектрометр МИ 1201 асосидаги иккиламчи ионларнинг магнит анализаторини ўз ичига олади. Экспериментал ускуна бошланғич кластер, молекуляр ва кўп зарядли ионларнинг массаси ва энергия диапазонини кенгайтириш учун такомиллаштирилган, шунингдек, сиртий ионлашув усули орқали чангланишнинг нейтрал компонентларини ўлчаш имконияти яратилган. Масс-спектрометрнинг схемаси 1-расмда келтирилган. Ион манбалари кластер ва кўп зарядли ионларни (V_1 , Au манфий кластер ионларини) ҳосил қилиш, уларни сепарация қилиш ва ионларни 21 кэВ энергиягача тезлаштириш имкониятига эга. Иккиламчи ионларнинг масс-спектрометри иккиламчи кластер ионларни 4000 а.м.б. гача бўлган масса

диапазонида таҳлил қилиш ва 400 гача бўлган ажратиш қобилиятида ўлчаш, шунингдек, иккиламчи ионларнинг энергия тақсимотини ўрганиш имкониятини беради.



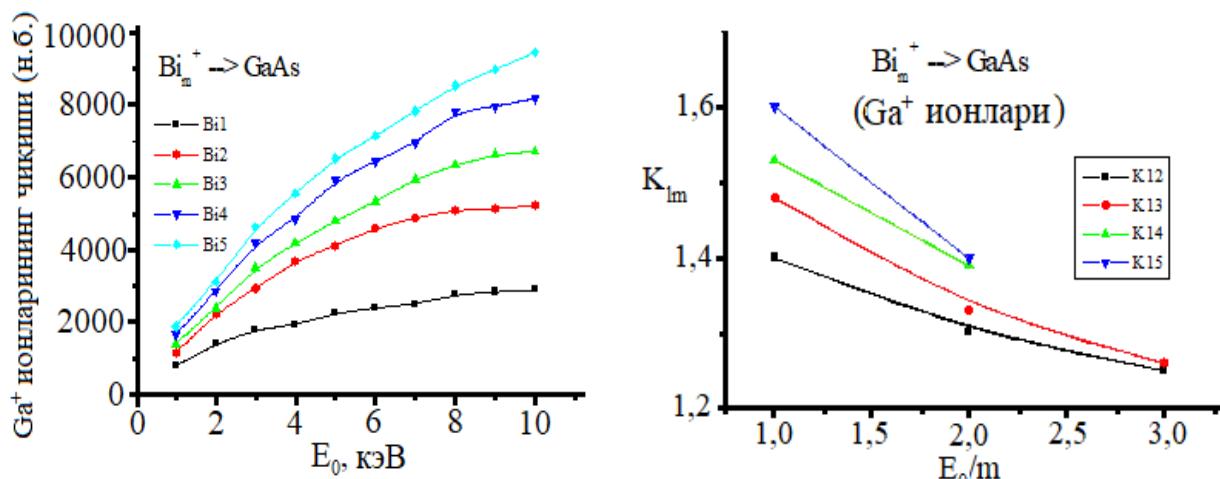
1-расм. Экспериментал қурилманинг схемаси: 1–3 – сирт ионлашиш Cs^+ ион манбалари, 4–5 – электронлар билан ионлаштириш қисми, 6–11 – бирламчи ионларнинг сепаратори, 12 – тадқиқот объект сифатидаги нишон, 13–16 – иккиламчи ионларнинг сепаратори, 17 – Кнудсен ячейкаси, 18 – термоэмиттер, 19 – Эйнзел линзаси.

Масс-спектрометр қурилмаси модернизация қилиниб, ИФЭ ни ўлчаш тизими билан тўлдирилган. Чангланган атомларнинг оптик нурланиши нишон юзаси яқинидаги ореолидан йиғилиб, EMI 6256 В юқори самарали фотокучайтиргич ёрдамида қайд этилади. Бу қурилма кварц ойнасига эга кўп тиркишли катод билан жиҳозланган бўлиб, нурланиши 250–700 нм диапазонида қайд этиш имконини беради. Бирламчи манфий ва мусбат кластер ионлари Bi_m^- ($m=1-5$) ион манбасида висмут нишонни мусбат цезий ионлари билан чанглатиш усули орқали ҳосил қилиниб, экспериментал қурилманинг бирламчи трактидаги сектор магнит майдонида атомлар сонига қараб сепарация қилинди. Иккинчи тажрибавий қурилмада, монохроматор, ксенон ион манбай ва 40 кэВ гача тезлаштирувчи тизим ёрдамида тулийнинг ИФЭ спектрлари тадқиқ қилинди. Тм мишени Xe^+ ионлари билан нормал йўналишда бомбардимон қилинди. Иккиламчи атомларнинг оптик нурланиши нишон юзаси яқинидаги ореолдан йиғилиб, монохроматор ва EMI 6256 В фотокучайтиргич ёрдамида таҳлил қилинди.

Шунингдек, бу бобда иккиламчи ионлар ҳосил қилиш учун ишлатилган кластер ва кўп зарядли ион манбалари, тадқиқ қилинган намуналар ва тадқиқ қилиш услублари ҳамда ҳосил бўлган нейтрал зарраларнинг постионлашиш учун йиғилган сиртий ионлашув тизимларининг баёни батафсил тавсифланган.

Диссертациянинг “ Bi кластер ва кўп зарядли ионлари билан бомбардимон вақтида GaAs нинг чангланишида иккиламчи эмиссия жараёнларидаги ноаадитив эфектлар тадқиқи” номли

учинчи бобида галлий арсенид яримўтказгичнинг кичик энергияли мусбат Bi_m^+ кластер ионлари билан бомбардимон қилинганда иккиласми эмиссия жараёнларидағи ноизиқли каскадлар ва ноаддитив эффектлар тадқиқот натижалари келтирилган. GaAs мұхим яримўтказгич бўлиб, саноатда жуда кўп қўлланилади. GaAs нишонини 1-10 кэВ энергия диапазонида Bi_m^+ ($m=1-5$) кластер ионлари билан бомбардимон вақтида ҳосил бўлаётган иккиласми ионлар, шунингдек чиқаётган нейтрал галлий атомлари сиртий ионлашув постионлашиш усули билан мусбат ионларга айлантирилди. 2-расмда GaAs нишонини Bi_m^+ кластер ионлари билан бомбардимон қилишда иккиласми Ga^+ ионларининг чиқишини ($m=1-5$) бомбардимон ионларининг энергиясига боғлиқлик графиги келтирилган. Ga^+ иккиласми ионларининг чиқишининг ноаддитив ўсиши бомбардимон қилувчи бирламчи ионларидағи атомлар сонининг ортиши билан кузатиляпти.



2-расм. Монокристалл GaAs нишонини Bi_m^+ кластер ионлари билан бомбардимон қилишда иккиласми Ga^+ ионларининг чиқишини ($m=1-5$) бомбардимон ионларининг энергиясига боғлиқлик графиги.

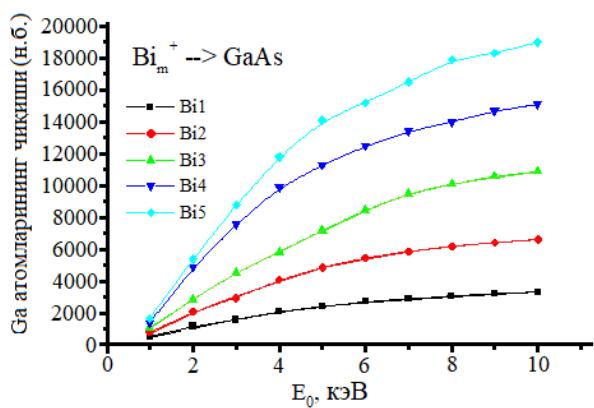
3-расм. Иккиласми галлий ионлари $K_{m,m'}$ чиқишининг ноаддитивлик коэффициентларининг бомбардимон қилувчи кластер ионларида бир атомга тўғри келадиган энергия бўйича боғлиқлик коэффициентларининг пасайиши тенденцияси кузатиляпти. Чангланган галий ионларининг ноаддитив чиқиши фактори қўйидаги формула ёрдамида аниқланди.

2-расмда иккиласми галлий ионлари $K_{m,m'}$ чиқишининг ноаддитивлик коэффициентларининг бомбардимон қилувчи кластер ионларида бир атомга тўғри келадиган энергия бўйича боғлиқлик графиги келтирилган. Боғликлардан қўриш мумкинки бомбардимон қилувчи кластер ионларида атомга тўғри келадиган энергиянинг ортиши билан ноаддитивлик коэффициентларининг пасайиши тенденцияси кузатиляпти. Чангланган галий ионларининг ноаддитив чиқиши фактори қўйидаги формула ёрдамида аниқланди.

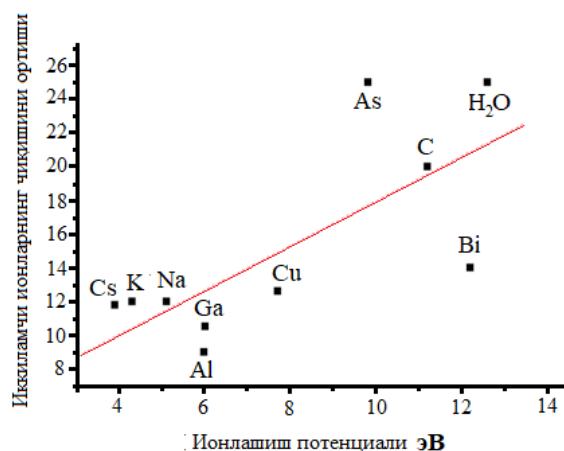
$$K_{m,m'} = m'Y_m/mY_{m'} \quad (1)$$

Бу ерда Y_m and $Y_{m'}$ - ҳар бир атомга бир хил энергияга эга м ва m' атомларини ўз ичига олган кластер ионлари томонидан бомбардимон қилинган галлий ионларининг чиқиши.

Иккиламчи эмиссия жараёнларида ҳосил бўлаётган нейтрал атомларни тадқиқоти бу жараёнларда кластерлар ҳосил бўлишини тўлиқ тушунишга ёрдам беради. Биздан олдин қилинган тадқиқотларда, нейтрал атомларни чиқишини ўлчаш учун йигилган сирт ионлашиш (СИ) манбасига асосланган тизимда, эмиттер сифатида оксидланган вольфрам металли ишлатилган. Бу эса ўз навбатида юқори температураларда нейтрал галлий атомларни чиқишини ўлчаш имконини бермайди, чунки эмиттернинг юқори температураларида оксид қатлам учишни бошлайди ва бу эмиттернинг чиқиш ишини пасайишига олиб келади. Шунинг учун нейтрал галлий атомларининг чиқиши ишлаб чиқилган схема бўйича СИ ёрдамида иридий эмиттер юзасида ўлчанди, бунда галий атомлари Ga^+ ионларига айлантирилиб, улар масс спектрометрининг иккиламчи йўлида аниқланди. Олинган натижалар 4-расмда ифодаланган, яъни чангланган нейтрал галлий атомлари чиқишининг Bi_m^+ кластер ионларининг бомбардимон қилиш энергиясига боғлиқлиги кўрсатилган ($m=1-5$). Графикдан кўришимиз мумкинки, ионларнинг рентабеллиги билан таққослаганда, галий атомларининг рентабеллиги ортиб бораётган энергия ва бомбардимон кластер ионларидағи атомлар сони билан янада аниқ ўсишни кўрсатяпти.



4-расм. Нейтрал галлий атомлари чиқишининг Bi_m^+ ($m=1-5$) кластер ионларининг бомбардимон қилиш энергиясига боғлиқликлари



5-расм. Иккиламчи ион манбаси зарядининг 1 дан 6 гача ортиши билан иккиламчи ион чиқишининг ўсиш коэффициентларини заряд бирлиги учун бирламчи ионларнинг минимал кинетик энергияси 2 кэВ бўлган ионланиш потенциалларига боғлиқлик графиги.

Бундан ташқари, бу бобда GaAs монокристалини 1–10 кэВ энергия диапазонида кўпзарядли Bi^{q+} ($q=1-6$) онлари билан бомбардимон қилишда иккиламчи матрица ионлари (Ga^+ , Ga_2^+ , As^+), шунингдек адсорбцияланган ва аралашма ионларининг (C^+ , H_2O^+ , Na^+ , Al^+ , K^+ , Ni^+ , Cu^+ , Cs^+ , Bi_n^+) чиқишиларини бомбардимон қилувчи кўп зарядли ионлар (КЗИ) заряди ва энергиясига боғлиқликлари ўрганилди.

Шунингдек, сиртдан чанглатилган нейтрал галлий атомлари чиқишининг ноаддитивлик коэффициентларининг Bi_m^+ ($m=1-5$) бомбардимон ионлари энергиясига боғлиқликлари ҳам тадқиқ қилинди. Олинган боғлиқлардан

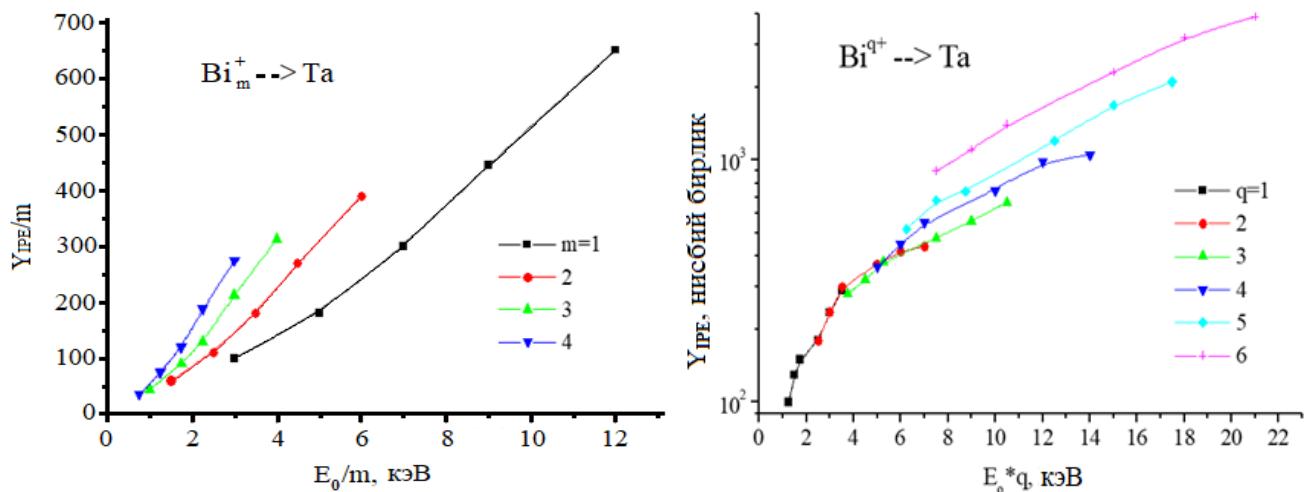
аниқландики, бомбардимон қилувчи кластер ионидаги атомга түгри келадиган энергия ортиши билан ноаддитивлик коэффициентлари камайиши кузатилди. Олинган иккиламчи эмиссион масс спектрларида ишқорий ионлар натрий, калий ва цезийнинг катта микдори кузатилди. Шунинг учун Na^+ , K^+ , Cs^+ иккиламчи ионларини чиқишининг бомбардимион қилувчи Bi^{q+} ионларининг заряди ва энергиясига боғлиқлиги ўрганилди. Бомбардимон қилувчи КЗИ зарядини 1 дан 6 га ўзгартирганда ишқорий ионлар чиқишининг 8-12 мартаға сезиларли ўсиши кузатилади. Энг катта ўсиш КЗИ заряд бирлиги учун 2 кэВ энергияда, энг пасти эса 10 кэВ да кузатилди.

Иккиламчи эмиссион масс спектрларида аралашма бирикмаларнинг ионлари C^+ , H_2O^+ , Al^+ , Ni^+ , Cu^+ ва бирламчи ионлар Bi_n^+ дастан имплантация қилинган висмут ионлари Bi_n^+ ҳам атом шаклида, ҳам кластерлар шаклида кузатилди. Иккиламчи аралашмалар C^+ , H_2O^+ , Al^+ , Cu^+ ионлари чиқишининг КЗИ энергияси ва зарядига боғлиқлиги тадқиқ қилинди. Аниқланишича, КЗИ зарядининг ортиши билан иккиламчи ионлар чиқишининг энг кучли ўсиши (10 кэВ ва 2 кэВ энергияларда заряднинг 1 дан 6 гача ўзгариши билан 11-25 мартағача, мос ҳолда) келиб чиқиши адсорбцион хусусиятга эга H_2O^+ молекуляр иони учун кузатилди.

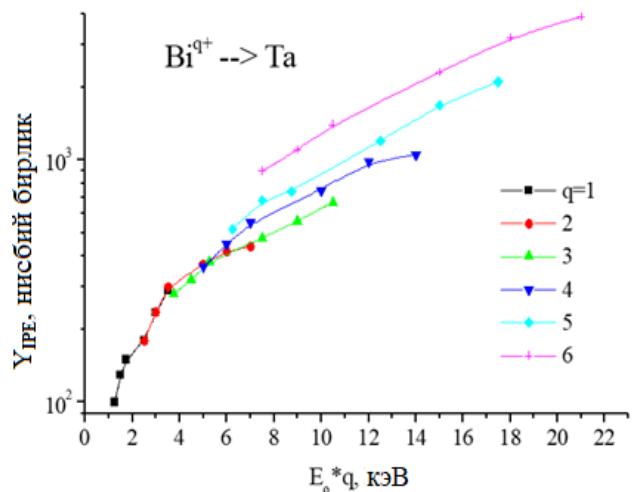
Барча иккиламчи ионлар учун умумий қонуният шундаки, бомбардирловчи ионларнинг кинетик энергияси камайганда, КЗИ заряди ортиши билан чиқиш ўсишининг ортиши кузатилади. Шунингдек, ушбу ўсишнинг чангланадиган зарраларнинг ионлашув потенциаллари билан корреляцияси ҳам кузатилади. Бу ҳолат 5-расмда яққол күрсатилған бўлиб, унда КЗИ зарядининг 1 дан 6 гача ортиши натижасида иккинчи даражали ион чиқиш коэффициентларининг ионлашув потенциалларига боғлиқлиги келтирилган. Бу ерда бирламчи ионларнинг кинетик энергияси КЗИ зарядига нисбатан 2 кэВ минимал бўлган ҳолда күрсатилган.

Диссертациянинг “Та, Тв ва Тм нишонларини Bi кластер ва кўп зарядли ионлари билан бомбардимон вақтидаги чангланишида, иккиламчи эмиссия жараёнларидаги ночизиқли ва ноаддитив эфектлар тадқиқи” номли тўртинчи бобида Та ва Тм элементларини Bi кластер ва кўп зарядли ионлари, шунингдек Тв элементини Au манфий кластер ионлари билан бомбардимон вақтидаги ион-фотон, ион-электрон эмиссиясидаги ночизиқли ва ноаддитив эфектлар тадқиқотлари келтирилган. Биринчи тантал нишонини 2-12 кэВ энергия диапазонидаги Bi_m^+ мусбат кластер ионлари ($m=1-4$) билан бомбардимон қилиш жараённан интегралланган ион фотон эмиссия (ИФЭ) чиқиш ўлчовлари амалга оширилди. Олинган натижалардан бомбардимон қилувчи висмут кластер ионларидаги атомлар сони ортиши билан бирга, уларнинг энергияси ҳам ортиши натижасида ИФЭ чиқишининг интеграл қиймати ҳам ортиб боришилари аниқланди. Кластердаги атомлар сонидан (молекуляр эфект) ИФЭ чиқишининг ортиши ноаддитивлигини аниқлаш учун ИФЭ интеграл чиқиш қийматлари ва бомбардимон қилувчи ионларнинг энергияси бомбардимон қилувчи ионлардаги атомлар сонига

нормаллаштирилди. 6-расмдан кўришимиз мумкинки, бомбардимон қилувчи кластер ионларидағи атомлар сони m ва уларнинг кинетик энергияси ортишига мувофиқ Y_{IE}/m нинг қисман чиқиши сезиларли даражада ортади. ИФЭ интеграл чиқишининг атомлар сони ва бомбардимон қилувчи ионларнинг энергияси ортиши билан ноаддитив ўсиши, чангланиш чиқишининг ноаддитивлиги билан боғлиқ. Бундан ташқари, кластерли бомбардимон вақтида иссиқлик пиклари режими чангланган атомларнинг қўзғалиш жараёнига таъсир кўрсатиши мумкин. Узоқ йиллар давомида кўп зарядли ионлар таъсирида иккиламчи ион эмиссиясини ўрганаётган аксарият тадқиқотчилар "Кулон портлаши" деб номланган механизмни мухокама қилганлар. Ушбу механизмнинг моҳияти шундан иборатки, кўп зарядли ионларнинг нейтралланиш ҳудудида ҳосил бўлган мусбат зарядланган ионлар Кулон итариш кучлари таъсирида кенгаяди.



6-расм. Bi_m^+ ионлари билан бомбардимон қилинган тантал нишон учун ИФЭ чиқишининг энергия ва бомбардимон қилувчи кластер ионларидағи атомлар сонига боғлиқлиги, бомбардимон қилувчи ионлардаги атомлар сонига нормалланган ҳолда



7-расм. Кўп зарядли Bi ионлари билан Ta нишонини бомбардимон қилиш жараёнида кўп зарядли ионларнинг кинетик энергиясини ҳисобга олган ҳолда, ионларнинг энергияси ва зарядига боғлиқ ҳолда ИФЭ Y_{IE} чиқишининг боғлиқлик графиги

Бироқ, кўплаб экспериментал ишлар шундан далолат берадики, заряди 7–10 дан кам бўлган секин кўп зарядли ионлар учун металларнинг чангланишдаги чиқиши ошмайди. Шу билан бирга, бир қатор тадқиқотларда иккиламчи ион эмиссиясининг ортиши қайд этилган бўлиб, бу эффект айниқса кўп зарядли ионларнинг энергияси камайганда янада яққолроқ намоён бўлади. Масалан, байзи бир ишларда тўғридан-тўғри зарраларни чиқариб юбориш режимида чангланиш жараёнида келаётган ион зарядининг таъсири ҳақида тахмин билдирилган. Агар бундай заряд алмашиш механизми тасдиқланса, кичик бомбардимон энергияларида, яъни тўғридан-тўғри зарралар чиқариб

юбориш режими устун бўлган ҳолатда, чангланган зарраларнинг ионланиш эҳтимоли сезиларли даражада ортиши мумкин.

ИФЭ чиқиши Та нишонларини кўп зарядли Bi^{q+} ионлари ($q = 1-6$) билан бомбардимон қилиш жараёнида ўлчанди. $Y_{\text{ИФЭ}}$ чиқишининг кўп зарядли ионлар зарядига боғлиқлигини аниқлаш учун натижалар қайта ҳисоб-китоб қилинди. Бунда кўп зарядли ионларнинг кинетик энергияси уларнинг заряди ва тезлаштирувчи кучланиш кўпайтмасига пропорционал эканлиги ҳисобга олинди (7-расм). Боғликлардан кўриниб турибдики, $q < 4$ бўлганда ИФЭ чиқиши кўп зарядли ионларнинг зарядига сезиларли даражада боғлиқ эмас, аммо заряд 3 дан 6 гача ошганда ИФЭ чиқиши ортиб боради.

Бомбардимон қилувчи ионларнинг паст энергиялар диапазонида, ион-ион эмиссиясининг кинетик таркибий қисми нолга интилаётганда, кўп зарядли бомбардимон қилувчи ионларнинг потенциал ионлашиш энергиясининг уларнинг заряди ортиши билан ортиши иккилламчи ионлар чиқишининг ўсишида намоён бўлади. Бу натижалар тушаётган ионлар ва тўғридан-тўғри тўқнашув натижасида чиқарилган атомлар ўртасида заряд алмашинуви имконияти мавжудлигини кўрсатади. Бу заряд алмашинуви секин ҳаракатланувчи кўп зарядли ионлар билан бомбардимон қилинганда чангланган зарраларнинг ионлашиш эҳтимолининг ортишининг асосий сабаби бўлиши мумкин.

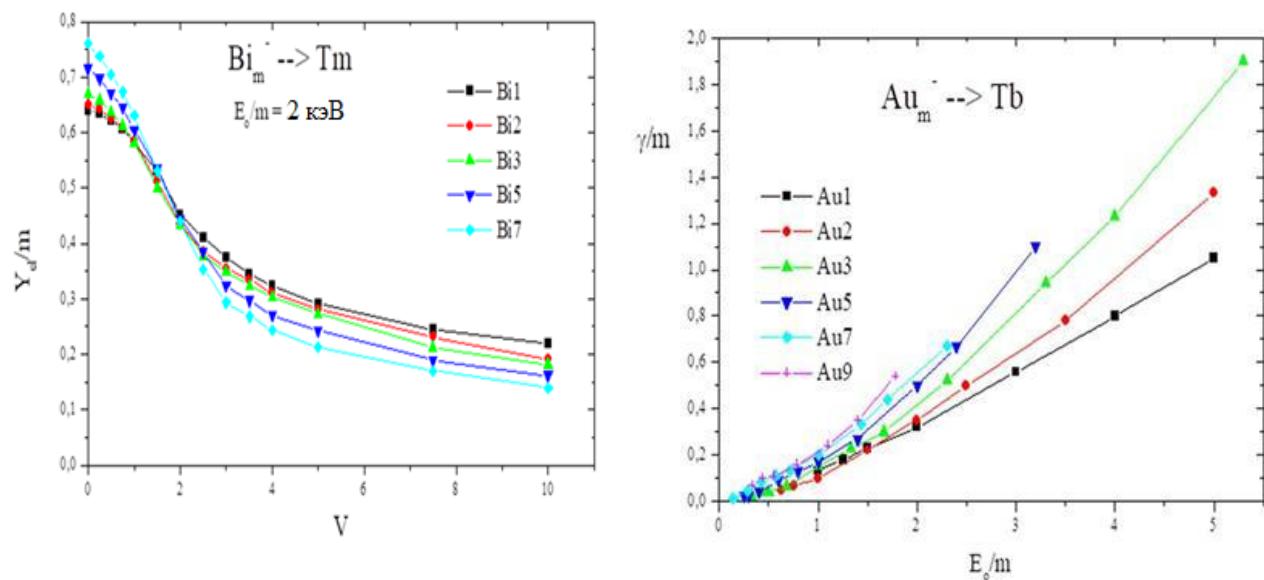
Иккилламчи эмиссия жараёнларида чангланган нейтрал зарраларнинг катта қисми юзада кўзғалган ҳолатда қолади ва нишон юзаси яқинидаги гало худудида фотонлар чиқаради. Оптик спектрларни ва ИФЭ чиқиш ҳосилдорлигини ўлчаш тўқнашув каскадлари, термал пиклар ва чангланиш ноаддитивлиги хусусиятлари ҳақида қўшимча муҳим маълумотларни тақдим этади. Кластерли бомбардимон жараёнида ИФЭ ни ўрганиш учун туллийни материал сифатида танлаш, нодир ер элементлари парчаланганда юқори фотон чиқиши билан боғлиқ бўлиб, улар асосан қайд қилиш учун қулай бўлган кўринувчан спектр диапазонида жойлашган. Тадқиқотлар натижасида тулийнинг ИФЭ спектрида 400–600 нм диапазонида жойлашган ва $4f^{13}6s6p$ ҳамда $4f^{12}5d6s^2$ конфигурацияларнинг асосий ҳолатига ўтишларига мос келувчи 16 та резонанс чизиқлар (TmI) аниқланиб, идентификация қилинди. Турли даражаларни уларнинг нисбий тўлишига пропорционал равищда уйғотиши самарадорлигини таққослаш учун олинган ИФЭ спектрлари [10] методикаси бўйича қайта ишланди. Даражаларни уйғотиши самарадорлиги қуидаги шаклда ифодаланади:

$$W = I \lambda^3 / g_k f_{ik}, \quad (2)$$

бу ерда, g_k ва f_{ik} – уйғотилган даражанинг статистик оғирлиги ва ўтиш осилятор кучи, λ – чизиқ тўлқин узунлиги, I – тажрибада ўлчанганди чизиқ интенсивлиги (монохроматор ва фотоэлектрон кучайтиргич сезгириллигига тузатма киритилган ҳолда).

Турли механизмларнинг ион электрон эмиссия (ИЭЭ) коэффициентига қўшган ҳиссасини аниқлаш учун иккилламчи электронларнинг энергия

спектрлари ўлчанди. 8-расмда бомбардимон қилувчи висмут ионларидаги атомлар сонига боғлиқ ҳолда туллий нишоннинг бомбардимон қилиниши натижасида ҳосил бўлган иккилламчи электронларнинг энергия тақсимоти графиги кўрсатилган. Графиклардан кўриниб турибдики, бомбардимон қилувчи ионлардаги атомлар сони ортиши билан спектрлардаги квази-термал электронлар улуши ортади, бу эса термал чўққилар ҳосил бўлиши натижасида электронларнинг термал эмиссияси ҳиссасини кўрсатади. Шундай қилиб, ушбу ўлчовлар зич ночизиқли каскадлар режими пайдо бўлишини ҳамда ион ва электронларнинг термал эмиссияси учун қўшимча каналлар яратилишини кўрсатади.



8-расм. 2 кэВ энергияга эга Bi_m^- кластер ионлари билан Tm нишонни бомбардимон қилиш жараёнида иккилламчи электронларнинг энергия тақсимоти.

9-расм. Tb нишоннинг ИЭЭ нинг интегралланган коэффициентлари бомбардимон қилувчи Au_m^- ионларидаги ҳар бир атомга тўғри келадиган энергияга боғлиқ ҳолда, бомбардимон қилувчи кластер ионидаги битта атомга нисбатан нормаллаштирилган боғликлари.

Бундан ташқари, бу бобда торрий нишонини Au_m^- ($m=1-9$) манфий кластер ионлари билан бомбардимон вақтидаги иккиламчи эмиссия жараёнлари тадқиқотлари келтирилган. 9-расмда бомбардимон кластер ионидаги ҳар бир атомга нормаллаштирилган ҳолда Tb нишоннинг ИЭЭ нинг интеграл коэффициентлари, бомбардимон ионларидаги Au_m^- атомларининг ҳар бир атомига тўғри келадиган энергияга боғлиқ равишда келтирилган. Графикдан кўришимиз мумкинки, бомбардимон ионларидаги атомлар сони ортиши билан интеграл коэффициентларнинг ноаддитив ўсиши кузатиляпти. Tb нишоннинг Au_m^- кластер ионлари билан бомбардимон қилиниши давомида ИЭЭ ўлчовлари бомбардимон қилувчи ионлардаги атомлар сони ортиши билан интеграл коэффициентларнинг ноаддитив ўсишини кўрсатди. ИЭЭ коэффициентига турли механизмларнинг ҳиссасини аниқлаш учун иккиламчи электронларнинг

энергия спектрлари ўлчанди. Бомбардимон ионларидағи атомлар сони ортган сари спектрларда квази-иссиқлик электронларининг улуши ортгани күзатылды, бу эса иссиқлик чўққиларининг шаклланиши натижасида иссиқлик электрон эмиссиясининг ҳиссаси борлигини кўрсатади.

ХУЛОСАЛАР

Ушбу диссертация иши доирасида намуналарни кластер ва кўп зарядли висмут ва олтин ионлари билан бомбардимон вақтидағи иккиламчи ионлар эмиссиясида нозичиқли ва ноаддитив жараёнларнинг тажриба натижаларидан қўйидаги асосий хулосаларни қилиш мумкин.

1. Биринчи марта GaAs нишонини 1-10 кэВ энергия диапазонида Bi^m+ ($m=1-5$) кластер ионлари билан бомбардимон қилиш натижасида ҳосил бўлаётган нейтрал галлий атомлари, сирт ионлашуви асосланган пост ионлашиш усули ёрдамида иридий эмиттер юзасида мусбат ионларга айлантирилди. Иккиламчи эмиссия натижасида ҳосил бўлаётган галлий ионлари ва нейтрал галлий атомларини чиқишини ўлчаниш натижасида, нейтрал галлий атомларнинг чиқиши, дастлабки ионлашган галлий атомларига нисбатдан интенсивлиги икки марта юқори эканлиги аниқланди.

2. Бирламчи кластер ионларидағи атомлар сонининг ортиши билан ионланиш эҳтимолигининг 0.6 мартаға қадар камайиши аниқланди. Иккиламчи ионлар ва нейтрал галлий атомлари учун, бирламчи бомбардимон кластер ионидаги ҳар бир атомнинг энергияси ортиши билан, ноаддитивлик коэффициентларининг камайиш тенденцияси аниқланди. Бу GaAs нишонини 1-10 кэВ энергия диапазонида Bi^m+ ($m=1-5$) кластер ионлари билан бомбардимон қилиш йўли билан иккиламчи ионларнинг чиқиши чангланган галлий ионларининг ионланиш эҳтимолини ҳисоблаш орқали амалга оширилди.

3. GaAs намунаси юзасини 2-10 кэВ энергия диапазонидаги кўп зарядли Bi^q+ ионлари билан бомбардимон қилинганда, матрица ионлари (Ga^+ , Ga^{2+} , As^+), шунингдек, адсорбцияланган ионлар ва аралашмалар ионлари (C^+ , H_2O^+ , Na^+ , Al^+ , K^+ , Ni^+ , Cu^+ , Cs^+ , Bi^n+) чиқишининг бир неча баробарга ортиши күзатылди. Бу ўсиш кўп зарядли ионларнинг заряди ортиши билан боғлиқлиги аниқланди.

4. Иккиламчи ионлар чиқишининг кўп зарядли ионлар заряди ортиши билан айниқса, нисбатан юқори ионлашиш потенциалига эга ионлар учун яққол намоён бўлиши аниқланди. Масс-спектрометр фазосида ҳаракатланаётган ионлар ва тўғридан-тўғри контакт натижасида чиқсан атомлар ўртасидаги юз берадиган заряд алмашинуви бирламчи ионлар ва секин ҳаракатланувчи кўп зарядли ионлар билан бомбардимон қилинганда, чиқсан зарраларнинг ионлашиш коэффициенти ортишининг асосий сабаб эканлиги билан тасдиқланди.

5. Ион-фотон эмиссия Та намунаси юзасини кластер ва кўп зарядланган Bi^mq^+ ($m=1-4$, ($q=1-6$) ионлари билан бомбардимон қилиниш шароитида

аниқланди. Бирламчи висмут кластер ионларидаги атомларнинг сонини ортиши билан ИФЭ чиқишининг ноаддитив ортиши кузатилди. Бирламчи ионлардаги атомларнинг сони ва энергияси ортиши билан ИФЭ нинг интеграл чиқишининг ноаддитив ўсиши, зич тўқнашув каскадлари соҳасидан атомларнинг қўшимча чиқиши, қўзғалиши билан боғлиқ бўлиб, бу эса юзада термал чўққиларининг ҳосил бўлишига олиб келади. ИФЭ чиқиши кўп зарядланган ионларнинг зарядига $q < 4$ бўлганда заиф боғлиқ экани ва заряд 3 дан 6 гача ўзгарганда ортиши кузатилди.

6. Тм намунаси юзасини V_i кластер ионлари билан бомбардимон қилиш жараёнида ИФЭ тадқиқи бомбардимон қилувчи ионлардаги атомлар сони ортиши билан интеграл коэффициентларнинг ортиши аниқланди. Шунингдек, Тм ва Tb нишонларининг V_i ва Au кластер ионлари билан бомбардимон қилиниши жараёнида ИФЭ катталиклари бирламчи ионлардаги атомлар сони ортиши билан эмиссия чиқишининг ноаддитивлигини 2 марта гача ортиши аниқланди.

7. Тулийнинг ИФЭ спектрида 400–600 нм диапазонида жойлашган ва $4f^{13}6s$ бр ҳамда $4f^{12}5d6s^2$ конфигурацияларнинг асосий ҳолатига ўтишларига мос келувчи 16 та резонанс чизиқлар аниқланиб, идентификация қилинди. Тм нишонининг кластер ионлари билан бомбардимон қилинишида ИФЭ тадқиқотлари интеграл ИФЭ коэффициентларининг бирламчи ионлардаги атомлар сони ортиши билан ноаддитив ўсишини кўрсатди, бу жараён термал чўққилар худудидан тарқалган атомларнинг қўшимча уйғотилиши билан боғлиқлиги аниқланди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSC.02/30.12.2019.FM/Т.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**
ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАХРАМОНОВА ГУЛИСТОН ПАРДАЕВНА

**ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ
ЭЛЕМЕНТОВ GaAs, Ta, Tb, ТМ КЛАСТЕРНЫМИ И
МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ**

01.04.04- Физическая электроника

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

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инновация Республики Узбекистан за номером № B2025.1.PhD/FM1242.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова.

Автореферат диссертации на трёх 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:

Усманов Дилшадбек Турсунбаевич

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Кутлиев Учкун Отобоевич

доктор физико-математических наук, профессор.

Сайдумаров Ильхомжон Миралимович

кандидат физико-математических наук, доцент.

Ведущая организация:

Ташкентский Государственный Технический

Университет

Защита диссертации состоится «16» декабря 2025 г. в 16⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 присуждению учёных степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз (по адресу: 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 № 19). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.: (+99871) 262-31-69.

Автореферат диссертации разослан «02» декабря 2025 года.

(Реестр протокола рассылки № 19 от «02» декабря 2025 года).



Х.Б. Ашурев
председатель Научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, профессор.

И.Д. Ядгаров
учёный секретарь Научного совета по присуждению учёных степеней, доктор физико-математических наук, профессор.

У.К. Махманов
председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению учёных степеней, доктор физико-математических наук, профессор.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы. В мире в настоящее время развивается широкомасштабное внедрение наноматериалов и нанотехнологий во все сферы. Одной из больших перспектив внедрения нанотехнологий для современного технического прогресса является разработка новых и усовершенствованных наноструктурных методов анализа поверхностей твёрдых тел, а также их применение в производстве, что имеет большое научное и практическое значение. В изучении области нано- и микроэлектроники важное место занимают масс-спектрометрические методы ионизации, в частности метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Применение кластерных и многозарядных ионов при эмиссии вторичных ионов вносит значительный вклад в дальнейшее развитие данной области.

В мире в настоящее время бомбардировка твёрдых тел кластерными и многозарядными ионами предоставляет уникальную возможность наблюдать переход от области относительно хорошо изученных линейных каскадов столкновений к формированию нелинейных плотных каскадов, связанных с новыми эмиссионными явлениями. Особенностью кластерной бомбардировки является то, что в результате одновременного воздействия нескольких атомов, составляющих кластерный ион, на малую (порядка нескольких ангстрем) поверхность, происходит интерференция каскадов, создаваемых каждым атомом, и формируются нелинейные плотные каскадные столкновения. В этом случае при замедлении иона возникают ряд новых эффектов в процессах вторичной эмиссии, связанных с высокой плотностью выделения энергии. Например, при переходе к бомбардировке кластерными ионами эффективность выбивания крупных молекул возрастает в сотни и тысячи раз, что приводит к значительным количественным и качественным достижениям при анализе органических и биоорганических материалов с использованием метода ВИМС. Кроме того, изучение фундаментальных процессов, происходящих при взаимодействии кластерных и многозарядных ионов с поверхностью твёрдого тела, точное понимание физической сущности данного явления, а также целенаправленное и полное использование его в современных технологиях являются одной из актуальных задач физической электроники.

В нашей республике актуальность исследования нелинейных и неаддитивных (неподсуммируемых) процессов, происходящих при взаимодействии многоатомных частиц с поверхностью твёрдого тела, определяется возможностью получения новых сведений о физических механизмах ионного распыления, а также вероятностью практического применения данных явлений в современных технологиях. В условиях такой бомбардировки атомы, составляющие один ускоренный кластер или многозарядный ион, попадают на поверхность в пределах одной элементарной ячейки в течение $\sim 10^{-15}$ секунды. Это приводит к выделению аномально высокой локальной плотности энергии на поверхности, что невозможно при бомбардировке одноатомными ионами. Изучение процессов вторичной

эмиссии в таких условиях позволяет получить новую информацию о механизмах этих процессов. Неаддитивные и нелинейные процессы во вторичной эмиссии до настоящего времени остаются одной из недостаточно изученных областей.

Данная диссертационная работа в достаточной степени способствует выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан № ПФ-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», Указом № ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Указом № ПФ-6097 от 29 октября 2020 года «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года», а также Постановлением № ПҚ-4422 от 22 августа 2019 года «О мероприятиях по повышению энергоэффективности в экономике и социальной сфере, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», и другими нормативными документами, принятыми в нашей республике в последние годы в данной области.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Исследование выполнялось в соответствии с приоритетными направлениями развития науки, техники и технологий Республики Узбекистан и способствует реализации задач по направлению III «Энергетика, энергосбережение и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; современная электроника, микроэлектроника, фотоника, развитие электронных приборов», а также в рамках направления ПФИ-2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы. До настоящего времени методом ВИМС было исследовано большое количество элементов, их смесей, органических и биоорганических веществ. Метод ВИМС является одним из наиболее важных методов для изучения ряда физических и химических свойств образцов. Он предоставляет возможность исследовать процессы, возникающие в результате взаимодействия при бомбардировке исследуемых образцов атомарными, молекулярными, кластерными и многозарядными ионами на поверхности и в приповерхностных слоях. В ведущих научных центрах мира, таких как А. Вухер (Германия), А. Делькорте (Бельгия), Ж. Матсую (Япония), А. Толсогузов (Россия) и многие другие, проводятся исследования образцов методом ВИМС с использованием кластерных и многозарядных ионов. Однако большинство из них выполняли исследования с помощью высокоэнергетических первичных ионов, изучая вторичные частицы, образующиеся в процессе распыления образцов.

В нашей республике в данной области были проведены многочисленные научные исследования учёными У.Х. Расуловым, С.Ф. Белых, С.Н. Морозовым, С.В. Верхотуровым, Н.Х. Джемелевым, С.Е. Максимовым и Д.Т. Усмановым. В настоящее время исследование нелинейных и неаддитивных выходов

вторичных ионов, возникающих в процессах вторичной эмиссии, с использованием низкоэнергетических кластерных и многозарядных ионов имеет исключительно важное значение для изучения фундаментальных характеристик эмиссии вторичных ионов.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.

Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планами базового финансирования Института ионно-плазменных и лазерных технологий по следующим направлениям: «Взаимодействие многоатомных частиц с поверхностью твёрдых тел в вакууме и при атмосферных условиях, разработка новых методов ионизации активных органических веществ» (2021–2023); «Исследование термоэлектронной и вторичной эмиссии с поверхности твёрдых тел для веществ, подверженных злоупотреблению» (2024–2025).

Целью исследования является изучение нелинейных и неаддитивных эффектов в процессах вторичной эмиссии при бомбардировке поверхности твёрдых тел низкоэнергетическими многоатомными кластерными и многозарядными ионами методом вторичной ионной масс-спектрометрии.

Задачи исследования заключаются в следующем:

изучение нелинейного и неаддитивного выхода ионов галлия при бомбардировке мишени GaAs кластерными ионами Bi_m^+ ($m=1-5$) с энергией 1–10 кэВ и оценка вероятности ионизации вторичных ионов;

совершенствование источника ионов, основанного на поверхностной ионизации, и исследование нейтральных атомов галлия, образующихся при бомбардировке мишени GaAs кластерными ионами методом постионизации;

изучение нелинейных и неаддитивных процессов при выходе вторичных ионов при бомбардировке мишени GaAs многозарядными ионами Bi^{q+} ($q=1-6$) с энергией 1–10 кэВ;

исследование нелинейных и неаддитивных процессов в ионно-фотонной эмиссии при бомбардировке мишени Та кластерными и многозарядными ионами Bi_m^+ ($m=1-4$) с энергией 2–12 кэВ;

исследование вторичной ионной, ионно-фотонной и вторичной электронной эмиссий при бомбардировке мишеней Tb и Tm отрицательными кластерными ионами Au_m^- ($m=1-9$) и Bi_m^- ($m=1-7$) с энергией 1–21 кэВ.

В качестве **объекта исследования** были выбраны элементы: арсенид галлия (GaAs), tantal (Ta), тербий (Tb) и тулий (Tm).

Предметом исследования являются нелинейные и неаддитивные эффекты в процессах вторичной ионной, ионно-фотонной и ионно-электронной эмиссии.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы вторичной ионной масс-спектрометрии, поверхностной ионизации, а также методы регистрации кривых ионно-электронной и ионно-фотонной эмиссий.

Научная новизна исследования заключается в следующих результатах:

впервые методом постионизации, основанным на поверхностной ионизации, на поверхности иридиевого эмиттера нейтральные атомы галлия,

образующиеся при бомбардировке мишени GaAs кластерными ионами Bi_m^+ ($m=1-5$) в диапазоне энергий 1–10 кэВ, были превращены в положительные ионы, и для нейтральных атомов галлия установлена тенденция уменьшения коэффициентов неаддитивности с увеличением энергии, приходящейся на каждый атом в бомбардирующем кластерном ионе;

при бомбардировке мишени GaAs многозарядными ионами Bi^{q+} в диапазоне энергий 2–10 кэВ установлено, что многократное увеличение выхода матричных ионов (Ga^+ , Ga^{2+} , As^+), а также ионов адсорбированных частиц и примесей (C^+ , H_2O^+ , Na^+ , Al^+ , K^+ , Ni^+ , Cu^+ , Cs^+ , Bi^{n+}) связано с увеличением заряда первичных бомбардирующих ионов, причём данная зависимость более выражена для ионов с высоким потенциалом ионизации. Это объясняется обменом заряда между распылёнными атомами в результате прямых столкновений;

при бомбардировке поверхности мишени Ta кластерными и многозарядными ионами Bi_m^{q+} ($m=1-4$), ($q=1-6$) установлено, что выход ионно-фотонной эмиссии (ИФЭ) увеличивается неаддитивно с ростом числа атомов в первичных висмутовых кластерных ионах, что связано с локальным уплотнением энергии на поверхности, увеличением доли возбужденных атомов и высоким потенциалом энергии ионов, обуславливающим усиленный электронный обмен с поверхностью;

установлено, что с увеличением числа атомов и энергии в первичных кластерных и многозарядных ионах наблюдается неаддитивный рост интегрального выхода ИФЭ тантала, связанный с дополнительным выбиванием и возбуждением атомов из области плотных каскадов столкновений, что приводит к образованию термических пиков на поверхности; также выявлено, что выход ИФЭ слабо зависит от заряда многозарядных ионов при $q < 4$ и увеличивается только при росте заряда от 3 до 6;

установлено, что при увеличении числа атомов в первичных ионах Bi и Au , бомбардирующих мишени Tm и Tb , происходит неаддитивное увеличение выхода ИФЭ, вызванное одновременным усилением процессов локального уплотнения энергии на поверхности, возбуждения электронов и локального нагрева;

в результате исследований ИФЭ установлено, что при бомбардировке поверхности мишени Tm кластерными ионами Bi наблюдается неаддитивный рост интегральных коэффициентов ИФЭ с увеличением числа атомов в бомбардирующих ионах, что связано с дополнительным возбуждением атомов, рассеиваемых из областей термических пиков на поверхности.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

система, предназначенная для исследования нейтральных атомов на основе чувствительного и селективного метода поверхностной ионизации, была усовершенствована до уровня, обеспечивающего точность, превышающую современные методы постиионизации в 100 раз, при этом полученные

результаты оказались более чувствительными и менее затратными по сравнению с существующими лазерными методами постиионизации;

метод ВИМС был усовершенствован для элементов GaAs, Ta, Tb и Tm, и изучена возможность его применения для диагностики поверхности твёрдых тел.

Достоверность результатов исследования обоснована использованием методов вторичной ионной масс-спектрометрии, ионно-фотонной и ионно-электронной эмиссий, детальным и полным анализом условий эксперимента и статистики, а также применением современных высокоточных измерительных приборов;

полученные экспериментальные результаты основаны на тщательно проведённых расчётах и обработаны с применением статистических методов с учётом возможных погрешностей; полученные экспериментальные данные и приведённые выводы соответствуют современным исследованиям, посвящённым изучению механизмов ионизации вторичной ионной эмиссии в условиях высокого вакуума.

Научное и практическое значение результатов исследования.

Научное значение результатов исследования заключается в том, что комплексное изучение нелинейных и неаддитивных эффектов, происходящих в процессах вторичной эмиссии при бомбардировке полупроводникового GaAs и элементов Ta, Tm, Tb кластерными и многозарядными ионами, вносит значительный вклад в выявление закономерностей механизма вторичной ионной эмиссии.

Практическое значение результатов исследования состоит в том, что данные исследования связаны с разработкой и применением высокоселективных и чувствительных методов и устройств поверхностной ионизации, охватывающих задачи совершенствования метода вторичной ионной масс-спектрометрии для нужд материаловедения, диагностики поверхностей и нанотехнологий. В частности, создание кластерного микрозонда для измерения сверхмалых примесей в полупроводниках является актуальной задачей для применения в наноструктурных технологиях.

Внедрение результатов исследования. На основе комплексного изучения нелинейных и неаддитивных эффектов, происходящих в процессах вторичной эмиссии при бомбардировке полупроводникового GaAs и элементов Ta, Tm, Tb кластерными и многозарядными ионами:

– полученные научные результаты при бомбардировке полупроводниковой мишени арсенида галлия низкоэнергетическими (1–10 кэВ) кластерными и многозарядными ионами висмута были использованы при выполнении научного проекта № IL-4821091667 «Диэлектрическо-металлические переходы и механизмы электропроводности в оксидных полупроводниковых аморфных материалах» (справка № 01/11-20230 от 25.09.2025 года Национального университета Узбекистана). Применение полученных научных результатов позволило глубже понять механизмы

диэлектрическо-металлических переходов в оксидных аморфных полупроводниках, а также объяснить физико-химические фундаментальные закономерности, связанные с изменением электронных и структурных свойств материала и с процессами эмиссии, возникающими вследствие ионной бомбардировки;

– полученные научные результаты при исследовании ионно-фотонной эмиссии при бомбардировке поверхности мишени тантала кластерными и многозарядными ионами Bi_m^{q+} ($m=1-4$, $q=1-6$) были использованы при выполнении научно-практического проекта № MRB-2021-521 «Создание новых прочных наноструктурных материалов на основе оксидов алюминия и тантала» (справка № 01/9-14-2630 от 27.09.2025 года Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова). Применение полученных научных результатов в проекте позволило изучить распределение оксида тантала в алюминиевом сплаве при процессе легирования, а также глубже понять научные основы технологии преобразования двухслойной тонкоплёночной системы Ta/Al, образующейся в результате электрохимического анодирования в кислотных электролитах, в композитную матричную систему анодных оксидов алюминия и тантала.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 8 международных и республиканских конференциях.

Публикация результатов исследования. Научные результаты, полученные по теме диссертационной работы, изложены в 13 научных публикациях, из которых 5 – это научные статьи, включая 3 статьи, опубликованные за рубежом, и 2 статьи – в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Объем и структура диссертации. Структура диссертации включает введение, четыре главы, выводы, список опубликованных работ, список использованной литературы и приложения. Общий объём диссертации составляет 123 страницы и включает 40 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

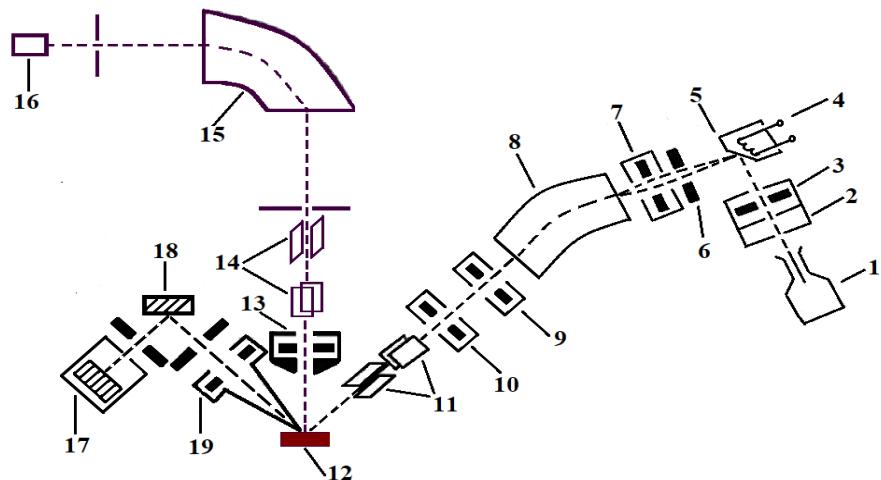
В введении обоснованы актуальность и необходимость выбранной темы, сформулированы основная цель и задачи проведённых исследований, определены объект, предмет и методы исследования, показано соответствие работы приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, раскрыта научная новизна, изложены научная и практическая значимость полученных результатов, сведения об их практическом использовании, публикационной активности и апробации, а также кратко представлена структура и объём диссертации.

В первой главе диссертации, названной «Современное состояние исследований процессов вторичной эмиссии», подробно изложен анализ

текущего уровня изученности физических процессов, определяющих выходы вторичной эмиссии при бомбардировке поверхности мишени атомарными, кластерными, многозарядными и молекулярными первичными ионами. Приведены исследования по вторичной ионной масс-спектрометрии для полупроводника GaAs, а также элементов Та, Тм и Тб. Рассмотрены процессы вторичной ионной эмиссии, ион-фотонной эмиссии и ионно-электронной эмиссии. Установлено, что при бомбардировке мишени многоатомными кластерными, молекулярными и многозарядными ионами наблюдается резкое увеличение выходов вторичной эмиссии с поверхности, что способствует более глубокому пониманию протекающих на поверхности процессов. К настоящему времени линейные каскады столкновений при бомбардировке кластерными и многозарядными ионами изучены в достаточной степени. В конце главы сформулированы основные выводы и постановка проблемы. Анализ литературы позволяет заключить, что, несмотря на достигнутые успехи, нелинейные каскады и неаддитивные эффекты при низких энергиях первичных бомбардирующих ионов исследованы недостаточно. До настоящего времени механизм распыления многоатомных кластеров окончательно не установлен, и его полноценная разработка требует дальнейших экспериментальных исследований. В связи с этим изучение нелинейных каскадов и неаддитивных эффектов во вторичных эмиссионных процессах при бомбардировке полупроводников и редкоземельных элементов низкоэнергетическими первичными кластерными и многозарядными ионами позволит прояснить механизмы распыления кластерных ионов во вторичной эмиссии. Актуальность подобных исследований обусловлена, с одной стороны, необходимостью получения фундаментальных знаний о процессах распыления ионов, а с другой – широкими перспективами многопланового практического использования кластеров.

Во второй главе диссертации, названной **«Описание экспериментального оборудования и методов исследования»**, подробно представлены экспериментальные установки, образцы, реагенты и методики. Для выполнения поставленных научных целей и задач использованы модернизированная масс-спектрометрическая установка, источники положительных и отрицательных кластерных и многозарядных ионов Ві и Au, усовершенствованный источник ионов для поверхностной ионизации для исследования нейтральных компонентов, а также системы измерения ион-фотонной эмиссии (ИФЭ). Для изучения нелинейных каскадов и неаддитивных эффектов, возникающих в процессах вторичной эмиссии, применён модернизированный двухфокусный статический магнитный масс-спектрометр МИ-1201. Масс-спектрометр включает источники первичных кластерных и многозарядных ионов, магнитный сепаратор первичных ионов и магнитный анализатор вторичных ионов на базе масс-спектрометра МИ-1201. Экспериментальная установка была усовершенствована с целью расширения диапазона масс и энергий исходных кластерных, молекулярных и многозарядных ионов, а также для обеспечения

возможности измерения нейтральных компонентов распыления методом поверхностной ионизации. Схема масс-спектрометра приведена на рис. 1. Источники ионов обеспечивают формирование кластерных и многозарядных ионов (в том числе отрицательных кластерных ионов Bi^- , Au^-), их сепарацию и ускорение ионов до энергий до 21 кэВ. Масс-спектрометр вторичных ионов позволяет анализировать вторичные кластерные ионы в диапазоне масс до 4000 а.е.м. с разрешающей способностью до 400, а также исследовать энергетическое распределение вторичных ионов.



1-рисунок. Схема экспериментальной установки: 1–3 – источники ионов Cs^+ для поверхностной ионизации, 4–5 – часть для ионизации электронным воздействием, 6–11 – сепаратор первичных ионов, 12 – мишень, используемая в качестве объекта исследования, 13–16 – сепаратор вторичных ионов, 17 – ячейка Кнудсена, 18 – термоэмиттер, 19 – линза Эйнзеля.

Масс-спектрометрическая установка модернизирована и дополнена системой измерения ИФЭ. Оптическое излучение распылённых атомов собирается из ореола вблизи поверхности мишени и регистрируется с помощью высокоэффективного фотоумножителя EMI 6256 В. Эта установка оснащена многощелевым катодом с кварцевым окном и позволяет регистрировать излучение в диапазоне 250–700 нм. Первичные отрицательные и положительные кластерные ионы Bi_m^- ($m = 1–5$) формируются в ионном источнике путём распыления висмутовой мишени положительными ионами цезия, после чего в секторном магнитном поле первичного тракта экспериментальной установки разделяются по числу атомов. На второй экспериментальной установке спектры ИФЭ туния изучались с использованием монохроматора, ксенонового ионного источника и системы ускорения до 40 кэВ. Мишень Тм бомбардировалась ионами Xe^+ по нормали. Оптическое излучение вторичных атомов собиралось из ореола вблизи поверхности мишени и анализировалось с помощью монохроматора и фотоумножителя EMI 6256 В.

Также в данной главе подробно описаны кластерные и многозарядные источники ионов, использованные для получения вторичных ионов,

исследованные образцы и методики исследований, а также системы поверхностной ионизации, применённые для пост-ионизации образующихся нейтральных частиц.

В третьей главе диссертации, озаглавленной «Исследование нелинейных и неаддитивных эффектов в процессах вторичной эмиссии при распылении GaAs под бомбардировкой кластерными и многозарядными ионами Bi», приведены результаты изучения нелинейных каскадов и неаддитивных эффектов в процессах вторичной эмиссии при бомбардировке полупроводника галлий арсенид низкоэнергетическими положительными кластерными ионами Bi. GaAs является важным полупроводником и широко применяется в промышленности. При бомбардировке мишени GaAs кластерными ионами Bi_m^+ ($m = 1-5$) в диапазоне энергий 1–10 кэВ образующиеся вторичные ионы, а также выходящие нейтральные атомы галлия переводились в положительные ионы методом пост-ионизации поверхности ионизацией. На рис. 2 приведена зависимость выхода вторичных ионов Ga^+ при бомбардировке мишени GaAs кластерными ионами Bi_m^+ ($m = 1-5$) от энергии бомбардирующих ионов. Наблюдается неаддитивный рост выхода вторичных ионов Ga^+ по мере увеличения числа атомов в бомбардирующем первичном ионе.

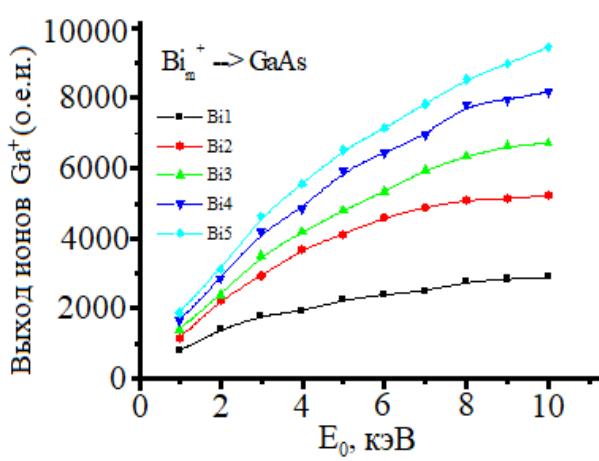


Рис. 2. График зависимости выхода вторичных ионов Ga^+ при бомбардировке монокристаллической мишени GaAs кластерными ионами Bi_m^+ от энергии бомбардирующих ионов ($m = 1-5$).

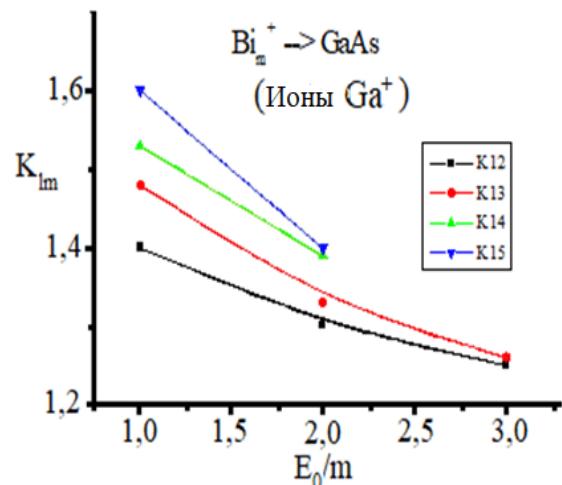


Рис. 3. Зависимости коэффициентов неаддитивности выхода вторичных ионов галлия $K_{m,m'}$ от энергии, приходящейся на один атом в бомбардирующем кластерном ионе.

На рис. 2 представлен график зависимости коэффициентов неаддитивности выхода вторичных ионов галлия ($K_{m,m'}$) от энергии, приходящейся на один атом в бомбардирующем кластерном ионе. Из зависимостей видно, что с ростом удельной энергии на атом в бомбардирующем кластерном ионе наблюдается тенденция снижения коэффициентов неаддитивности. Фактор

неаддитивного выхода распылённых ионов галлия определялся по следующей формуле:

$$K_{m,m'} = m'Y_m/mY_{m'} \quad (1)$$

где Y_m и $Y_{m'}$ – выходы ионов галлия при бомбардировке кластерными ионами, содержащими соответственно (m) и (m') атомов и обладающими одинаковой энергией на один атом.

Исследование нейтральных атомов, образующихся в процессах вторичной эмиссии, способствует более полному пониманию формирования кластеров в этих процессах. В выполненных ранее исследованиях в системе, основанной на источнике поверхностной ионизации (ПИ) для измерения выхода нейтральных атомов, в качестве эмиттера использовался оксидированный вольфрам. Это, в свою очередь, не позволяет измерять выход нейтральных атомов галлия при высоких температурах, поскольку при повышении температуры эмиттера оксидная плёнка начинает испаряться, что приводит к снижению работы выхода эмиттера. Поэтому выход нейтральных атомов галлия измерялся методом ПИ на поверхности иридиевого эмиттера согласно разработанной схеме; при этом атомы галлия переводились в ионы Ga^+ и регистрировались во вторичном тракте масс-спектрометра. Полученные результаты представлены на рис. 4, где показана зависимость выхода распылённых нейтральных атомов галлия от энергии бомбардировки кластерными ионами ($m=1-5$). Из графика видно, что по сравнению с выходом ионов выход атомов галлия демонстрирует более выраженный рост с увеличением энергии и числа атомов в бомбардирующем кластерном ионе.

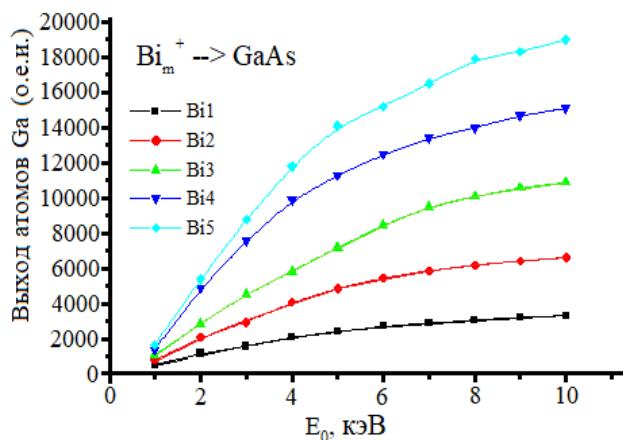


Рис. 4. Зависимости выхода нейтральных атомов галлия от энергии бомбардировки кластерными ионами Bi_m^+ ($m = 1-5$).

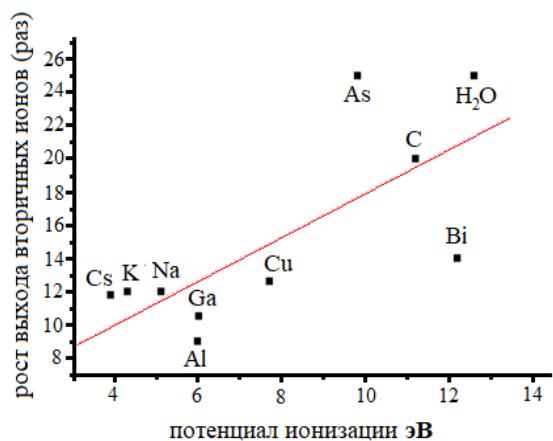


Рис. 5. График зависимости коэффициентов роста выхода вторичных ионов на единицу заряда от потенциалов ионизации при увеличении заряда многозарядных ионов с 1 до 6; минимальная кинетическая энергия первичных ионов – 2 кэВ.

Кроме того, в данной главе изучены зависимости выходов вторичных ионов матрицы (Ga^+ , Ga_2^+ , As^+), а также адсорбированных и примесных ионов

(C⁺, H₂O⁺, Na⁺, Al⁺, K⁺, Ni⁺, Cu⁺, Cs⁺, Bi_n⁺) при бомбардировке монокристалла GaAs многозарядными ионами Bi_q⁺ (q = 1–6) в диапазоне энергий 1–10 кэВ от заряда и энергии бомбардирующих многозарядных ионов (МЗИ).

Также исследованы зависимости коэффициентов неаддитивности выхода нейтральных атомов галлия, распылённых с поверхности, от энергии бомбардирующих ионов Bi_m⁺ (m = 1–5). Из полученных зависимостей установлено, что с ростом энергии, приходящейся на один атом в бомбардирующем кластерном ионе, коэффициенты неаддитивности уменьшаются. В полученных масс-спектрах вторичной эмиссии наблюдалось значительное содержание щелочных ионов натрия, калия и цезия. В связи с этим изучены зависимости выходов вторичных ионов Na⁺, K⁺, Cs⁺ от заряда и энергии бомбардирующих ионов Bi^{q+}. При изменении заряда МЗИ от 1 до 6 фиксируется заметный рост выхода щелочных ионов в 8–12 раз. Наибольшее увеличение на единицу заряда МЗИ наблюдалось при энергии 2 кэВ, наименьшее – при 10 кэВ.

В масс-спектрах вторичной эмиссии также зарегистрированы ионы примесных соединений C⁺, H₂O⁺, Al⁺, Ni⁺, Cu⁺, а также ионы Bi_n⁺ первичных ионов, имплантированных из пучка висмута, как в атомной, так и в кластерной формах. Изучены зависимости выходов вторичных ионов примесей C⁺, H₂O⁺, Al⁺, Cu⁺ от энергии и заряда МЗИ. Установлено, что наиболее сильный рост выхода (при изменении заряда с 1 до 6) проявляется для молекулярного иона H₂O⁺ адсорбционной природы и составляет 11–25 раз при энергиях соответственно 10 кэВ и 2 кэВ.

Общая закономерность для всех вторичных ионов состоит в том, что при снижении кинетической энергии бомбардирующих ионов увеличение заряда МЗИ приводит к более выраженному росту выхода. Также наблюдается корреляция этого роста с потенциалами ионизации распыляемых частиц. Это наглядно показано на рис. 5, где приведена зависимость коэффициентов выхода вторичных ионов от потенциалов ионизации при увеличении заряда МЗИ от 1 до 6; здесь кинетическая энергия первичных ионов указана минимальной – 2 кэВ – относительно заряда МЗИ.

В четвёртой главе диссертации «**Исследование нелинейных и неаддитивных эффектов во вторичных эмиссионных процессах при бомбардировке мишней Та, Tb и Tm кластерными и многозарядными ионами Bi**» представлены результаты исследований нелинейных и неаддитивных эффектов в ион-фотонной и ионно-электронной эмиссии при бомбардировке элементов Та и Tm кластерными и многозарядными ионами Bi, а также элемента Tb – отрицательными кластерными ионами Au. Сначала были выполнены измерения интегрального выхода ион-фотонной эмиссии (ИФЭ) при бомбардировке мишени из тантала положительными кластерными ионами Bi_m⁺ (m = 1–4) в диапазоне энергий 2–12 кэВ. Из полученных результатов следует, что интегральный выход ИФЭ увеличивается по мере роста числа атомов в бомбардирующем кластерном ионе висмута, а также с увеличением

энергии бомбардировки. Для определения неаддитивности увеличения выхода ИФЭ в зависимости от числа атомов в кластере (молекулярный эффект) интегральные значения выхода ИФЭ и энергия бомбардирующих ионов были нормированы на число атомов в бомбардирующих ионах. Как видно из рис. 6, частный выход Y_{IP}/m существенно возрастает с увеличением числа атомов m в бомбардирующем кластерном ионе и его кинетической энергии. Неаддитивный рост интегрального выхода ИФЭ с ростом числа атомов и энергии бомбардирующих ионов связан с неаддитивностью выхода распыления. Кроме того, в условиях кластерной бомбардировки режим тепловых пиков может влиять на процесс возбуждения распыляемых атомов.

Многие исследователи, длительное время изучающие вторичную ионную эмиссию под действием многозарядных ионов, обсуждали механизм, известный как «кулоновский взрыв». Его суть заключается в том, что положительно заряженные ионы, возникающие в области нейтрализации многозарядного иона, расширяются под действием кулоновских сил отталкивания. Однако многочисленные экспериментальные работы свидетельствуют о том, что для медленных многозарядных ионов с зарядом менее 7–10 выход распыления металлов не увеличивается. Вместе с тем в ряде исследований отмечен рост вторичной ионной эмиссии, причём этот эффект проявляется особенно отчётливо при снижении энергии многозарядных ионов. Например, в некоторых работах высказывалось предположение о влиянии заряда приходящих ионов на процесс распыления в режиме прямого выбивания частиц. Если такой механизм обмена зарядом подтверждается, то при малых энергиях бомбардировки, то есть в условиях доминирования режима прямого выбивания, вероятность ионизации распыляемых частиц может существенно возрастать.

Выход ИФЭ измерен при бомбардировке мишеней Та многозарядными ионами Bi_q^+ ($q = 1–6$). Для корректного определения зависимости выхода Y_{IF} от заряда многозарядных ионов выполнен пересчёт результатов с учётом пропорциональности кинетической энергии многозарядного иона произведению его заряда на ускоряющее напряжение (рис. 7). Из зависимостей видно, что при $q < 4$ выход ИФЭ слабо зависит от заряда многозарядных ионов, тогда как при увеличении заряда с 3 до 6 наблюдается рост выхода ИФЭ.

В диапазоне низких энергий бомбардирующих ионов, когда кинетическая составляющая ион–ионной эмиссии стремится к нулю, рост потенциальной энергии ионизации многозарядных бомбардирующих ионов с увеличением их заряда проявляется в повышении выхода вторичных ионов. Эти результаты указывают на возможность обмена зарядом между падающими ионами и атомами, выбиваемыми в результате прямых столкновений. Такой обмен зарядом может быть основной причиной увеличения вероятности ионизации распыляемых частиц при бомбардировке медленно движущимися многозарядными ионами.

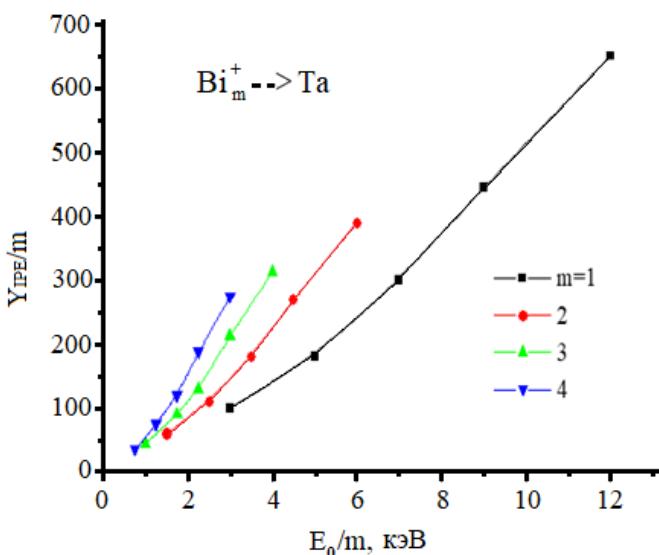


Рис. 6. Зависимость выхода ИФЭ для танталовой мишени, бомбардированной ионами Bi_m^+ , от энергии и числа атомов в бомбардирующих кластерных ионах, нормированная на число атомов в бомбардирующем ионе.

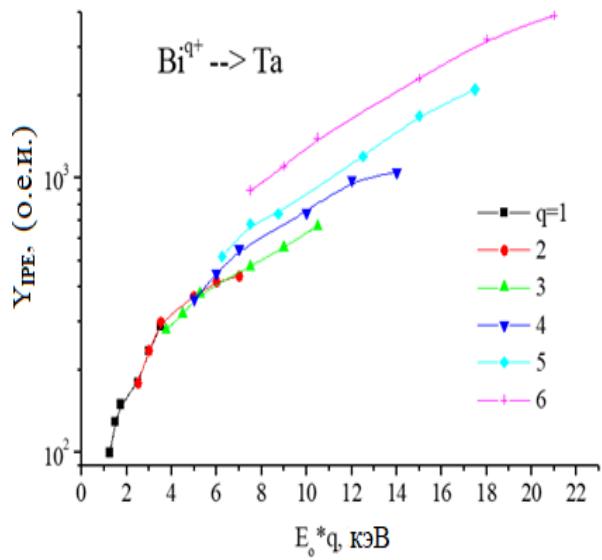


Рис. 7. График зависимости выхода ИФЭ энергии и заряда ионов при бомбардировке мишени Та многозарядными ионами Bi , с учётом кинетической энергии многозарядных ионов.

В процессах вторичной эмиссии значительная часть распылённых нейтральных частиц остаётся в возбужденном состоянии на поверхности и испускает фотоны в гало-области, расположенной вблизи поверхности мишени. Измерение оптических спектров и выхода ИФЭ предоставляет дополнительную важную информацию о характеристиках каскадов столкновений, тепловых пиков и неаддитивности распыления. Выбор тугия в качестве материала для изучения ИФЭ при кластерной бомбардировке связан с высоким фотонным выходом при распылении редкоземельных элементов, причём излучение преимущественно лежит в удобном для регистрации видимом спектральном диапазоне. По результатам исследований в спектре ИФЭ тугия идентифицировано 16 резонансных линий (Tm I) в диапазоне 400–600 нм, соответствующих переходам в основное состояние конфигураций $4f^{13}6s6p$ и $4f^{12}5d6s^2$. Для сопоставления эффективности возбуждения различным уровнем пропорционально их относительной заселённости полученные спектры ИФЭ были обработаны в соответствии с методикой [10]. Эффективность возбуждения уровней выражается как:

$$W = I \lambda^3 / g_k f_{ik}, \quad (2)$$

где g_k и f_{ik} – статистический вес возбужденного уровня и осцилляторная сила перехода, λ – длина волны линии, I – измеренная в эксперименте интенсивность линии (с учётом поправки на чувствительность монохроматора и фотоэлектронного умножителя).

Для определения вклада различных механизмов в коэффициент ионно-электронной эмиссии (ИЭЭ) были измерены энергетические спектры

вторичных электронов. На рис. 8 показано распределение по энергиям вторичных электронов, возникающих при бомбардировке мишени из туния, в зависимости от числа атомов в бомбардирующем ионе висмута. Из графиков видно, что с увеличением числа атомов в бомбардирующем ионе доля квазитермических электронов в спектрах возрастает, что указывает на вклад термической эмиссии электронов вследствие формирования тепловых пиков. Таким образом, данные измерения свидетельствуют о возникновении режима плотных нелинейных каскадов и о создании дополнительных каналов для термической эмиссии ионов и электронов.

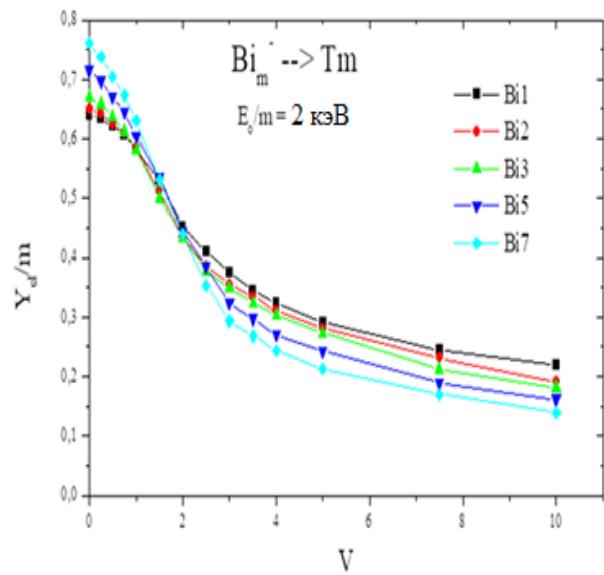


Рис. 8. Энергетическое распределение вторичных электронов при бомбардировке мишени Тм кластерными ионами Bi_m^- с энергией 2 кэВ.

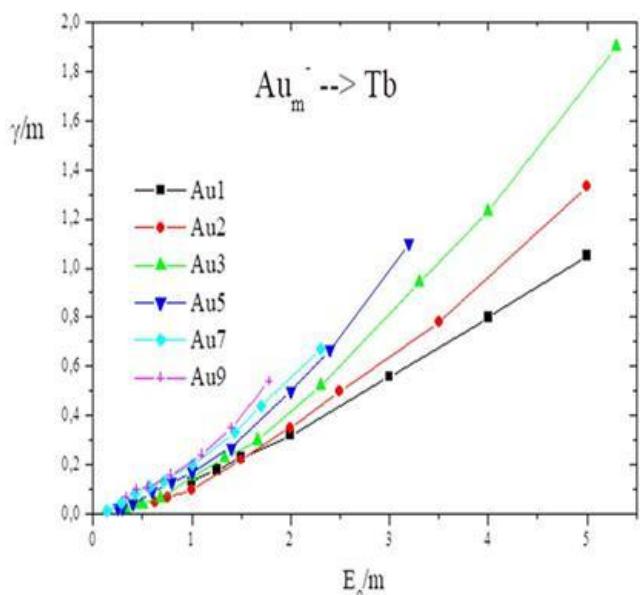


Рис. 9. Зависимости интегральных коэффициентов ИЭЭ мишени Тб от энергии, приходящейся на один атом в бомбардирующих ионах Au_m^- , нормированные на один атом в бомбардирующем кластерном ионе.

Кроме того, в данной главе представлены исследования процессов вторичной эмиссии при бомбардировке мишени из тербия отрицательными кластерными ионами Au_m^- ($m=1-9$). На рис. 9 приведена зависимость интегральных коэффициентов ИЭЭ для мишени Тб, нормированных на один атом в бомбардирующем кластерном ионе, от энергии, приходящейся на один атом в ионах Au_m^- . Из графика видно, что по мере увеличения числа атомов в бомбардирующем ионе наблюдается неаддитивный рост интегральных коэффициентов. Измерения ИЭЭ при бомбардировке мишени Тб кластерными ионами Au_m^- показали неаддитивное увеличение интегральных коэффициентов по мере роста числа атомов в бомбардирующих ионах. Для определения вклада различных механизмов в коэффициент ИЭЭ были измерены энергетические спектры вторичных электронов. Установлено, что с увеличением числа атомов в бомбардирующих ионах доля квази-тепловых электронов в спектрах

возрастает, что указывает на наличие вклада тепловой электронной эмиссии, возникающей в результате формирования тепловых пиков.

ВЫВОДЫ

В рамках данной диссертационной работы на основе экспериментальных результатов по изучению нелинейных и неаддитивных процессов вторичной ионной эмиссии при бомбардировке образцов кластерными и многозарядными ионами висмута и золота можно сделать следующие основные выводы.

1. Впервые при бомбардировке мишени GaAs кластерными ионами Bi_m^+ ($m=1-5$) в диапазоне энергий 1–10 кэВ нейтральные атомы галлия, образующиеся в результате вторичной эмиссии, были преобразованы в положительные ионы на поверхности иридиевого эмиттера с помощью метода постионизации, основанного на поверхностной ионизации. Измерение выхода ионов галлия и нейтральных атомов галлия, образующихся при вторичной эмиссии, показало, что интенсивность выхода нейтральных атомов галлия примерно в два раза выше по сравнению с предварительно ионизированными атомами галлия.

2. Установлено, что с увеличением числа атомов в первичных кластерных ионах вероятность ионизации уменьшается до 0,6 раза. Для вторичных ионов и нейтральных атомов галлия выявлена тенденция уменьшения коэффициентов неаддитивности с увеличением энергии, приходящейся на каждый атом в первичном бомбардирующем кластерном ионе. Это определено на основе расчёта вероятности ионизации распылённых ионов галлия при бомбардировке мишени GaAs кластерными ионами Bi_m^+ ($m=1-5$) в диапазоне энергий 1–10 кэВ.

3. При бомбардировке поверхности образца GaAs многозарядными ионами Bi^{q+} в диапазоне энергий 2–10 кэВ наблюдалось многократное увеличение выхода матричных ионов (Ga^+ , Ga^{2+} , As^+), а также ионов адсорбированных частиц и примесей (C^+ , H_2O^+ , Na^+ , Al^+ , K^+ , Ni^+ , Cu^+ , Cs^+ , Bi^{n+}). Установлено, что это увеличение связано с ростом заряда многозарядных ионов.

4. Определено, что рост выхода вторичных ионов с увеличением заряда многозарядных ионов наиболее явно проявляется для ионов с относительно высоким потенциалом ионизации. Подтверждено, что обмен заряда между ионами, движущимися в масс-спектрометрическом пространстве, и атомами, выбитыми в результате прямых столкновений, является основной причиной увеличения коэффициента ионизации распылённых частиц при бомбардировке первичными и медленно движущимися многозарядными ионами.

5. Ионно-фотонная эмиссия была зарегистрирована при бомбардировке поверхности образца Та кластерными и многозарядными ионами Bi_m^{q+} ($m=1-4$), ($q=1-6$). Наблюдалось неаддитивное увеличение выхода ИФЭ с ростом числа атомов в первичных висмутовых кластерных ионах. С увеличением числа атомов и энергии в первичных ионах выявлен неаддитивный рост интегрального выхода ИФЭ, связанный с дополнительным выбиванием и возбуждением атомов из области плотных каскадов столкновений, что приводит к образованию тепловых пиков на поверхности. Установлено, что

выход ИФЭ слабо зависит от заряда многозарядных ионов при $q < 4$ и увеличивается только при росте заряда от 3 до 6.

6. При исследовании ИФЭ в процессе бомбардировки поверхности образца Тм кластерными ионами Ві установлено увеличение интегральных коэффициентов с ростом числа атомов в бомбардирующих ионах. Кроме того, при бомбардировке мишени Тм и Тв кластерными ионами Ві и Au наблюдалось, что неаддитивность выхода ИФЭ возрастает до двух раз с увеличением числа атомов в первичных ионах.

7. В спектре ИФЭ туния были идентифицированы 16 резонансных линий в диапазоне 400–600 нм, соответствующих переходам в основных состояниях конфигураций $4f^{13}6s6p$ и $4f^{12}5d6s^2$. Исследования ИФЭ при бомбардировке поверхности мишени Тм кластерными ионами показали неаддитивный рост интегральных коэффициентов ИФЭ с увеличением числа атомов в первичных ионах, что связано с дополнительным возбуждением атомов, рассеиваемых из областей тепловых пиков на поверхности.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ARIFOV INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES**

ARIFOV INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

KAKHRAMONOVA GULISTON PARDAEVNA

01.04.04 – Physical electronics

**SECONDARY EMISSION PROCESSES DURING BOMBARDMENT OF
ELEMENTS GaAs, Ta, Tb, Tm WITH CLUSTER AND MULTIPLY
CHARGED IONS**

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

Tashkent – 2025

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2025.1. PhD/FM1242.

Dissertation has been prepared at the Institute of Ion-plasma and laser technologies.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.iplt.uz) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (<http://www.ziyonet.uz>).

Scientific supervisor:

Usmanov Dilshadbek Tursunbayevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
professor

Official opponents:

Kutliev Uchkun Otoboevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Saidumarov Ilhomjon Miralimovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor.

Leading organization:

Tashkent State Technical University

The defense will take place on «16» december 2025 at 16⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.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).

The PhD dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 19) (Address: 100125, 33 Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on «02» december 2025.

(Mailing report № 19 on «02» december 2025).



Kh.B. Ashurov

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Technical Science, professor.

I.D. Yadgarov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, Doctor Physical and Mathematical Science, professor.

U.K. Maxmanov

Chairman of scientific seminar under scientific Council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Science, professor.

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work: It consists in studying nonlinear and nonadditive effects in the processes of secondary emission of solids under bombardment by low-energy multi-atomic cluster and multiply charged ions using the secondary ion mass spectrometry method.

The objectives of the research:

study of the nonlinear and nonadditive yield of gallium ions during the bombardment of a GaAs target by Bi_m^+ ($m = 1-5$) cluster ions with energies of 1–10 keV and evaluation of the ionization probability of secondary ions;

improvement of an ion source based on surface ionization and investigation of neutral gallium atoms formed during the bombardment of a GaAs target by cluster ions using the post-ionization method;

study of nonlinear and nonadditive processes in the yield of secondary ions during the bombardment of a GaAs target by Bi^{q+} ($q = 1-6$) multiply charged ions with energies of 1–10 keV;

investigation of nonlinear and nonadditive processes in ion–photon emission during the bombardment of a Ta target by Bi_m^+ ($m = 1-4$) cluster and multiply charged ions with energies of 2–12 keV;

investigation of secondary ion, ion–photon, and secondary electron emissions during the bombardment of Tb and Tm targets by Au_m^- ($m = 1-9$) and Bi_m^- ($m = 1-7$) negative cluster ions with energies of 1–21 keV.

The objects of research work. The objects of research were gallium arsenide (GaAs), Ta (tantalum), Tb (terbium), and Tm (thulium) elements.

The scientific novelty of the research is as follows:

for the first time, by means of the post-ionization method based on surface ionization, neutral gallium atoms formed during the bombardment of a GaAs target by Bi_m^+ ($m = 1-5$) cluster ions in the energy range of 1–10 keV were converted into positive ions on the surface of an iridium emitter. For neutral gallium atoms, a tendency of decreasing nonadditivity coefficients with increasing energy per atom in the bombarding cluster ion was established.

during the bombardment of a GaAs target by Bi^{q+} multiply charged ions in the energy range of 2–10 keV, it was found that the multiple increase in the yield of matrix ions (Ga^+ , Ga^{2+} , As^+) as well as of adsorbed particle and impurity ions (C^+ , H_2O^+ , Na^+ , Al^+ , K^+ , Ni^+ , Cu^+ , Cs^+ , Bi^{n+}) is associated with an increase in the charge of the primary bombarding ions. This dependence is more pronounced for ions with higher ionization potentials. The phenomenon is explained by charge exchange between sputtered atoms resulting from direct collisions.

when the surface of a Ta target was bombarded by Bi_m^{q+} ($m = 1-4$), ($q = 1-6$) cluster and multiply charged ions, a nonadditive increase in the yield of ion–photon emission (IPE) was observed with an increasing number of atoms in the primary bismuth cluster ions. This effect is attributed to local energy densification on the surface, an increase in the fraction of excited atoms, and the high potential energy of ions leading to enhanced electron exchange with the surface.

it was established that with increasing number of atoms and energy in the primary cluster and multiply charged ions, a nonadditive growth of the integral IPE yield of tantalum occurs. This is associated with additional ejection and excitation of atoms from the region of dense collision cascades, resulting in the formation of thermal peaks on the surface. It was also found that the IPE yield weakly depends on the charge of multiply charged ions when $q < 4$, and increases only as the charge rises from 3 to 6.

it was determined that with an increasing number of atoms in the primary Bi and Au ions bombarding the Tm and Tb targets, a nonadditive increase in the IPE yield takes place, caused by the simultaneous enhancement of local energy densification, electron excitation, and local heating processes on the surface.

as a result of the IPE studies, it was found that during the bombardment of a Tm target surface by Bi cluster ions, a nonadditive growth of integral IPE coefficients occurs with an increasing number of atoms in the bombarding ions, which is associated with additional excitation of atoms scattered from the regions of thermal peaks on the surface.

Implementation of the research results. Based on the comprehensive study of nonlinear and nonadditive effects occurring in the processes of secondary emission during the bombardment of the semiconductor GaAs and the elements Ta, Tm, and Tb by cluster and multiply charged ions:

– the obtained scientific results during the bombardment of a semiconductor GaAs target by low-energy (1–10 keV) cluster and multiply charged bismuth ions were used in the implementation of the scientific project No. IL-4821091667 “*Dielectric–metallic transitions and mechanisms of electrical conductivity in oxide semiconductor amorphous materials*” (Certificate No. 01/11-20230 dated September 25, 2025, National University of Uzbekistan). The application of the obtained scientific results made it possible to gain a deeper understanding of the mechanisms of dielectric–metallic transitions in oxide amorphous semiconductors, as well as to explain the fundamental physicochemical regularities associated with changes in the electronic and structural properties of materials and with emission processes arising under ion bombardment;

– the scientific results obtained during the study of ion–photon emission under bombardment of the tantalum target surface by cluster and multiply charged Bi_m^{q+} ($m = 1–4$), ($q = 1–6$) ions were used in the implementation of the scientific-practical project No. MRB-2021-521 “*Development of new durable nanostructured materials based on aluminum and tantalum oxides*” (Certificate No. 01/9-14-2630 dated September 27, 2025, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov). The application of these scientific results in the project made it possible to study the distribution of tantalum oxide in aluminum alloy during the alloying process, as well as to gain a deeper understanding of the scientific foundations of the technology for transforming the double-layer thin-film Ta/Al system, formed as a result of electrochemical anodizing in acid electrolytes, into a composite matrix system of anodic aluminum and tantalum oxides.

Approbation of research results. The results of the dissertation work were presented and discussed at 8 international and national scientific conferences.

Publication of the research results. The scientific results obtained on the topic of the dissertation are presented in 13 scientific publications, including 5 scientific articles, of which 3 were published abroad and 2 in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of main scientific results of doctoral dissertations.

Structure and volume of dissertation. The structure of the dissertation includes an introduction, four chapters, conclusions, a list of published works, a list of references, and appendices. The total volume of the dissertation is 123 pages and includes 40 figures and 2 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I, Part I)

1M. Guliston Kakhamonova, Shovkatjon Dj. Akhunov, Makhmanazar M. Nazarov, Ramazon R. Mavlonov, Dilshadbek T. Usmanov . « Secondary Ion Emissions of Tm and Tb Targets Under Bombardment With Cluster Ions». “Surface and interface Analysis”// January 2025. Volume 57, Issue 1 p. 36-41. <https://doi.org/10.1002/sia.7361>. (Импакт фактор: 1.8)

2M. Sh.Dj.Akhunov, G.P.Kakhramonova, D.T.Usmanov. «Ion-photon emission under bombardment of Ta target with cluster and multiply charged Bi ions ». Vacuum, Volume 213, July 2023, 112160 <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112160> (Импакт фактор: 4.0)

3M. Akhunov, S. D., Kakhramonova, G. P., Axmedov, S. M., Kasimov, B. S., & Usmanov, D. T. «Sputtering of GaAs target under Bim+ cluster ions bombardment» //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2022. – Т. 528. – С. 15-19. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.08.004>. (Импакт фактор: 1.3)

4M. G.Kaxramonova. «Tm nishonini vismut klaster ionlari bilan bombardimon qilinganda ion-foton emissiyasini tadqiq qilish». NamDU Ilmiy Axborotnomasi 2025-2-son . 93-96 betlar.

5M. Абдуллаева Б.К., Аматов Ш.Я., Шерметова А.С., Ахунов Ш.Дж., Кахрамонова П.Г., Усманов Д.Т. «Исследования вторичных частиц при бомбардировке монокристалла GaAs многозарядными ионами Bi⁺». XORAZM МА’МУН АКАДЕМІЯСИ АХВОРОТНОМАСИ –2/1-2023. ст.166-173. (УДК 538.971).

II бўлим (Часть II, Part II)

6M. П.Г. Кахрамонова, Р.Р. Мавланов, М.М. Назаров, Ш.Д. Ахунов, Д.Т. Усманов. «Исследование процесса образования больших углеродных кластеров при бомбардировке графита кластерными и молекулярными ионами Sb_m⁺, Au_m⁻, CuP_c⁺». ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ 53-й международной Тулиновской конференции ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ. Москва-2024 20-30 мая. с.132

7M. Kakhramonova P.G., Mavlonov R.R., Nazarov M.M., Sh.J. Akhunov*, D.T. Usmanov**. «STUDY OF SPUTTERING OF NIOBIUM-ZIRCONIUM POLYCRYSTAL UNDER BOMBARDING WITH LOW ENERGY ATOMIC IONS». First International Conference on Low-Dimensional Advanced Materials. ICLODAM-24. Toshkent-Samarqand-2024. 18-22 Fevruary. p.49.

8M. Ш.Дж. Ахунов, П.Г.Кахрамонова, Р.Р.Мавланов, М.М.Назаров, Д.Т. Усманов. «Разработка и изготовление источника кластерных ионов Ni_mCL_n»// “III Международная научная конференция «Современные тенденции развития

физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы». Ташкент, 2024 г., 26-27 сентябрь. с.247-249.

9М. Ш.Дж. Ахунов, П.Г. Каҳрамонова, Д.Т. Усманов. «Измерение ионно-фотонной эмиссии при бомбардировке Та мишени кластерными и многозарядными ионами». *ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ 52-й международной Тулиновской конференции ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ*. Москва-2023. 30 мая – 1 июня. с.32

10М. Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов, С.С. Исҳакова, Ш.М. Аҳмедов, А.Ш. Раджабов, П.Г. Каҳрамонова, Т.Х. Эрова. «Распыление кремния при бомбардировке атомарными и молекулярными ионами». *ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ 52-й международной Тулиновской конференции ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ*. Москва-2023. 30 мая – 1 июня. с.53

11М. П.Г. Каҳрамонова, Д.Т. Усманов, Ш.М. Аҳмедов, А.Ш. Раджабов, Ш.Дж. Ахунов, С.С. Исҳакова, Т.Х. Эрова. «Распыление молекул фталоцианина меди на GaAs подложке при бомбардировке многозарядными ионами». *ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ 52-й международной Тулиновской конференции ПО ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КРИСТАЛЛАМИ*. Москва-2023 30 мая – 1 июня. с.54

12М. Ш.Дж. Ахунов, Ш.М. Аҳмедов, Б.Ш. Касимов, П.Г. Каҳрамонова, Д.Т.Усманов. «Исследование распыления тулиевой мишени при бомбардировке атомарными ионами цезия». “Оптика ва лазер физикасининг муаммо ва истиқболлари”, Тошкент, 2023 йил 26 октябрь.с.172-173.

13М. Ш.Дж.Ахунов, Д.Т.Усманов, Г.С.Каҳрамонова, З.А.Исаҳанов, Б.Е.Умирзаков. «Исследование распыления полимерной пленки *p3ht* атомарными ионами цезия». “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. Тошкент, 2023 йил, 3-4 ноябрь. с.165