

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

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ХАЛМАНОВ АКТАМ ТОШҚУВАТОВИЧ

**МОДДАЛАРНИНГ ТУРЛИ ФАЗОВИЙ ҲОЛАТЛАРИДА
УЛЬТРАКИЧИК КОНЦЕНТРАЦИЯЛИ АТОМЛАРНИНГ ЎТА
СЕЗГИР ЛАЗЕР СПЕКТРОСКОПИЯСИ**

01.04.05 – Оптика

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

Тошкент – 2017

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Халманов Актам Тошқуватович

Моддаларнинг турли фазовий ҳолатларида ультракичик
концентрацияли атомларнинг ўта сезгир лазер спектроскопияси 3

Халманов Актам Тошқуватович

Высокочувствительная лазерная спектроскопия ультрамалых
концентраций атомов в различных фазовых состояниях вещества 27

Khalmanov Aktam Toshquvatovich

High-sensitivity laser spectroscopy of ultra small concentration of atoms
in various phase states of substance 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 57

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

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ХАЛМАНОВ АКТАМ ТОШҚУВАТОВИЧ

**МОДДАЛАРНИНГ ТУРЛИ ФАЗОВИЙ ҲОЛАТЛАРИДА
УЛЬТРАКИЧИК КОНЦЕНТРАЦИЯЛИ АТОМЛАРНИНГ ЎТА
СЕЗГИР ЛАЗЕР СПЕКТРОСКОПИЯСИ**

01.04.05 – Оптика

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

Тошкент – 2017

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.DSc/FM50 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Самарқанд давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.fti-kengash.uz) ва «ZiyoNet» ахборот таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	Эшқобилов Напас Бекназарович физика-математика фанлари доктори
Расмий оппонентлар:	Нематов Шерзод Қаландарович физика-математика фанлари доктори Низамов Негмат Низамович физика-математика фанлари доктори, профессор Азаматов Зокиржан Тахирович физика-математика фанлари доктори
Етакчи ташкилот:	Ўзбекистон миллий университети

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

Докторлик диссертацияси Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел.: (99871) 235-30-41.

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

С.Л. Лутпуллаев

Фан доктори илмий даражасини берувчи
Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
Илмий кенгаш котиби, ф.-м.ф.д., профессор

С.А. Бахромов

Фан доктори илмий даражасини берувчи Илмий кенгаш
ҳузуридаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Кириш (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда замонавий фан ва техника соҳалари учун элементларнинг ўта кичик миқдорларини аниқлашнинг янги аналитик методларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада аналитик масалаларни ечиш учун замонавий ютуқлар асосида моддаларда текширилаётган элементларнинг миқдорини 10^{-8} – $10^{-11}\%$ даражада назорат қилиш муҳим вазифалардан бири бўлиб келмоқда.

Мустақиллик йилларида республикаимиз илм-фан соҳасида устивор ривожланишига, жумладан, ўта сезгир лазер спектроскопия соҳасини самарали ривожлантириш борасида атомларни ва аэрозолларни ёки шунга ўхшаш мураккаб молекулаларни қайд қилишга қаратилган тадқиқотларга алоҳида эътибор қаратилди. Бу соҳада атомларнинг ионланиш чегараси атрофини тадқиқ қилиш, уларни самарали уйғотиш схемаларини аниқлаш ҳамда турли аэрозолларнинг морфологик ва оптик хусусиятлари тадқиқоти бўйича самарали натижалар олинди. “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра илмий-тадқиқот ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратиш, шу жиҳатдан фотониканинг лазер спектроскопияси соҳасида моддаларнинг ультракичик концентрацияли атомлари ва аэрозоллари билан лазер нури таъсирида намоён бўладиган резонансли ва норезонанс физик жараёнлар механизмлари асосида янги қурилмалар яратиш муҳим аҳамиятга эга.

Ҳозирги вақтда жаҳон илм фанида кўп электронли атомларнинг юқори уйғонган ҳолатларини ва турли аэрозолларнинг оптик хусусиятларини тадқиқ қилишга, универсал лазер фотоионлаштириш спектрометрлари ишлаб чиқишга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни, жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади: тегишли элемент атомлари учун маълум ҳолатлардан уйғотишнинг янги фотоионлаштириш ва тўқнашув схемаларини ишлаб чиқиш, оғир элемент атомлари учун назарий ҳисоблашларни олиб бориш ва тажрибавий спектрлар олиш, уйғонган атом ва молекулаларда юз берадиган физикавий жараёнлар турларини аниқлаш, сигналлар кинетикасининг ускуна техник характеристикасига, атом ва молекулалар параметрига боғлиқлигини ўрганиш, аниқ ифодаланган квант ҳолатларига эга бўлмаган аэрозоль заррачаларининг морфологик ва оптик хусусиятларининг янги қонуниятларини очиш, атомлар ва аэрозолларнинг ультракичик концентрацияларни аниқлашга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4997-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони ва 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ–1442-сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарори ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот

ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорилари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Тадқиқот иши республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Физика, астрономия, энергетика, ва машинасозлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий-тадқиқотлар шарҳи¹.

Резонатор ичида аэрозоль зарралари билан частотаси силлиқ ўзгара оладиган лазер нурлари таъсири ва лазер резонансли спектроскопия усули билан уйғотиш ва ионланиш жараёнларининг табиатини тадқиқ қилишга йўналтирилган илмий изланишлар жаҳоннинг йирик илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан, Стандартлар миллий бюроси, Флорида университети (АҚШ), М.В.Ломоносов номидаги Москва давлат университети, В.И.Вернадский номидаги Геохимия ва аналитик кимё институти, Россия Фанлар академиясига қарашли Спектроскопия институти (Россия), Исроил технология институти (Исроил), Чалмерс технологиялар университети (Швеция)да кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Жаҳон миқёсида атомларнинг кўп фотонли, фотоионизацион ва тўқнашув механизмлари ва аэрозолларнинг оптик хусусиятлари йўналиши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан, қуйидаги муҳим илмий натижалар олинган: турли элементларнинг ўта кам миқдорлари ва атомлар спектрал чизиқларининг изотопик силжишлари аниқланган ҳамда ўта нозик тузилишга ажратилган; атом ва молекулаларнинг юқори уйғонган ҳолатлари назарий ва тажрибавий аниқланган (М.В.Ломоносов номидаги Москва давлат университети, В.И.Вернадский номидаги Геохимия ва аналитик кимё институти, Спектроскопия институти, Россия); уран изотопларининг лазерли фотодиссоцион бўлиниши аниқланган (Лос-Алмос лабораторияси, «Эксон Рисарч энд Инжиниринг» компанияси, АҚШ); резонатор ичида сўниш спектрометри асбобини ишлаб чиқиш технологиялари ривожлантирилган (Исроил технология институти, Исроил; «Advanced Photonics Research Institute», Жанубий Корея; «Tiger optics» компанияси, АҚШ).

Ҳозирги вақтда жаҳонда юқори потенциал ионизацияли (7эВ дан 10,4эВ гача) атомларнинг юқори уйғонган ҳолатларини тадқиқ қилиш устида бир

¹ Travis J.C., Turk G.C. Laser-Enhanced Ionization Spectrometry // New York.: John Wiley & Sons Inc. 1996. – 334 p; Winefordner J.D., Gornushkin I.B., Pappas D., Matveev O.I. and Smith B.W. Novel uses of lasers in atomic spectroscopy. Plenary Lecture // J. Anal. Atomic Spectrom. 2000. Vol. 15, pp. 1161–1189; Busch K.W. Busch M.A. / Cavity-Ringdown Spectroscopy. An Ultratrace-Absorption Measurement technique Eds. ACS Symp. Ser. – Washington, DC .1999. P. 269; Balykin Victor I. The scientific career of V S Letokhov // Phys. Scr. 2012. Vol. 85, pp. 1–51; Горбатенко А., Воронина Р., Ревина Е. Аналитическая лазерная ионизационная спектрометрия пламени. Выбор аналитической формы определения редкоземельных элементов // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия, 2008. Том 49, № 1, с. 66–68.

қатор, жумладан, қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: тоза металллар юзасидаги аэрозоль факеллари, металл тузлари ва органик бўёқлар аэрозолларининг оптик ва морфологик хоссаларини очиб бериш; оғир элементлар атомлари ридберг ҳолатларининг энергия қийматларини (E_n) назарий ўрганиш ва сувли эритмаларда элементларнинг миқдорини аниқлаш; резонатор ичида сўниш лазер абсорбцион усули ёрдамида тупроқ, қотишмалар ва тоза металллар юзасида ҳосил бўладиган аэрозоль факелларнинг лазер энергиясига боғлиқлигини ва турли шаффоф аэрозолларнинг экстинкция эффективлигини аниқлаш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Муаммо юзасидан қатор америкалик олимлар томонидан бир қанча изланишлар амалга оширилган: натрий ва ураннинг якка атомлари ультракичик миқдорларини қайд қилиш бўйича лазер резонансли спектроскопия усули билан тадқиқотлар 1977 йили S.A.Tuccio ва G.S.Hurst томонидан вакуумда олиб борилган; J.C.Travis, G.C.Turk атом ионизацион спектроскопия усулини алангада тадқиқ этган; O'Keefe, Deacon металл кластерлар, аланга диагностикаси ва газларнинг молекуласини тадқиқ қилиш учун резонатор ичида сўниш лазер спектроскопия усулини ишлаб чиққан. Жанубий корейлик Jongmin Lee, Do-Kyeong Ko сингари олимлар иттербий ва самарий атомларининг юқори уйғонган ридберг ва автоионизацион ҳолатларини ўрганган ва метан (CH_4) ва этан (C_2H_6) газларининг миқдорларини ўрганиш учун резонатор ичида сўниш лазер спектроскопия усулини ишлаб чиққан. Исроиллик олимлар V.Bulatov, I.Schechter аэрозоль заррачаларини қайд қилиш учун резонатор ичида сўниш лазер спектроскопия усулини қўллаган.

В.С.Летохов, Н.В.Чекалин, Н.Б.Зоров сингари россиялик олимлар томонидан бир вақтнинг ўзида (Na, Cs, Al, In, Pb, Au, Yb, U) якка атомларнинг ультракичик миқдорларини қайд қилиш бўйича S ва P ҳолати орқали икки ва уч босқичли уйғотиш усули билан тадқиқотлар вакуум ёки алангада олиб борилган.

Ўзбекистонлик олимлар, жумладан, С.А.Бахрамов, Т.Усманов, Н.Б.Эшқобилов атомли газда уйғонган атомларнинг фотоионизацион ва тўқнашув ионланиш механизмларидан фойдаланган.

Бироқ якка атомлар, аэрозоллар ва шунга ўхшаш мураккаб молекулаларнинг ультракичик миқдорларини қайд қилиш муаммоси ҳозиргача ечилмаган. Ионизация чегарасидан $0,9 \div 1,5 \text{ эВ}$ пастда жойлашган ($n \geq 4$) D ҳолат орқали ридберг ҳолат тўғрисидаги спектроскопик маълумотлар яхши ўрганилмаган. Ҳар хил атомизаторларда ионизация потенциали юқори бўлган атомларнинг тўқнашув ва фотоионизацион уйғотиш схемалари кам ўрганилган. Аниқ фойдаланган квант ҳолатларига эга бўлмаган аэрозоль заррачаларининг морфологик ва оптик хусусиятлари ўрганилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Самарқанд давлат университети илмий-тадқиқот ишлари режасининг К–22–96-рақамли «Алангада лазерли атом-ионизацион усули ёрдамида технологик эритмаларда платина гуруҳи металлларининг

миқдорларини аниқлаш услубларини ишлаб чиқиш» (1996–1998), 112/1-рақамли «The James Franck Program in Laser Matter Interaction and by the Fund for promotion of research, Technion-Israel Institute of Technology» (2002), «Brain Pool Program of the Ministry of Science and Technology in Korea» (2002–2003), ИТД–14–024- рақамли «Икки фаол ҳажмда ишлайдиган қувватли ультрабинафша импульсли азот лазерини яратиш» (2009–2011), ИТД–7–12-рақамли «Аэрозоль заррачаларида ёруғликнинг экстинкцияси, сочилиши ва ютилишини ўлчаш учун резонаторда сўниш лазер абсорбцион спектрометрини яратиш ва ишлаб чиқиш» (2012–2014), SfP 983931- рақамли «Марказий Осиёда токсик ифлослантирувчи моддаларнинг қўлланилишини стабил бошқариш: атроф муҳит хавфсизлиги учун региональ экосистеманинг модели» (2011–2014) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади моддаларнинг ультракичик концентрацияли атомлари ва аэрозоллари билан лазер нури таъсирида намоён бўладиган резонансли ва норезонанс физик жараёнлар механизмларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

аэрозоль заррачаларида ёруғлик экстинкциясини ўлчаш учун резонатор ичида сўниш лазер спектрометрини яратиш ва ишлаб чиқиш;

қотишмаларнинг ҳар хил намуналарида киритмаларнинг локал тарқалишини тадқиқ қилиш;

«графитли печь» ва «стержень-аланга» системаларида атомларни уйғотиш ва ионлаштиришнинг асосий жараёнларини ўрганиш. $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ ва $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (f)s$ ҳолатлар орқали самарали тўқнашув схемаларини аниқлаш (бу ерда n, k, m ва f – сатҳларнинг бош квант сонлари);

оғир элементлар атомлари ридберг ҳолатларининг энергия қийматларини (E_n) назарий ўрганиш ва сувли эритмаларда элементларнинг миқдорини аниқлаш чегарасини ҳисоблаш;

резонатор ичида сўниш лазер абсорбцион усули ёрдамида тупроқ, қотишмалар ва тоза металллар (Au, Ag, Zn, Al, Fe) юзасида ҳосил бўладиган аэрозоль факелларни ўрганиш ва уларнинг экстинкция коэффициентини аниқлаш;

резонатор ичида сўниш лазер абсорбцион усули ёрдамида ҳар хил шаффоф аэрозолларнинг (NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃) экстинкция эффективлигини ўрганиш;

резонатор ичида сўниш лазер спектроскопия усули ёрдамида органик бўёқ аэрозолларининг (родамин 640 бўёғи) морфологик ва оптик хусусиятларини ўрганиш.

Ми назарияси доирасида экстинкция эффективлигининг ўлчам параметрига боғлиқлигини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти элементларнинг сувли стандарт эритмалари, алюминий қотишмалари, (NH₄F, NaF) кристаллари, (GaAs, Si) ярим ўтказгич материаллари, махсус тоза эритувчилар, (NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃) металл тузларининг аэрозоллари, органик бўёқ моддалар (родамин бўёғи), қотишмалар ва тупроқ каби ҳар хил аэрозоллардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети интенсив импульсли лазер нурларининг моддалар атомлари, молекулалари ва аэрозоллари билан резонанс ва норезонансли ўзаро таъсири жараёнларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда резонатор ичида сўниш лазер спектроскопия, атом ионизацион спектроскопия ва резонанс ионизацион спектроскопия каби усуллар қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

юқори қувватли импульсли инфрақизил лазер нури ($\lambda=1064\text{нм}$, $E=250\text{мДж}$) таъсирида тупроқ, металл ва қотишмаларнинг юзаларида ҳосил бўладиган аэрозоль заррачаларининг мутлақ концентрацияси (N) ва ўлчами (d) орасидаги тескари боғланиш қонунияти ($N \sim d^{-2}$) ҳамда экстинкция коэффиценти (σ) ва қаттиқ сирт юзасидан лазер нуригача бўлган масофа (L) орасидаги тўғри боғланиши аниқланган;

шаффоф (NaCl , CsCl , NaI , NaF , KCl , AgNO_3) ва органик (Родамин 640) аэрозоль заррачаларининг экстинкция эффективлиги (Q) ва аэрозолнинг ўлчам параметри (α) орасидаги тескари боғланиш асосланган;

атомларни уйғотишда s ҳолатига нисбатан p ва d ҳолати орқали уйғотиш самарали эканлиги аниқланган;

атом ва аэрозоль системаларининг интенсив импульсли лазер нури майдонларидаги ютилиш ва сўниш параметрларини қайд қилиш имконини берувчи фойдали сигналлар (селектив ионланиш сигнали ва сўниш сигнали) пайдо бўлишининг механизмлари аниқланган;

“стержень-аланга” атомизаторининг ҳарорати бўйича селекцияси асосида атом ионизацион спектроскопия усулининг сезгирлиги ва селективлигини платформа ва графит найчадан ташкил топган янги электротермик атомизатор-ионизатор ёрдамида ошириш имконияти кўрсатилган;

аэрозоль заррачаларида ёруғлик экстинкциясини ўлчовчи икки фаол ҳажмли азот лазерига асосланган резонатор ичида сўниш лазер спектрометри ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

алюминий қотишмаларида кальций ва ишқорий металллар киритмаларининг локал тарқалишини ўрганиш учун универсал лазер фотоионлаштириш спектрометри таклиф қилинган ва тажрибада қўлланилган;

органик аэрозоллар, металл тузлари аэрозоллари ва металл юзасидаги аэрозоль факелларнинг физик-кимёвий хусусиятлари бўйича аэрозолларни қайд қилишнинг янги методлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ишда аэрозоллар ва атомларнинг ультракичик концентрацияларини тадқиқ этиш учун оптика ва лазер спектроскопиясининг замонавий услуб ва ёндашувлари қўлланилган, олинган натижаларнинг тажриба ва назарияга оид ҳисоб-китоблари ўтказилгани, тўлқин узунлигини текис ва узлуксиз ўзгартириш, фонни аниқ ҳисобга олиш, электрик ва оптикавий фойдали сигнални қайд этиш, “киритиш-топиш” ва қўшимча қўшиш усуллари тасдиқлангани ҳамда булар

бошқа муаллифларнинг натижаларига тўлиқ мос келиши билан изоҳланади. Тадқиқотнинг барча рақамли маълумотлари замонавий компьютер технологияларидан фойдаланган ҳолда ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти моддаларнинг ультракичик концентрацияли атомлари ва аэрозоллари билан лазер нури таъсирида намоён бўладиган резонансли ва норезонанс физик жараёнлар тўғрисидаги тушунчаларни кенгайтиришга имкон беради.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, ишлаб чиқилган қурилма ва усулларни махсус тоза эритмалар ва яримўтказгичли материалларни ишлаб чиқишда, геохимё ва геология соҳаларида киритмалар ва элементларнинг ҳамда аэрозолларнинг миқдорларини лазер нури билан бошқариш ва назорат қилишда ишлатиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Моддаларнинг турли фазовий ҳолатларида ультракичик концентрацияли атомлар ва аэрозолларнинг ўта сезгир лазер спектроскопиясини тадқиқ қилиш асосида:

аэрозолнинг морфологик параметрларини аниқлаш бўйича олинган натижалар хорижий журналларда (Journal of Analytical Atomic Spectrometry 20, p. 53-59 (2005); Journal of Analytical Atomic Spectrometry 29, p. 2267-2274 (2014); Chinese Science Bulletin Vol.58 № 20, p. 2440-2446 (2013); Anal Bioanal Chem (2005) 383, p. 1090-1097) аэрозолнинг оптик экстинкцияси ва заррачалар сонини аниқлашда қўлланилган. Илмий натижанинг қўлланиши ёруғлик экстинкция коэффициентини ва аэрозоль заррачаларининг мутлақ концентрациясини аниқлаш имконини берган;

ички резонанс спектроскопияси ёрдамида микрозаррачалар билан ёруғликнинг сочилиши ва абсорбциясининг тадқиқи натижалари хорижий журналларда (Journal of Environmental Sciences 26 (2014) p.2412-2422; Atmospheric Chemistry and Physics 7, p. 1523-1536, 2007; Laser Photonics Re. 5, №4, p. 534-552 (2011)) аэрозолларнинг оптик хусусиятлари, кимёвий таркибини тадқиқ қилиш, аэрозолларнинг ютувчи ва сочилувчи заррачалари орқали ёруғлик экстинкциясини ўлчаш учун қўлланилган. Илмий натижанинг қўлланиши аэрозоль заррачаларининг экстинкция самарадорлигини имконини берган;

атомлар ва аэрозоллар билан лазер нури таъсирида намоён бўладиган резонансли ва норезонанс физик жараёнлар механизмлари, атомларни уйғотишнинг самарали тўқнашув схемалари, органик бўёқлар ва металл тузлари аэрозоллари ҳамда соф металлларнинг аэрозоль факелларида уларнинг оптик ва морфологик хусусиятларининг умумий қонуниятлари Ф–2–15 рақамли «Оғир элемент атомлари (Pt, Au, Hg, Tl, Pb)нинг ионланиш чегараси атрофидаги лазер ионизацион спектроскопияси» лойиҳада аэрозолларнинг квант ҳолатларини ва атомларнинг кўп босқичли тўқнашув ва фотоионизацион схемаларини аниқлашда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фан ва технологиялари агентлигининг 2016 йил 6 октябрдаги ФТК–03–13/656-сон маълумотномаси). Илмий натижанинг қўлланиши элементларнинг миқдорларини “графитли печь” ва “стержень-аланга”

режимда ишлайдиган бирлашган атом-ионизацион спектрометрида аниқлаш сезгирлигини 10 мартага ҳамда лазер абляция усули билан оптик резонаторда аэрозоль заррачалари сонини 2 мартага ортишини таъминлайдиган лазер спектрометрларини яратишга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари, жумладан, 13 та халқаро ва 3 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 38 та илмий иш чоп этилган, шулардан 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 17 та мақола, жумладан, 8 таси республика ва 9 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатини ўз ичига олган 206 саҳифадан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг **«Муаммонинг ҳолати. Ўта сезгир лазерли спектроскопик методлар»** деб номланган биринчи бобида моддаларнинг турли фазовий ҳолатларида ультракичик концентрацияли атомларни тадқиқ қилишнинг ўта сезгир лазерли усуллари бўйича адабиётлар шарҳи келтирилган. Бўёқ лазерини дамлашнинг ҳар хил манбалари ва атомизациянинг ҳар хил вариантлари юзасидан ҳозирги вақтгача йиғилган тадқиқот натижалари кўриб чиқилган. Ўта сезгир лазерли усулларнинг физикавий асослари келтирилган.

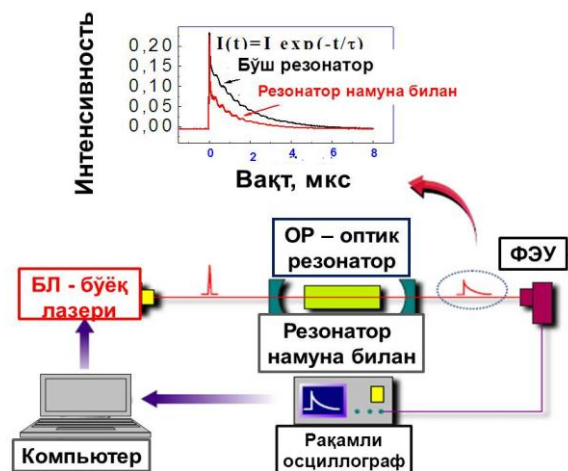
Адабиёт шарҳидан келиб чиқиб, диссертациянинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг **«Тажриба қурилмалари»** деб номланган иккинчи бобида ўта сезгир лазерли усуллар билан атомлар ионизациясининг ҳар хил каналлари ва алюминли қотишмаларда ишқорий металллар киритмаларининг локал тақсимланиш тадқиқотлари учун фойдаланилган, намуналар учун турли атомизаторлар билан ишлайдиган тажриба қурилмалари таърифланган. Спектрометр қуйидагича ишлайди: частотаси текис ўзгара оладиган бўёқ лазерини дамлаш учун икки фаол ҳажмда ишлайдиган импульсли азот лазеридан ($\lambda=337,1\text{нм}$, $\tau=8\text{нс}$, $E=10\text{мЖ}$) фойдаланилган. Бўёқ лазерининг

биринчи ва иккинчи босқичларда импульслар энергияси 10–100 мкЖни ва генерациянинг чизиқли кенглиги – 1см^{-1} ни ташкил қилади. Иккиламчи электрон кўпайтгич (ИЭК) ва атомизатор вакуум камерасига жойлаштирилган. Лазер нурлари билан атом дастасининг кесишиши вакуум камерасининг марказида жойлашган икки электрод орасида содир бўлиб, бу электродларга юқори вольтли ионизациялаштирувчи электр импульси берилади. Фотоион сигнал ИЭКдан ва олдкучайтиргичдан кейин стробинтиграторга ва ундан эса ўзи ёзар асбобга юборилади. Бир вақтнинг ўзида лазер нурлари алангага йўналтирилади ва селектив поғонали уйғотиш амалга оширилади. Сўнгра уйғотилган атомлар алангадаги заррачалар билан тўқнашиш натижасида ионлаштирилади. Пайдо бўлган ионлар коллекторда йиғилади ва кучайтиришдан кейин стробинтеграторга юборилади ҳамда рақамли вольтметрда қайд қилинади. Атомизатор сифатида тирқишли горелка қўлланилди. Нурнинг импульсли манбаи ёрамида уйғотилган ионизацион сигналнинг спектри импульсни строблаш усули билан ўлчанади. “Графитли печь” ва “стержень-аланга” режимида ишлайдиган бирлашган атом-ионизацион спектрометр қайд қилиш системасидан, “графитли печь” ва “стержень-аланга” атомизатор-ионизаторидан, ХеСl эксимер лазери ($\lambda=308$ нм, $\tau=10$ нс, $E=70$ мЖ) билан дамланадиган 3та бўёқ лазеридан иборат. Бўёқ лазери дифракцион панжарага нурнинг сирғаниб тушиши схемаси асосида йиғилган. Бу лазерлар ультрабинафша оралиғида 200 мкЖ қадар, кўриниш оралиғида 2мЖ қадар импульс энергияси ва $0,2\text{см}^{-1}$ генерация чизиғининг кенглиги билан таъминланган. Зарядланган заррачаларни йиғиш учун коллектор, қувватли стабилизация системаси билан дастурлаштирилдиган блок ёрдамида қизийдиган графитли най (узунлиги 28мм, диаметри эса 8мм), пирографитдан қилинган стержен (узунлиги 28мм, диаметри эса 8мм) ва 28мм узунликдаги икки тирқишли горелкалар атомизатор сифатида ишлатилган. Ўрганилаётган намуна массаси 1–20мг кукун ёки эритма кўринишида найчанинг марказида жойлашган махсус тирқиш орқали киритилади. Индий атомларининг манбаи сифатида ярим катодли (ЯКЛ–1) лампадан фойдаланиш атом-ионизацион спектрометрда амалга оширилган. Лампага 30мА ток берилганда газ разряд юзага келади. Нурланиш давомийлиги 8нс билан бўёқ лазер нури газ разрядга йўналтирилади. Оптогальваник (ОГ) сигнал 14мкс доимий вақт билан икки звеноли РС – фильтр орқали олинган бўлиб, олдкучайтиргичнинг киришига берилади ёки стробнинг давомийлиги 2мкс билан сигналлар стробоскопик вольтметрнинг киришига узатилади ва Фабри-Перо интерферометри ёрдамида ўзи ёзар асбобнинг биринчи канали орқали ёзиб олинади. Ушбу бобда, шунингдек, аэрозоль заррачаларида ёруғлик экстинкциясининг ўлчаш учун резонатор ичида сўниш лазер спектрометри таърифланган. Спектрометрда аэрозоль заррачаларини шакллантириш учун пневматик пуркагич ва қувватли лазер нуридан фойдаланилган. Тажриба қурилмаси бир ва икки Nd:YAG лазери билан бўёқ лазерини дамлаш ва намунани буғлатиш учун лазер импульсини шакллантиришда ишлатилган. Биринчи вариантда Nd:YAG лазер DG535 генератор шакллантирган иккиланган импульсдан ишга туширилади.

Иккинчи қурилма иккита лазернинг қўлланишига асосланган. Биринчи Nd:YAG лазер бўёқ лазерини дамлаш учун, иккинчи Nd:YAG лазер плазмани шакллантириш учун ишлатилди. Спектрометр DG535 генератордан, линзалар ($F=50\text{мм}$), иккита юкори қайтарувчи ботик кўзгу ($R> 99.97\%$, $r=100\text{см}$), зангламас пўлатдан қилинган най, фотокучайтиргич, узунлиги 75см бўлган резонатор ва рақамли осциллограф (LeCroy 9362), электростатик классификатор ва заррача конденсациясини санагичлардан ташкил топган. Шаффоф аэрозоль заррачаларида ёруғликнинг сочилиш ва ютилиш характеристикалари тадқиқоти учун тажрибавий қурилма узунлиги 85см ва диаметри $d=1\text{см}$ бўлган зангламас пўлатдан қилинган най ва пневматик пуркагичлардан ташкил топган. Силикагел (molecular sieves 4A) билан тўлдирилган узунлиги 80см ва диаметри $d=10\text{см}$ бўлган кварц найдан аэрозолни куриштиш учун фойдаланилган. Ботик кўзгу ($R> 99.97\%$, $r=100\text{см}$) $575\text{--}670\text{нм}$ тўлқин узунлигига оптималлаштирилган узунлиги 85см ва диаметри $d=1\text{см}$ бўлган зангламас пўлатдан қилинган найнинг тугаган қисмига жойлаштирилган. Турли аэрозоль заррачаларида ёруғликнинг экстинкциясини ўлчаш учун тажрибавий қурилма куйидаги таркибий қисмлардан ташкил топган: қайд қилиш системаси, ярим катодли газразряд лампа ва аэрозоль, тоза ҳаво учун блоклар системаси, лазерлар системаси. Резонатор ичидаги кўзгу узунлиги 65см зангламас пўлатдан қилинган найнинг тугаган қисмига жойлаштирилган. Сўниш сигнали фотокўпайтгич (Photosensor Module H6780 – 04) ёрдамида ўлчанган. Фотокўпайтгич сигнали рақамли кўринишга рақамли осциллограф ёрдамида (Tektronix TDS3032B) ўтказилади ва персонал компьютерга юборилади.

Атмосфера аэрозоль заррачаларида ёруғликнинг экстинкциясини ўлчаш учун тажрибавий қурилма (1-расм) куйидагича ишлайди: частотаси текис ўзгара оладиган бўёқ лазерини дамлаш учун азот молекуласида ишлайдиган икки фаол ҳажмли лазердан ($\lambda=337,1\text{нм}$, $\tau=8\text{нс}$, $E=10\text{мЖ}$) фойдаланилди. Сўниш сигналинини қайд қилиш учун ФЭУ–79 фотокўпайтгичи, ВС–22 стабиллаштирилган тўғирлагич, С1–70 осциллографи, TDS 2022B рақамли осциллограф, тоза ҳаво генератори ва персонал компьютерлар қўлланилган.



1-расм. Тажрибавий қурилманинг блок-схемаси

Осциллограф ёйилмасининг ишга туширилиши фотодиоддан келаётган сигнал билан амалга оширилади, яъни азот лазерининг бир қисми унга ажратилади. Резонатор ичидаги кўзгу узунлиги 65см мисдан қилинган найнинг тугаган қисмига жойлаштирилган. Фотокўпайтгичдан сигнал рақамли осциллографга (Tektronix TDS 2022B) ва персонал компьютерга юборилади.

Диссертациянинг «Эркин атомлар олишнинг усуллари ишлаб чиқиш ва атом ионизацион усулининг асосий жараёнларини ўрганиш» деб номланган учинчи бобида турли хил атомизаторларда элементлар f(Yb, Eu), d(Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Au, Pt, Hg, Cd, Zn), s(Na, Ca), p(Al, In) уйғонган ҳолатлари тадқиқига доир маълумотлар келтирилган. Алангада намунанинг атомизацияси ва вакуумда модданинг термик атомизацияси режими билан ишлайдиган универсал лазер фотоионизацион спектрометр алюминий қотишмаларида Na, Ca атомларининг локал тарқалишини аниқлаш учун қўлланилган. Ca атомлари учун ($\lambda_1=422,67\text{нм}$, $\lambda_2=399,2\text{нм}$ вакуум учун, $\lambda_2=518,9\text{нм}$ аланга учун) ва Na атомлари учун ($\lambda_1=589,9\text{нм}$, $\lambda_2=418,7\text{нм}$ вакуум учун, $\lambda_2=568,8\text{нм}$ аланга учун) икки поғонали уйғотиш схемалари амалга оширилган. Намуна тадқиқотлари учун стандарт услублар қўлланилган. 2-расмда ИЭК чиқишидан фотоион сигналларни ёзиш келтирилган. Олинган натижаларнинг тўғрилигини юқорида ёзиб ўтилган усул билан текшириш учун намунани аланга атомизацияси режимида сувли стандарт эритмаларда Ca ва Na концентрациясини аниқлаш бўйича тадқиқотлар синхрон равишда олиб борилган. Пропан-бутан алангасида натрийни ўрганишда ионизацион сигнал газ-окисидловчи 1:8,5 муносабатда максимал қийматга эришади. Кальций атоми учун ионизацион сигнал ацетилен-ҳаво сарфини ўзгартирганда ҳам кучли ўзгармайди. Тажриба вақтида фойдаланилаётган кимёвий реактивларда Ca ва Na миқдор даражаси ҳамда идишларнинг тозалиги назорат қилиб борилган.

Шундай қилиб, қуйидаги массалар нисбатида асос/аниқланаётган элемент 10мкг/мл : 0,1мкг/мл бўлганда, алюминий қотишмаси томонидан Ca ва Na сигналлари йўқолишининг кузатилиши “киритиш-топиш” усули билан ўрнатилган. Бу ерда алюминий эритмаси 100 мартадан ортиқ суюлтирилганда селектив сигналга таъсири бутунлай йўқолади.

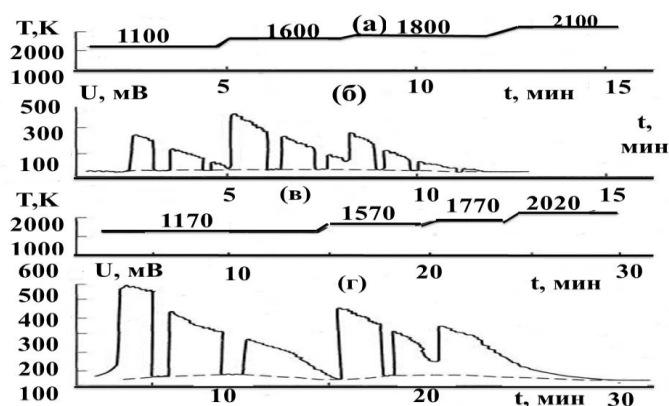
Турлича чуқурлик ва юзадан олинган 11та намунадан 60га яқин таҳлил олиб борилган. Тадқиқот натижалари натрий примеси намунанинг ҳажми бўйича тарқалиши тахминан бир хил $10^{-3}\%$ га яқин эканини кўрсатди. Лекин кальций примеси намунанинг ҳажми бўйича нотекис тарқалиши маълум бўлди. Бунинг устига, концентрация намунасининг алоҳида жойларида $10^{-2}\%$ га ва ундан ортиқроққа етди.

Hg, Cd, Zn атомлари учун уч поғонали уйғотиш схемалари амалга оширилган. Hg, Cd, Zn атомларининг юқори уйғонган ридберг ҳолатларини ўрганиш электротермик атомизаторини қўллаш билан вакуумда олиб борилди. Олинган ионизацион спектрларнинг қайта ишланиши бўйича квант дефектлар (Δ), энергиянинг қиймати (E_n) ва кадмия атомида $n=50$, рух атомида $n=55$ ва симоб атомида қатор $n=60$ гача бош серия ридберг ҳолатлари нозик тузилиши (ΔE) аниқланди.

$n \leq 50$ учун ридберг ҳолатлар энергияси қийматининг (E_n) сонли ҳисоблаши натижалари олиб борилган. Олинган тадқиқот натижалари чоп этилган адабиётлар натижалари билан солиштирилган. Таҳлил натижалари ҳисоблашнинг нисбий хатоси $\leq 4\%$ ни ташкил қилишини кўрсатяпти.

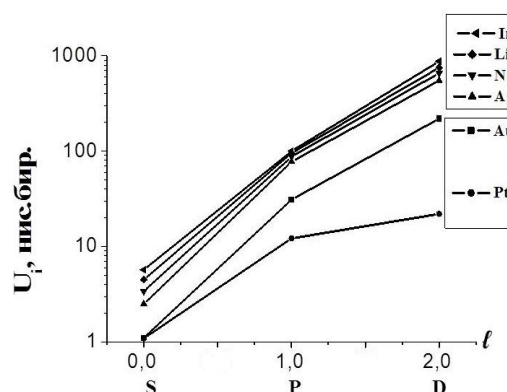
Атом-ионизацион усулда қайд қилиш чегарасини камайтириш ва

атомизация, буғланиш жараёнларини бундан кейин яхшилаш учун «графитли печь» электротермик атомизатор қўлланилди. Электротермик атомизатор-ионизаторнинг характеристикаларини ўрганиш учун тадқиқ қилинаётган элементларнинг сувли эритмаларидан фойдаланилди. «Графитли печь» атомизаторда ўрганилаётган атомларни уйғотишнинг уч поғонали ва икки поғонали схемалари амалга оширилган. Илк бор совитиладиган коллектор, платформа, ва графитли найчадан ташкил топган «графитли печь» атомизаторда Yb, Pt, Ag, Au, Li, In атомларини уйғотишнинг икки поғонали тўқнашув схемалари амалга оширилган ва элементларнинг сувли модели эритмаларида мос ҳолда «стержень-аланга» ва «аланга» атомизаторлари билан тенглаштирилганда 10 ва 100 марта яхши сезгирлик олинган.



а) а; в) атомизатор температурасининг босқичма-босқич ошириш кетма-кетлиги; б) $M=1$ мг намунада Са ион сигналининг вақтга боғлиқлиги; г) $M=2$ мг намунада Na ион сигналининг вақтга боғлиқлиги

2-расм. Са ва Na ион сигналининг буғланиш температурасига ва вақтга боғлиқлиги



3-расм. Ионизацион сигналлар (U_i) интенсивлиги ва орбитал момент (l) орасидаги боғланиш

(n)s $\rightarrow$ (m)p $\rightarrow$ (k)d ўтишда Li, Na, Ag, Au, Pt атомлар учун, $5p^2P_{3/2}\rightarrow 6s^2S_{3/2}\rightarrow 8p^2P_{1/2}$ ўтишда In атоми учун максимал сигналлар кузатилиши мос равишда кўрсатиб ўтилган (3-расм). Бунга сабаб орбитал момент l нинг 0 дан 2 га қадар ўзгариши билан боғлиқ бўлиб, ушбу квант ўтиши чизиғининг кенглиги бошқа квант ўтишига нисбатан 10 марта катта ҳисобланади. Тадқиқот натижасида ионизациянинг тўқнашув ва фотоионизацион механизмлари ишлаб чиқилган. Сувли эритмаларда In, Pt, Ag, Li, Yb ва Au атомларининг тадқиқот натижалари 1-жадвалда келтирилган. Олинган натижалар шуни кўрсатадики, ионизациянинг тўқнашув механизми доминант (асосий) жараён ҳисобланади. Кўп элементлар учун сезгирлик графитли печьда аланга атомизаторига нисбатан 100 – 1000 марта юқори ҳисобланади. Бунга сабаб текширилаётган ҳажмда атомларнинг ортиқроқ узок муддатли бўлиш вақти ва атомизацияда юқори температурага эришиш имкониятидир. Бу бобда турли ҳолатдан Eu, Yb, Au, Pt, Co, Ni, Fe, Mn, Cr, In, Al, Ca, Na, Cs атомларини ионлаштиришнинг турли каналларининг тадқиқот натижалари кўрсатилган.

Ионланишнинг фотоионланиш механизми. Усулнинг ғояси атомларни поғонали уйғотиш ёрдамида юқорида жойлашган электрон ҳолатларга ўтиши

**Li, In, Au, Ag, Pt, Yb элементларининг сувли эритмаларда «графитли
печь» системасида олинган тадқиқот натижалари**

Элемент	$\lambda_{\text{уйғот.}} \text{ (нм)}$			$t_{\text{атомизатор}}^{\text{ишч}}$ (°C)	$\Delta E = E_i - E_j$		$C_{\text{мин.}}$ пг/мл	
	λ_1	λ_2	λ_3		$\Delta E, \text{см}^{-1}$	$\Delta E, \text{эВ}$	ЭР	ТР
Li	670	610		2300	12204	1,49	0,006	0,002
In	451	571		2400	4802	0,59	0,008	0,03
Au	267	294		2400	3046	0,42	5	0,05
	267	306.5		2400	4439	0,66	5	0,05
	267	406.7	643.1	2400		АС	10	0,05
Ag	328	282		2300		АС	0.20	0,03
Pt	266	292		2400	587	0,06	50	0,04
Yb	555	581	581	2700		АС	10	0,03

ва бу ҳолатдан улар тўқнашиш натижасида ионлашиш ёки қўшимча нур ёрдамида ионлашишидан иборат бўлади. Бу икки ҳол учун ўлчанган сигналлар таққосланиб, тўқнашув ионланишни характерловчи параметрларни аниқлаш имконини беради. Ионланиш чиқиши фотоионлаш ҳисобига сигналнинг ошиш коэффиценти K ва тўқнашув ионланиш эффективлиги β қуйидаги оддий муносабатлар билан боғланган:

$$Y = K^{-1}; \quad \beta = \left(1 - \frac{g_b}{\sum g_i} + \frac{g_b}{\sum g_i} K \right)^{-1} \quad (1)$$

Бу ерда g_b – юқориги уйғонган ҳолатнинг статистик оғирлиги, $\sum g_k$ – уйғонган ҳолатларда қатнашаётган барча статистик оғирликлар йиғиндиси.

Тажрибада ионланиш чиқиши (Y) ва тўқнашув ионланиш эффективлиги (β) Au, Ag, Fe, In атомлари учун мос равишда (0,11; 0,1; 0,08; 0,06 ва 0,59; 0,15; 0,25; 0,087) олинган. Олинган қийматлар шуни кўрсатадики, тўқнашув ионланиш барча ҳолатлар учун самарасиз ҳисобланади. Бу ($\Delta E = 1,5 \text{ эВ} \div 3,87 \text{ эВ}$) уйғотиш энергияси ва ионланиш потенциаллари ўртасидаги қийматлар фарқи, яъни ($kT = 0,217 \text{ эВ}$ ацетилен-хаво алангаси учун) kT дан деярли $8 \div 38$ марта катталигига асосланган. «Стержень-аланга» ва «аланга» атомизаторларида Au, Ag, In, Fe аниқланаётган элементларнинг атомизация коэффиценти ($K_{\text{ат}}$) аниқлашнинг фотоионлаш усули ишлаб чиқилган. Аланганинг чегараланган ҳажмида танланган атомларни поғонали фотоионлаш оптик ўтишларнинг тўйиниш режимида олиб борилади. Натижада барча атомлар асосий ҳолатдан ионларга ўтказилади, бунда қайд қилинаётган ионлашган сигналнинг ($U_i^{\text{макс.}}$) қиймати атомизация коэффиценти ($K_{\text{ат}}$) билан содда муносабат орқали боғланган:

$$K_{\text{ат}} = \frac{C_0 U_i^{\text{макс.}}}{e K_y V n_0} \quad (2)$$

Бу ерда C_0 – тажриба йўли билан аниқланадиган коллектор-горелка сифими, e – электрон заряди, K_y – қайд қилиш системасининг кучайтириш коэффиценти, V – нурланадиган ҳажм, n_0 – алангада элементнинг умумий

концентрацияси. Оптимал шароитларда биз атомизация коэффициентини ($K_{ат}$) Au, Ag, In, Fe атомлари учун мос ҳолда (0,3; 0,2; 0,5; 0,2) тажрибада олдик.

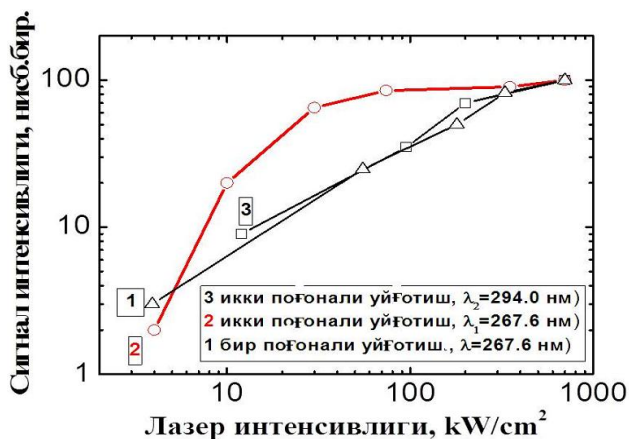
Ag атомлари учун $5p^2P_{3/2}$ ҳолатдан ўзига хос тўлқин узунликларда 272,0 нм ва 282,0 нм иккита кучли автоионланиш ҳолатлари кузатилди. Универсал лазер фотоионизацион спектрометрда Eu атомлари учун уйғотишнинг уч поғонали фотоионланиш схемалари ($\lambda_1=601,815\text{нм}$, $\lambda_2=540,533\text{нм}$, $\lambda_3=618,203\text{нм}$) амалга оширилган. Нисбий стандарт четланиш $S_r=0.1$ билан аниқланиш чегараси сувли стандарт эритмаларда $10^{-8}\%$ ни ташкил қилди.

Индий атомлари уйғотишнинг фотоионланиш схемаларини ярим катодли лампада амалга ошириш мумкин. Бўёқ лазерининг генерация частотасини атом ўтиши $5p^2P_{1/3, 3/2} \rightarrow nd^2S_{1/2}, nd^2D_{1/2, 3/2}$ спектрал чизиғига ($\lambda=451,1\text{нм}$ ва $\lambda=303,9\text{нм}$) тўғриланганда электрик схемада манфий ва мусбат ОГ сигналлар пайдо бўлди.

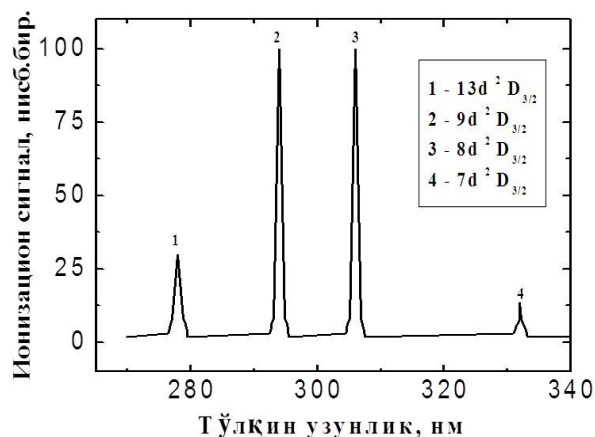
Инерт газнинг ионлари газ разряди вақтида катоднинг юзасини бомбардимон қилади ва катод материалининг бир қисмини газ ҳолатига ўтказди, шу жойнинг ўзида In атомлари $5p$ ҳолатдан $5d$ ҳолатга электрон ва ионлар билан ўзаро тўқнашиши натижасида уйғотилади. Сўнгра бу ҳолатда уйғонган атомлар лазер нурлари билан таъсирлашади. Лазер нурунинг тўлқин узунлигини 455,8 нм, 456,1 нм, 458,9 нм оралиқларда қайта тўғрилашни давом эттириб, ОГ сигналларнинг ошиши кузатилди. ОГ сигнал қийматини ўлчаш In атомининг автоионланиш ҳолатлари ўрнини аниқлаш имконини берди. Ярим катодли лампада индий атомини уйғотишнинг икки поғонали схемалари тадқиқоти натижасида автоионланиш ҳолатлар кузатилган. Автоионлашган сатҳлар энергияси In атомининг $5d^2D_{5/2}$ сатҳидан амалга оширилган лазер нури тўлқин узунлигининг ўлчанган қийматидан ҳисоблаб чиқилган. Бу автоионлашган ҳолатлар энергиялари 52651.2см^{-1} , 52638.2см^{-1} , 52503.2см^{-1} қийматларни ташкил қилади.

Ионланишнинг тўқнашув механизми. «Стержень-аланга» ва «аланга» атомизаторларида атомларни уйғотишнинг турли схемалари: бир поғонали асосий ва уйғонган ҳолатларидан, уйғотишнинг икки поғонали схемаси уйғонган ҳолатларидан, уйғотишнинг икки поғонали схемаси асосий ҳолатидан, уйғотишнинг уч поғонали схемаси асосий ҳолатидан ўрганилган. Барча ҳолларда атомлар учун «ёнувчи газ» – «ҳаво»нинг оптимал нисбати мос ҳолда Al, Eu (0,21 л/мин:1,3 л/мин), Cs (0,21 л/мин:6,6 л/мин), Na (0,22 л/мин:1,7 л/мин) танланган. Ca, In, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Pt, Au, Ag, Yb атомлари учун ёнувчи газ ацетилен ва ҳавонинг сарфлари мос равишда 0,27 л/мин ва 1,6 л/мин қийматга эришилган. Ҳар бир схема учун ионланиш сигналининг уйғотувчи лазер нури қувват зичлиги W , уни ўзгариши кенг диапазонда (лазер нурунинг 10-нс давомийлиги учун 700кВ/см^2) ўртасида боғлиқлик муносабати ўрнатилган. «Стержень-аланга» атомизаторида Pt учун $\lambda_1=266\text{нм}$ ва $\lambda_2=292,9\text{нм}$, Au учун $\lambda_1=267,6\text{нм}$ ва $\lambda_2=294,0\text{нм}$ ионланишнинг икки поғонали схемалари қўлланилган. Лазер нурларининг диаметри $\sim 2\text{ мм}$ га тенг. 4-расмда олтин атоми ионланиш сигналининг интенсивлиги (U_i) билан лазер нурунинг қувват зичлиги (W) ўртасидаги боғлиқлик муносабати

кўрсатилган. «Графитли печь» ва «стержень-аланга» билан ишлайдиган спектрометрни калибровка қилиш учун Au атомларининг тоза сувли эритмалари (10 пг/мл – 1 мг/мл) қўлланилган. Диапазон ораликда 250–340нм иккинчи лазерни қайта тўғрилаш натижасида бир неча резонанс чўккилар кузатилган (5-расм). Бу сигналлар Au атомларининг юқори уйғонган ридберг ҳолатларига мос келади. Бу ҳолатлар $n=8$ и $n=9$ асосий квант сонларга мос келади. Бунда Au атомларини бир поғонали уйғотишга нисбатан икки поғонали уйғотишлардан кузатилаётган сигнал амплитудаси қарийб 1000 мартага катталиги маълум бўлди. «Стержень-аланга» атомизаторида хром



4-расм. Ионизацион сигналлар (U_i) интенсивлиги ва лазер нурунинг қувват зичлиги (W) орасидаги боғланиш



5-расм. Иккинчи лазерни 250–340нм диапазон ораликда қайта тўғрилашда $n=7÷13$ квант сонларга мос келган олтин атомининг атом-ионланиш спектри

атомлари $3d^5 4s^7 S_3$ асосий ҳолатдан $3d^5 4p^7 P_{2,3,4}$, $3d^4 4s 4p^7 P_{2,3,4}$ септит ҳолатларда уйғотишнинг бир поғонали ва икки поғонали схемалари ўрганилган. Пастки аниқлаш чегараси сувли эритмаларда $s(\text{Li}, \text{Na}, \text{Cs})$, $p(\text{Al}, \text{In})$, $d(\text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Ag}, \text{Pt}, \text{Au})$ ва $f(\text{Yb}, \text{Eu})$ элементлар учун «аланга» системасида $10^{-10} ÷ 10^{-12}$ г/мл ни, «стержень-аланга»да $5 \times 10^{-10} ÷ 1 \times 10^{-14}$ г/мл ташкил қилади.

$s(\text{Li}, \text{Na}, \text{Cs})$, $p(\text{Al}, \text{In})$, $d(\text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Ag}, \text{Pt}, \text{Au})$ ва $f(\text{Yb})$ элементлар учун аниқлаш чегарасининг сувли эритмаларда назарий ҳисоблашнинг натижалари «стержень-аланга» системаси учун $1 \times 10^{-14} ÷ 2 \times 10^{-15}$ г/мл қийматларни ташкил қилади. Тажрибада эришилган аниқлаш чегараси назарий ҳисоблашга нисбатан қарийб бир тартибга юқори, айрим элементлар учун эса бир неча тартибга юқори бўлди.

Атом-ионизацион усулида иссиқлик, спектрал ва кимёвий таъсир этувчи омиллар мавжуд. Cs, Na, In ларни табиий сувда, Au, Na, Pt ларни кумуш нитрат ва тоғ жинсларида, Cr, Fe, Al, Na, Cs ларни GaAs ва Si материалларда, Cr, Mn, Ni, Co ларни фторидли материалларда (NH_4F ва NaF), Li, Na, Ag ларни ацетон ва фосфор кислоталарида микдорларини аниқлаш учун «стержень-аланга» системасида атомни лазерли поғонали уйғотишнинг атмосфера шароитида намунани алангада атомизациялаш йўли билан бирлаштириш намойиш этилган. 6-расмда сигналнинг кучайиш

коэффициенти ва ўрганилаётган моддалар орасидаги боғланиш кўрсатилган.

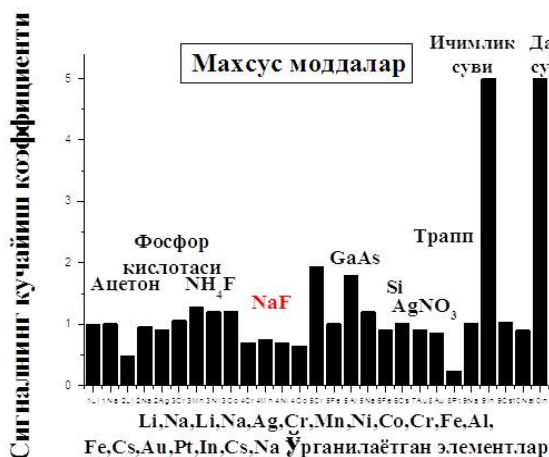
Муаммоларни ечиш учун сигналнинг кучайиш эффектини ҳар бир элементга боғлаб ўрганилган. Кумуш нитратда олтин атомини аниқлаш учун 1г/л концентрацияли AgNO_3 дан эритмалар тайёрланди. Бу ҳолда матрицанинг спектрал таъсири Ag атоmidан аддитивли фон сигнали кўринишида намоён бўлади. Бу муаммони ечиш учун Au атомининг икки поғонали уйғотиш схемалари қўлланилган. Матрицанинг кимёвий таъсири йўқолиши ўрнатилган. Тоғли жинсларда олтин атомининг изини аниқлаш учун «графитли печь» электротермик атомизатор қўлланилган. Олтин атомининг икки поғонали тўқнашув схемалари ($\lambda_1=267\text{нм}$, $\lambda_2=294\text{нм}$, $\lambda_2=306\text{нм}$) амалга оширилган. Олтин атомининг аналитик сигнаliga матрицанинг кимёвий таъсири кузатилган. Натрий бирикмаси ва алюминий оксидлари асосий таъсир этувчи элементлар ҳисобланади. Бу муаммо тоғ жинси эритмасини $C=0,3\text{г/л}$ дан $C=0,05\text{г/л}$ гача суюлтириш орқали ҳал этилади.

Эритувчиларнинг таҳлили учун аланга атомизатори энг қулай атомизатор ҳисобланиб, ацетонда Li миқдорларини аниқлаш мисолида намоёиш этилган. Натрийнинг миқдорлари «стержень-аланга» системасида аниқланган. Бу ерда аниқлаш чегараси графит стерженнинг тозалигига боғлиқ ҳисобланади. Ярим ўтказгичли материалларнинг таҳлили учун 1г/л концентрацияли арсенид галлий ва кремнийнинг эритмалари ишлатилган. Қўшимча қўшиш усули билан концентрацияси 10г/л бўлган GaAs асосининг таъсири Fe, Na, Al ва Cr атомларидан кузатилаётган аналитик сигналнинг қийматларига таъсири йўқлиги ўрнатилган. GaAs намуналарида Alнинг аниқлаш чегараси намуна асосидан кузатилаётган унча катта бўлмаган аддитив фон сигнал билан аниқланади. Стандарт қўшимча қўшиш усули билан кремнийда Cs ва Fe миқдорларини аниқлашда Cs ва Fe дан кузатилаётган аналитик сигналнинг қийматларига намуна асосининг таъсири йўқлиги ўрнатилган. $C=1\text{г/л}$ концентрацияли Si ва GaAs эритмасида Fe миқдорини дастлабки баҳолаш эритмалар тайёрлаш учун ишлатиладиган HNO_3 , HCl кислоталаридаги Fe примеси Si ва GaAs эритмаларда Fe нинг аниқлаш чегарасини $10^{-3}\%$ даражага чегаралаб қўйишни кўрсатди. Бу муаммони ечиш учун биз махсус тоза кислоталар ва реактивлар ишлатдик ҳамда идишларнинг тозалиги текшириб борилди. Шунинг учун Fe нинг аниқлаш чегараси алангада Si ва GaAs бирикмасидан кузатиладиган фон сигналнинг флукутацияси билан аниқланди.

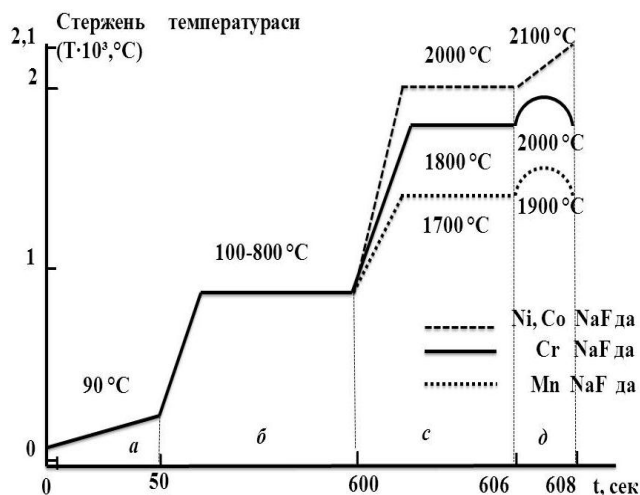
Илк бор фтор бирикмали моддаларда Ni, Mn, Co, Cr миқдорларини аниқлаш учун биз «аланга», «стержень-аланга» атомизаторларидан фойдаландик. Фтор бирикмали моддаларни таҳлил қилиш учун мос ҳолда 0,2г/л ва 50г/л концентрацияли NaF ва NH_4F эритмалари ишлатилди. Қўшимча қўшиш усули билан 50г/л концентрацияли NH_4F асоси Ni, Mn, Co, Cr атомларидан кузатилаётган аналитик сигналнинг қийматларига таъсири йўқлиги аниқланган. NH_4F нинг 5%ли эритмасида кобальт ва никелни аниқлашда матрицадан носелектив ионлаш сигнали кузатилди. Бу фон сигнаlinинг табиати ўрганилмади. Намунада Ni ва Co аниқлаш чегараси

NH_4F бирикмасида алангада кузатилаётган фон сигналининг флукутацияси билан аниқланади. Алангали атом-ионизацион метод учун NaF ни таҳлил қилиш анча мураккаб масала ҳисобланади. $3s$ асосий ҳолатида ва $3p$ ҳолатларида жойлашган Na атомлари лазер нури билан бир ва икки поғонали уйғотишнинг ионланиш эффективлиги етарли даражада юқори ҳисобланади. Бундай ионланиш ҳатто резонансдан узоқда жойлашган ютилиш чизиғининг қанотида ҳам самарадор ҳисобланади. $0,2\text{г/л}$ концентрацияли NaF эритмага аниқланаётган элементларни қўшиш йўли билан суялтирганда ҳам намуна асосидан фон сигнали кузатилди. АИМ ёрдамида ацетилен-ҳаво алангасида NaF намунадан Ni , Mn , Co , Cr миқдорларини аниқлашда матрица асосини бартараф қилмай туриб имкониятнинг йўқлиги аниқланди.

Олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги қиздириш режими, яъни (7-расм) 50с ичида $t=90^\circ\text{C}$ қуришти, $100\text{--}600\text{с}$ ичида $t=800^\circ\text{C}$ гача олдиндан қиздириш, $t=1800^\circ\text{C}$ хром атоми учун, $t=1700^\circ\text{C}$ марганец атоми учун, $t=2000^\circ\text{C}$ никел ва кобальт атомлари учун танланган.



6-расм. Сигналнинг кучайиш коэффициенти ва ўрганилаётган моддалар орасидаги боғланиш



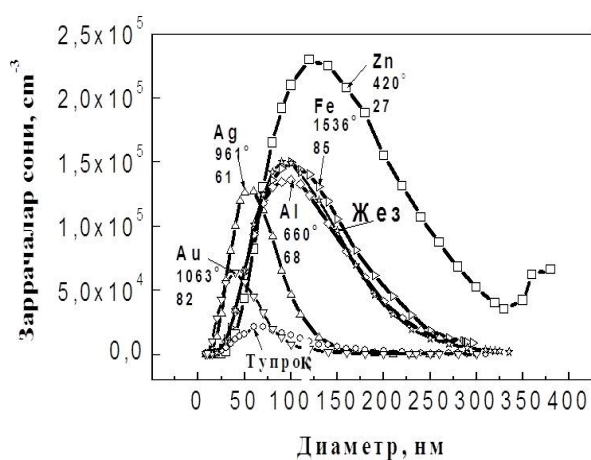
7-расм. NaF да Cr , Mg , Ni ва Co аниқлашда стерженни қиздириш режими: а) қуришти; б) натрийни олдиндан буғлатиш; в) ўрганилаётган элементнинг буғланиши; д) стерженни қиздириш

Барча цикллар учун намунанинг буғланиши 6с ичида содир бўлади. 2% концентрацияли эритмалар билан иш олиб бориб, қиздиришнинг бу режимида кобальт, никель, марганец ва хром атомларини йўқотмасдан натрийни дастлабки босқичларда самарали бартараф қилишга эришилди.

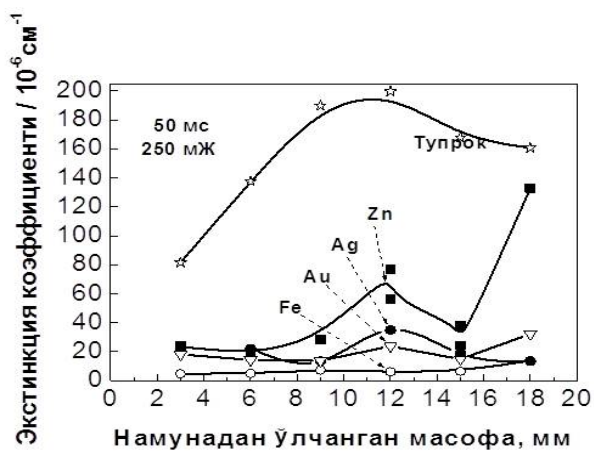
Диссертациянинг «Аэрозолли факеллар экстинкциясининг тадқиқоти бўйича тажрибавий натижалар» деб номланган тўртинчи бобида оптик резонаторда лазер импульсининг сўниш вақти, экстинкция коэффициенти ва заррачалар сонини ўлчашнинг тадқиқоти бўйича тажрибаларнинг натижалари келтирилган. Қаттиқ сирт юзасида ҳосил бўладиган аэрозоль факелларнинг тадқиқоти учун тупроқ, қотишмалар ва тоза металллар (Au , Ag , Zn , Al , Fe) танлаб олинган. Аэрозоль факелларнинг морфологияси масофа билан аэрозоль зичлиги ўртасидаги боғлиқлик функцияси сифатида

ўрганилган. Қувватли Nd–YAG лазери 1.0Гц частотада ўрганилаётган юзага фокусировка қилинган. Пайдо бўлган аэрозолларни заррача ҳисоблагичга секин ҳаво оқимида ($10\text{--}12\text{см}^3\text{с}^{-1}$) ташилган. Натижалар 8-расмда заррачанинг мутлоқ концентрацияси худди улар диаметрининг функцияси каби кўрсатилган. Сўниш вақти 9-расмда кўрсатилган намуналар учун ўлчанган бўлиб, унга мос экстинкция коэффицентлари (4) формула бўйича ҳисобланган ва тадқиқот натижалари 2-жадвалда келтирилган.

Аэрозоллар морфологиясига лазер қувватининг таъсири тадқиқ қилинган. Zn сиртидан ҳосил бўлаётган аэрозоллар 50мсга кечикиш вақти билан икки хил лазер қуввати ёрдамида олинган. Шуниси қизиқки, лазер импульси 750мЖ энергиясига мос келган экстинкция коэффиценти, энергияси 250мЖ лазер импульсидаги плазмдан кузатилаётган экстинкция коэффицентига нисбатан анча паст бўлди.



8-расм. $t=20^\circ\text{C}$ ҳароратда заррачанинг мутлақ концентрацияси (N) ва аэрозолнинг ўлчами (d) орасидаги боғланиш



9-расм. Экстинкция коэффиценти (σ) ва қаттиқ сирт юзасидан ўлчанган масофа (L) орасидаги боғланиш

9-расмда 5 намуна учун экстинкция коэффиценти худди қаттиқ сирт юзасидан ўлчанган масофанинг функцияси каби кўрсатилган. Барча ўрганилаётган намуналар учун лазер импульсининг қуввати 250мЖ, кечикиш вақти 50мс ҳамда намуна ва линза ўртасидаги масофа 12мм бўлганда энг юқори экстинкция коэффиценти кузатилади. Энг юқори экстинкция коэффиценти тупроқ аэрозоли учун ва энг паст экстинкция коэффиценти Al аэрозоли учун ўлчанган.

2-жадвал

Турли аэрозолларнинг тадқиқот натижалари

Метал-лар	Al	Fe	Au	Ag	Zn	Тупроқ
$\tau_0, \text{с}$	$1,41 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$
$\tau_1, \text{с}$	$9,7 \times 10^{-7}$	$11,7 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-7}$	$5,5 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$
$\sigma, \text{см}^{-1}$ $L=12\text{мм}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$6,12 \times 10^{-6}$	24×10^{-6}	35×10^{-6}	77×10^{-6}	200×10^{-6}

Диссертациянинг «Монодисперс заррачаларнинг оптик ва морфологик хоссаларини ўрганишнинг тажрибавий натижалари» деб номланган бешинчи бобида органик аэрозоллар, металл тузларининг аэрозоллари, атмосфера аэрозолларининг экстинкция коэффиценти ва экстинкция эффективлигини ўлчашнинг тадқиқоти бўйича тажрибаларнинг натижалари келтирилган.

Ёруғликнинг кириш (I_0) ва чиқиш (I) интенсивлиги қуйидаги формула билан ифодаланади:

$$I(t) = I_0 \exp(-[(1-R) + \sigma_e L](tc/L)) \quad (3)$$

Бу ерда τ_0 – бўш резонаторнинг кечикиш вақти, τ_1 – сочувчи намуна билан тўлдирилган резонаторнинг кечикиш вақти, R – кўзгунинг қайтариш коэффиценти, t_r – лазер импульсининг тўлиқ йўл вақти, L – сочувчи ва ютувчи муҳитнинг узунлиги, σ_e – муҳитнинг экстинкция коэффиценти, c – ёруғлик тезлиги. Ўлчанган сўниш вақти учун (бўш резонатор ва сочувчи намуна билан тўлдирилган резонатор) муҳитнинг экстинкция коэффиценти қуйидаги формула ёрдамида ифодаланади:

$$\sigma_e = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (4).$$

Ҳар бир ҳол учун сочилиш заррача диаметрининг (d) лазер нурунинг тўлқин узунлигига (λ) нисбати ёрдамида бошқарилади. Бу муносабат ўлчам параметри (α) дейилиб, қуйидаги формула ёрдамида берилган:

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda} \quad (5),$$

Резонатор ичидаги материаллар вақтнинг кечикишига таъсир қилади.

$$I = I_0 \exp(-t/t_c), \quad (6),$$

Бу ерда t_c – оптик резонаторда лазер импульсининг характеристик вақт давомийлиги. σ сферик заррачалар учун қуйидаги формула ёрдамида берилган:

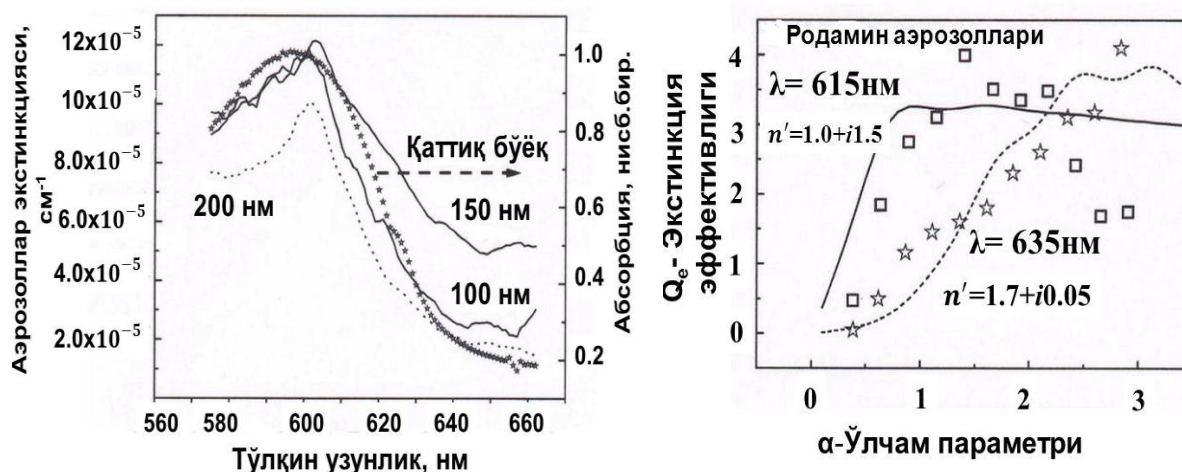
$$\sigma = NQ_{ext} \frac{\pi}{4} d^2 \quad (7).$$

Биринчи марта органик аэрозоль (родамин 640 бўёғи) ва металл тузларининг турли хил аэрозоллари (NaCl , CsCl , NaI , NaF , KCl , AgNO_3) экстинкция эффективлиги ва экстинкция коэффиценти ўрганилган. Намуналар ионсизланган сувда эритилган, органик бўёғи ишлатилган ҳолларда эса сувли/этанолли (1/1) эритмалари қўлланилган. Бўёқларнинг эритмалари учун ($1,0\text{--}5\text{г/л}$) ва тузларнинг эритмалари учун ($20\text{--}200\text{г/л}$) концентрациялар тайёрланган. Лазер импульсининг тўлиқ йўли (y томонга ва орқага) $2L/c=5,3\text{нс}$ тенг ҳисобланади. Лазер нурунинг тўлқин узунлигини $575\text{--}660\text{нм}$ тўлқин узунлиги диапозонида текис тўғриланган ва барча ўлчашлар тўлқин узунлигининг 635нм да олиб борилган. τ_0 – бўш резонаторнинг ва τ_1 – сочувчи намуна билан тўлдирилган резонаторнинг кечикиш вақтлари ўлчанган ва натижалар 3-жадвалда келтирилган.

Органик бўёқларнинг тадқиқот натижалари

Родамин 640	d, нм	τ_1 , с	τ_0 , с	c, см/с	N, см ⁻³	Q	α
$\lambda = 615\text{нм}$	$2,75 \times 10^{-5}$	$9,74 \times 10^{-7}$	$1,49 \times 10^{-6}$	3×10^{10}	2206	4,1112	1,40
$\lambda = 635\text{нм}$	$5,75 \times 10^{-5}$	$14,5 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-6}$	3×10^{10}	64,667	4,1012	2,84

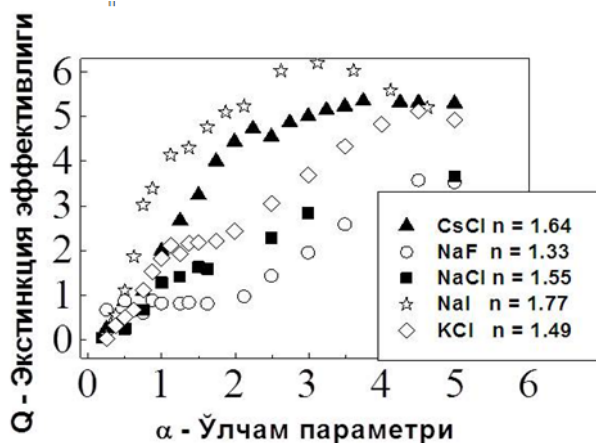
10-расмда заррачаларнинг диаметри 200нм, 150нм ва 100нм бўлганда лазер нурунинг тўлқин узунлиги билан органик бўёқларнинг экстинкция коэффициенти σ ўртасида боғлиқлик кўрсатилган. 11-расмда келтирилган натижалар самарадорлик омилининг қиймати ўлчам параметрига боғлиқ эканлигидан далолат беради. Родаминли аэрозоллар лазер нурунинг тўлқин узунлигида $\lambda=635\text{нм}$ ютилиши кузатишган.



10-расм. Экстинкция коэффициенти (σ) ва лазер нурунинг тўлқин узунлиги (λ) орасидаги боғланиш
11-расм. Экстинкция эффективлиги (Q_e) ва аэрозолнинг ўлчам параметри (α) орасидаги боғланиш

Бу ерда аэрозолнинг синдириш кўрсаткичи ёруғликни кучсиз ютувчи зарралар учун $n=1.7+i0.05$ (пунктирли чизик) ва ютувчи зарралар учун $n=1.0+i1.5$ (туташли чизик) комплекс сонлар билан ифодаланган. 4-жадвалда ҳар бир алоҳида аэрозоллар учун параметрларнинг чизиқли боғлиқлиги кўрсатилган. Q анча тикроқ ўсиши кузатилади ва ўзининг максимал қийматларига синдириш кўрсаткичининг анча катта қийматлари учун анча паст ўлчам параметрларида эришилади. Экстинкция эффективлигининг максимал қиймати ҳам синдириш кўрсаткичининг ошиши билан ортиб боради.

12-расмда KCl, NaF, NaI, CsCl, NaCl каби ёруғликни ютмайдиган аэрозоллар учун тадқиқот натижалари кўрсатилган. Кўриниб турибдики, экстинкция фактори синдириш кўрсаткичининг функцияси ҳисобланади. Q нинг максимал қиймати ўлчам параметрининг минимал қийматига мос келади. Натижалар 4-жадвалда келтирилган. Аэрозоль заррачасининг экстинкция эффективлиги синдириш кўрсаткичининг ошиши билан ортиб боради. Биринчи марта турли аэрозолларнинг резонаторда ёруғликнинг характеристик сўниш вақтига таъсири ўрганилган. Тадқиқот объектлари си-



12-расм. Экстинкция эффективлиги (Q) ва аэрозолнинг ўлчам параметри (α) орасидаги боғланиш

фатида газли разряд, сув буғлари, этил спирти, сигарет тутуни ва ацетонлар олинган. Тажриба олиб бориш учун оптик резонатор яратилган. Намуналарнинг оқими билан эффектив оптик таъсирлашиш $l=0,8$ см бўлган. Лазер импульсининг тўлиқ йўли (у томонга ва орқага) $2L/c=4,313$ нс га тенг ҳисобланади. Тажрибада бўш резонаторнинг кечикиш вақти (τ_0) ва сочувчи намуна билан тўлдирилган резонаторнинг кечикиш вақти (τ_1) ўлчанган.

4-жадвал

AgNO₃, KCl, NaF, NaI, CsCl, NaCl каби шаффоф аэрозоллар учун тадқиқот натижалари

	NaF	KCl	NaCl	CsCl	AgNO ₃	NaI
d, нм	$9,0 \times 10^{-5}$	$9,0 \times 10^{-5}$	$10,0 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$6,3 \times 10^{-5}$
τ_1 , с	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$
τ_0 , с	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,47 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,53 \times 10^{-6}$
N, см ⁻³	246,333	96	32	284	223,333	541,333
Q	3,579	5,12	3,6664	5,347	2,756	6,199
α	4,49	4,49	4,984	3,74	1,99	3,12
n	1.34	1.49	1.54	1.64	1.75	1.77
c, см/с	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}

Тажрибада барча аэрозоллар учун экстинкция коэффициенти ўлчанган бўлиб, сигарет тутуни учун $4.86 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$, ацетон учун (CH_3COCH_3) $2.37 \times 10^{-6} \text{ см}^{-1}$, спирт учун ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) $2.37 \times 10^{-6} \text{ см}^{-1}$, сув буғи учун (H_2O) $2.03 \times 10^{-6} \text{ см}^{-1}$, атмосфера ҳавоси учун $2.06 \times 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ қийматларни ташкил қилиши аниқланган. Биз иккала кўзгу орасига La атоми ярим катодли лампасини Брюстер бурчагида жойлаштирдик. La атоми ярим катодли лампада кечикиш вақтига ва сигналнинг шаклига таъсири ўрганилган. Барча ўлчашлар бўёқ лазерининг $\lambda=550.1 \text{ нм}$, $\nu=1 \text{ кГц}$, $P=0,100 \text{ Вт}$ параметрларида амалга оширилган. Оптик резонаторнинг узунлиги ва диаметри мос ҳолда $l=61 \text{ см}$ ва $d=2 \text{ см}$ ни ташкил этади. Барча ўлчашлар бўёқ лазерининг қуйидаги параметрларида $\lambda=524 \text{ нм}$, импульсдаги энергияси $E=10 \text{ мкЖ} \div 100 \text{ мкЖ}$ билан амалга оширилган. Бўёқ лазерда кумарин 307 бўёғи, эритувчи сифатида эса этаноллардан фойдаланилган. Лазер импульсининг тўлиқ йўли (у томонга ва орқага) $2L/c=4 \text{ нс}$ тенг ҳисобланади. Тажрибада бўш резонаторнинг кечикиш вақти (τ_0) ва сочувчи намуна билан тўлдирилган резонаторнинг кечикиш вақти (τ_1) ўлчанган. Унда, агар бу қийматларни $\tau_1=1/14326,7=6,98 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $\tau_0=1/13327,12=7,5035 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ (4) формулага қўйилса, атмосфера ҳавоси учун экстинкция коэффициенти $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ қиймати келиб чиқади.

ХУЛОСА

Ультракичик концентрацияли атомлар ва аэрозоллар билан лазер нури таъсирида намоён бўладиган резонансли ва норезонанс физик жараёнлар механизмларини тадқиқ қилиш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Аэрозоль заррачаларида ёруғлик экстинкциясини ўлчаш учун лазерлар системаси, тоза ҳаво генератори, тайёрлаш блоки ҳамда сўниш сигналини қайд қилиш системаларидан иборат резонатор ичида сўниш лазер спектрометри яратилган.

2. Иккита юқори қайтарувчи ботик кўзгудан иборат бўлган оптик резонаторда ёруғлик нури намунада кўплаб ўтиши туфайли сўниш вақтини ўлчашга асосланган, лазер буғлатиши туфайли ҳосил бўладиган атомлар, молекулалар ва аэрозолларни қайд қилишнинг янги усули ишлаб чиқилган.

3. Аэрозоллар коэффициент экстинкцияси лазер энергиясининг кечиқиш вақтига, намуна ва линза ўртасидаги масофага (энергия зичлигига) боғлиқлиги қонунияти асосида лазер импульсининг қуввати 250мЖ, кечиқиш вақти 50мс, намуна ва линза ўртасидаги масофа 12мм бўлганда энг юқори экстинкция коэффициентиға эришиш мумкинлиги кўрсатилган.

4. Металлар тузларининг шаффоф аэрозоллари (NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃) ва органик бўёқлар аэрозолларининг тўлқин узунлиги 630, 580÷660, 615 ва 635нм билан импульсли лазер уйғотишда экстинкция эффективлигининг ўлчам параметри (α)ға боғлиқлиги аниқланган ва бу боғлиқлик Ми назарияси билан яхши мос келиши кўрсатилган.

5. Илк бор «графитли печь» атомизаторида In, Li, Au, Ag, Pt атомларини уйғотиш ва ионлаштиришнинг икки поғонали тўқнашув схемаларида $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ ўтишда Li, Na, Ag, Au, Pt атомлари учун, $5p^2P_{3/2} \rightarrow 6s^2S_{3/2} \rightarrow 8p^2P_{1/2}$ ўтишда In атоми учун максимал сигналлар кузатилиши мос равишда аниқланган.

6. «Стержень-аланга» атомизаторида энгил буғланадиган элементларнинг ҳарорат бўйича селекцияси ва платформа ҳамда графитли найчадан ташкил топган янги электротермик атомизатор-ионизаторлар матрицавий эффектларни йўқотиши аниқланган.

7. Алюминий қотишмаларида кальций ва ишқорий металлар киритмаларининг локал тарқалиши жараёнларини кузатиш учун универсал лазер фотоионизацион спектрометри ишлаб чиқилган.

8. Намунанинг ҳажми бўйича натрий киритмасининг тарқалиши тахминан бир хил, $10^{-3}\%$ га яқин эканлиги, кальций киритмасининг тарқалиши эса нотекис эканлиги кўрсатилган.

9. $n \leq 50$ учун ридберг ҳолатларнинг энергия қийматлари (E_n) бўйича олинган ҳисоблаш натижаларида Zn, Cd, Hg атомларининг юқори уйғонган триплет $np^3P_{0,1,2}$ ҳолатлари бошқа усуллар билан ҳам тасдиқланиши кўрсатилган.

10. Резонанс ўтишлар тўйиниш бўсағасигача лазер нурининг энергиясини ошириш йўли билан ўрганилаётган атомлардан кузатилаётган селектив ионланиш сигналининг чизикли ортиб бориши кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ХАЛМАНОВ АКТАМ ТОШКУВАТОВИЧ

**ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
УЛЬТРАМАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ АТОМОВ В РАЗЛИЧНЫХ
ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЯХ ВЕЩЕСТВА**

01.04.05 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc) ДИССЕРТАЦИИ
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2017

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2017.2.DSc/FM50.

Докторская диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, и резюме на английском языке) размещен на вебстранице Научного совета по адресу (kengash.fti.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziyonet» по адресу (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	Эшкобилов Напас Бекназарович, доктор физико-математических наук
Официальные оппоненты:	Нематов Шерзод Қаландарович доктор физико-математических наук Низамов Негмат Низамович доктор физико-математических наук, профессор Азаматов Зокиржан Тахирович доктор физико-математических наук
Ведущая организация:	Национальный университет Узбекистана.

Защита состоится «___» _____ 2017г. в ___ часов на заседании Научного совета 14.07.2016.FM/T.12.01 при DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 26. Тел./Факс: (+99871) 235–42–91, e-mail: lutp@uzsci.net.

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ____). (Адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули – 26. Тел.: (+99871) 235–30–41).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2017г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2017г.).

С.Л. Лутпуллаев,
Председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук, д-р. ф.-м. н., профессор

А.В. Каримов,
Ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук, д-р. ф.-м. н., профессор

С.А. Бахромов,
Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученой степени доктора наук, д-р.
ф.-м. н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В современном мире разработка новых аналитических методов определения ультранизких содержаний элементов в различных веществах играет важную роль для многих направлений современной науки и техники. В этом аспекте для решения большого числа задач на современных достижениях необходим контроль содержания определенных элементов в веществе на уровне 10^{-8} – $10^{-11}\%$ является одной из важных задач.

В годы независимости значительное внимание уделялось приоритетному развитию науки Республики Узбекистан, в частности особое внимание было уделено исследованию атомов и аэрозолей или аналогичных сложных молекул для эффективного развития высокочувствительной лазерной спектроскопии. В этой области достигнуты определенные результаты по исследованию ближней границы ионизации атомов и определения эффективных схем возбуждения атомов, а также по изучению морфологических и оптических свойств различных аэрозолей. В соответствии со «Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» особое внимание важно уделить созданию эффективных механизмов внедрений научных и инновационных достижений в практику, создание новых приборов на основе физических механизмов проявления резонансных и нерезонансных процессов взаимодействия лазерного излучения с ультрамалыми концентрациями атомов и аэрозолей вещества в области фотоники лазерной спектроскопии.

В настоящее время в мировой науке исследования высоковозбужденных состояний многоэлектронных атомов и оптических свойств различных аэрозолей дают возможность разработки универсального лазерного фотоионизационного спектрометра. В этом отношении актуальность и востребованность темы данной диссертации определяется целенаправленными научными исследованиями, а именно: разработка новых фотоионизационных и столкновительных схем возбуждения известных состояний исследуемых атомов; проведение теоретических расчетов и получение экспериментальных спектров для тяжёлых атомов; выявление эффективной динамики и типов физических процессов возбужденных атомов и молекул; изучение кинетики сигналов в зависимости от технических характеристик экспериментальной установки и параметров атомов и молекул; установление новых закономерностей морфологических и оптических свойств аэрозольных частиц, не имеющих квантовых состояний; определение ультрамалых концентраций атомов и аэрозолей имеет важное значение.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №-ПП–1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2015 года, №-ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию

деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года и №-УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации¹. Ведущие ученые мировых научно-исследовательских центров и университетов, в частности Национальное бюро стандартов, Университет штата Флорида (США), Московский государственный университет, Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН, Институт Спектроскопии РАН (Россия), Technion-Israel Institute of Technology (Израиль), Advanced Photonics Research Institute, APRI (Южная Корея) и Чалмерский технологический университет (Швеция) проводят исследования природы процессов возбуждения и ионизации атомов методом резонансной лазерной спектроскопии и взаимодействия перестраиваемых лазерных излучений с частицами аэрозоля внутри резонатора.

На мировом уровне по научному направлению диссертационного исследования был решен ряд актуальных задач и получены важные научные результаты: теоретические и экспериментальные работы по изучению высоковозбужденных состояний атомов и молекул, разрешению сверхтонких структур и изотопических сдвигов атомных оптических линий и определению содержания следов различных элементов в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского Российской академии наук, Институте спектроскопии Российской академии наук (Россия); по лазерному фотодиссоциационному разделению изотопов урана в Лос-Аламосской лаборатории, Компании «Эксон Рисарч энд Инжиниринг» (США); созданию прибора внутри резонаторного спектрометра в Technion-Israel Institute of Technology (Израиль), Advanced Photonics Research Institute, APRI (Южная Корея), Компании «Tiger optics» (США).

В настоящее время, в мире проводятся теоретические и экспериментальные научно-исследовательские работы по изучению высоковозбужденных состояний атомов с высокими потенциалами

¹ Travis J.C., Turk G.C. Laser-Enhanced Ionization Spectrometry // New York: John Wiley & Sons Inc, 1996. – 334 p.; Winefordner J.D., Gornushkin I.B., Pappas D., Matveev O.I. and Smith B.W. Novel uses of lasers in atomic spectroscopy. Plenary Lecture // J.Anal. Atomic Spectrum, 2000. – Vol. 15. – pp. 1161-1189; Busch K.W. Busch M.A. / Cavity-Ringdown Spectroscopy. An Ultratrace-Absorption Measurement technique Eds. ACS Symp. Ser. – Washington, DC, 1999. – P. 269; Balykin Victor I. The scientific career of VS Letokhov // Phys. Scr., 2012. – Vol. 85. – pp. 1-51; Горбатенко А., Воронина Р., Ревина Е. Аналитическая лазерная ионизационная спектрометрия пламени. Выбор аналитической формы определения редкоземельных элементов // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия, 2008. – Т. 49, № 1. С. 66–68. и другие источники.

ионизации (от 7эВ до 10,4эВ), в том числе в следующих приоритетных направлениях проводятся исследований: морфологических и оптических свойств аэрозольных факелов от поверхности металлов, аэрозолей солей металлов и органических красителей; теоретическое исследование энергетических значений ридберговских состояний для тяжелых атомов и количественное определение элементов в водных растворах; определение энергетической зависимости аэрозольных факелов образованной от поверхности металлов, сплавов и почвы при воздействии лазерного излучения и эффективности экстинкции различных прозрачных аэрозолей методам внутрирезонаторного затухания.

Степень изученности проблемы. В 1977 году американскими учёными S.A.Tuccio и G.S.Hurst впервые были проведены эксперименты по детектированию ультрамалых количеств единичных атомов натрия и урана методом лазерной резонансно-ионизационной спектроскопии в вакууме; ученые США J.C.Travis, G.C.Turk и др. предложили метод атомно-ионизационной спектроскопии в пламени. Американские ученые O'Keefe и Deason и др. разработали метод лазерной абсорбционной спектроскопии внутри резонаторного затухания для исследования металла кластеров, диагностики пламени и молекулы газов. Ученые Южной Кореи Jongmin Lee, Do-Kyeong Ko и др. исследовали высоковозбужденные ридберговские и автоионизационные состояния атомов (Yb, Sm) и разработали метод лазерной абсорбционной спектроскопии внутри резонаторного затухания для исследования следов метана (CH₄) и этана (C₂H₆). Ученые Израиля V.Bulatov, I.Schechter и др. использовали метод лазерной абсорбционной спектроскопии внутри резонаторного затухания для детектирования аэрозольных частиц.

Одновременно российские ученые В.С.Летохов, Н.В.Чекалин, Н.Б.Зоров и др. детектирование ультрамалых количеств единичных атомов (Na, Cs, Al, In, Pb, Au, Yb, U) исследовали методом двухступенчатых или трехступенчатых схем возбуждения через s и p состояния в вакууме или пламени.

Ученые Узбекистана, в частности, С.А.Бахромов, Т.Усманов, Н.Б.Эшкobilов и др. в своих работах использовали фотоионизационные и столкновительные механизмы ионизации возбужденных атомов в атомарном газе.

Однако проблемы детектирования единичных атомов, аэрозолей или схожих с ними сложных молекул пока не решены. Спектроскопические данные о ридберговских состояниях через d состояния ($n \geq 4$), лежащих в области 0,9÷1,5эВ ниже границы ионизации пока не исследованы. Мало исследованы фотоионизационные и столкновительные схемы возбуждения исследуемых атомов с высокими потенциалами ионизации в различных атомизаторах. Не исследованы морфологические и оптические свойства аэрозольных частиц, не имеющих ярко выраженных квантовых состояний. Перечисленные выше нерешенные задачи являются предметом данной диссертации.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено по плану научно-исследовательских работ Самаркандского государственного университета в рамках научных проектов по темам К-22-96 «Разработка методики определения содержания металлов платиновой группы в технологических растворах методом лазерной атомной ионизации в пламени» (1996–1998) и № 112/1 «The James Franck Program in Laser Matter Interaction and by the Fund for promotion of research, Technion-Israel Institute of Technology» (2002), «Brain Pool Program of the Ministry of Science and Technology in Korea» (2002–2003), ИТД-14-024 «Разработка и создание мощного ультрафиолетового импульсного азотного лазера с двухактивным объемом» (2009–2011), ИТД-7-12 «Разработка и создание внутрирезонаторного лазерного абсорбционного спектрометра для измерений экстинкции света, рассеивания и поглощения частицами аэрозоля» (2012–2014), SfP № 983931 «Стабильное управление использования токсичных загрязняющих веществ в центральной Азии: Региональная модель экосистемы для безопасности окружающей среды» (2011–2014).

Целью исследования является установление физических механизмов проявления резонансных и нерезонансных процессов взаимодействия лазерного излучения с ультрамалыми концентрациями атомов и аэрозолей вещества.

Задачи исследования:

разработать и создать внутрирезонаторный лазерный абсорбционный спектрометр для измерения экстинкции света частицами аэрозоля;

исследовать локальное распределение примесей в различных пробах сплавов;

исследовать основные процессы возбуждения и ионизации атомов в системе «графитовая печь» и в системе «стержень пламя». Определить эффективные столкновительные схемы возбуждения через $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ и $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (f)s$ состояния, где n , k , m и f главные квантовые числа уровней;

теоретически исследовать значения энергии (E_n) ридберговских состояний атомов тяжёлых элементов и рассчитать предел обнаружения элементов в водных растворах;

исследовать аэрозольные факелы от поверхностей металлов (Fe, Al, Zn, Ag, Au), сплавов и почвы методом внутрирезонаторной спектроскопии и определить их коэффициенты экстинкции;

исследовать эффективность экстинкции различных прозрачных аэрозолей (NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃) методом лазерной спектроскопии внутрирезонаторного затухания;

исследовать морфологические и оптические свойства органического аэрозоля (краситель родамин 640) методом лазерной спектроскопии внутри резонаторного затухания;

определить зависимость эффективности экстинкции от размерного

параметра в рамках теории Ми.

Объектом исследования являются водные стандартные растворы, алюминиевые сплавы, кристаллы (NH_4F , NaF), полупроводниковые материалы (GaAs , Si) и различные аэрозоли солей металлов (NaCl , CsCl , NaI , NaF , KCl , AgNO_3), органических красителей (родаминовые красители), сплавы, почвы и горные породы.

Предмет исследования – резонансные и нерезонансные процессы взаимодействия интенсивного импульсного лазерного излучения с атомами, молекулами и аэрозолями вещества.

Методы исследования. В диссертационной работе применены методы лазерной спектроскопии внутри резонаторного затухания, лазерной резонансно-ионизационной и атомно-ионизационной спектроскопии.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

выявлена обратная зависимость закономерности ($N \sim d^{-2}$) между абсолютной концентрацией частиц (N) образованной от поверхности металлов, сплавов и почвы при воздействии мощного импульсного инфракрасного лазерного излучения ($\lambda=1064\text{нм}$, 250 мДж) и размерами аэрозоля (d), а также прямая зависимость ($\sigma \sim L$) между коэффициентами экстинкции (σ) и расстоянием от поверхности (L) до лазерного излучения;

обоснована обратная зависимость закономерности ($Q \sim \alpha^{-2}$) между эффективностью экстинкции (Q) и величиной размерного параметра (α) различных прозрачных (NaCl , CsCl , NaI , NaF , KCl , AgNO_3) и органических (Родамин 640) аэрозольных частиц;

определены эффективные схемы возбуждения через **p** и **d** состояний по сравнению с **s** состоянием при возбуждении атомов;

выявлены физические механизмы формирования полезных сигналов (селективный ионизационный сигнал и сигнал затухания), позволяющие регистрировать параметры ионизации, поглощения и затухания атомарных и аэрозольных систем в интенсивных импульсных лазерных полях;

показан способ повышения селективности и чувствительности метода атомно-ионизационной спектроскопии на основе селекции по температуре атомизатора «стержень-пламя» и реализации новых электротермических атомизаторов-ионизаторов, состоящих из графитовой трубки и платформы;

разработан внутрирезонаторный лазерный абсорбционный спектрометр на основе двухобъёмного азотного лазера для измерений экстинкции света частицами аэрозоля.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

предложен и экспериментально применен универсальный лазерный фотоионизационный спектрометр для исследования локального распределения примесей щелочных металлов и кальция в алюминиевых сплавах;

выявлены новые методы детектирования аэрозолей по физико-химическим свойствам аэрозольных факелов от твердых поверхностей и аэрозолей соли металлов и органических аэрозолей.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением современных методов и подходов оптики и лазерной спектроскопии для исследований ультранизких концентраций атомов и аэрозолей. Проведены теоретические и экспериментальные расчеты полученных результатов, подтвержденные методами добавок, «введено-найденно»; метод регистрации полезного сигнала (электрическая и оптическая), метод корректного учета фона, метод сканирования длины волны полностью согласуется с результатами других авторов. Все цифровые данные исследований обработаны с использованием современных компьютерных технологий.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость полученных результатов в научных исследованиях позволяет расширить понятия об резонансных и нерезонансных физических процессах проявления взаимодействия лазерного излучения с ультрамалыми концентрациями атомов и аэрозолей вещества.

Практическая значимость результатов исследований настоящей диссертации заключается в том, что разработанные установки и методики можно использовать при производстве особочистых растворителей и полупроводниковых материалов, а также в области геологии и геохимии при определении содержания примесей и элементов, а также контроль и управление содержания аэрозолей при помощи лазерного излучения.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов изучения механизмов формирования высокочувствительной лазерной спектроскопии ультрамалых концентраций атомов и аэрозолей:

экспериментальные данные по исследованию морфологических параметров аэрозолей использованы в зарубежных журналах (Journal of Analytical Atomic Spectrometry V. 20, p. 53-59 (2005); Journal of Analytical Atomic Spectrometry V. 29, p. 2267-2274 (2014); Chinese Science Bulletin Vol. 58, № 20, p. 2440-2446 (2013); Anal Bioanal Chem (2005) 383, p. 1090-1097) для определения числа частиц и оптической экстинкции аэрозоля. Применение научных результатов позволило определить коэффициент экстинкции света и абсолютная концентрация аэрозольных частиц;

результаты по исследованию абсорбции и рассеяния света с микрочастицами с помощью внутрирезонаторной спектроскопии использованы в зарубежных журналах (Journal of Environmental Sciences 26 (2014) p. 2412-2422; Atmospheric Chemistry and Physics 7, p. 1523-1536, 2007; Laser Photonics Re. 5, № 4, p. 534-552 (2011)) для изучения оптических свойств аэрозолей, химического состава, измерения экстинкции света рассеянными и поглощающими частицами аэрозолей. Применение научных результатов позволило определить эффективность экстинкции аэрозольных частиц;

полученные результаты механизмов проявления резонансных и нерезонансных процессов взаимодействия лазерного излучения с ультрамалыми концентрациями атомов и аэрозолей вещества по определению эффективных столкновительных схем возбуждения атомов,

новых закономерностей морфологических и оптических свойств аэрозольных частиц, а также коэффициента эффективности экстинкции использованы в гранте Ф-2-15 «Околопороговая лазерно-ионизационная спектроскопия атомов тяжёлых элементов (Pt, Au, Hg, Tl, Pb)» для определения квантовых состояний аэрозолей и многоступенчатых столкновительных и фотоионизационных схем возбуждения атомов (справка ФТК-03-13/656 Агентства по науке и технологии от 06 октября 2016 года). Применение научных результатов позволило создать комбинированный атомно-ионизационный спектрометр, позволяющий в 10 раз увеличить чувствительность определения элементов, и работающий в режиме «стержень-пламя» и «графитовая печь», а также в 2 раза увеличить число аэрозольных частиц в оптическом резонаторе с помощью метода лазерной абляции.

Апробация результатов исследований. Результаты данного исследования были обсуждены, в том числе, на 13 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. Полученные результаты по теме диссертации изложены в 38 научных трудах, которые полностью отражают ее содержание: из них 18 научных статьи в журналах (9 в международных и 8 в республиканских) рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 1 монография, 20 публикаций в виде тезисов и материалов международных и республиканских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы. Текст диссертации изложен на 206 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, а также объект, предмет и методы исследования, определена связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательской организации, где выполнена диссертация, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Состояние проблемы. Высококочувствительные лазерные спектроскопические методы»** приведен обзор литературных данных по современному состоянию высококочувствительных лазерных методов исследования ультрамалых концентраций атомов в различных фазовых состояниях вещества. Обсуждены и рассмотрены накопленные к настоящему времени результаты

исследования с использованием различных вариантов атомизации пробы и различных источников накачки лазера на красителях. Приведены физические основы высокочувствительных лазерных методов. Исходя из обзора, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации **«Экспериментальные установки»** описаны методики и высокочувствительные экспериментальные установки с различными атомизаторами пробы, использованные для исследования локального распределения примесей щелочных металлов в алюминиевых сплавах и различных каналов ионизации атомов методами высокочувствительной лазерной спектроскопии. Спектрометр работает следующим образом. Излучение двухобъемного лазера на молекуле азота ($\lambda=337,1\text{нм}$, $\tau=8\text{нс}$, $E=10\text{мДж}$) использовалось для накачки перестраиваемых лазеров на красителях. Энергия импульсов лазеров на красителях на первой и второй ступенях составляла около $10\text{--}100\text{МкДж}$ и ширина линии генерации — 1см^{-1} . В вакуумной камере располагались атомизатор и вторично-электронный умножитель (ВЭУ). Пересечение атомного пучка с лазерными лучами происходило в центре вакуумной камеры в области между двумя электродами, на которые подавался высоковольтный ионизирующий электрический импульс. Фотоионный сигнал после ВЭУ и предусилителя поступал на вход стробинтегратора и от него на самописец. Одновременно на пламя направлялись лазерные лучи, и осуществлялось селективное ступенчатое возбуждение. Далее возбужденные атомы ионизируются при столкновении с частицами пламени. Образовавшиеся ионы собирались в коллекторе и после усиления подавались на стробинтегратор и регистрировались цифровым вольтметром. В качестве атомизатора использовалась щелевая горелка. Спектр ионизационного сигнала, возбуждаемый импульсным источником излучения, измерялся методом стробирования импульса. Комбинированный атомно-ионизационный спектрометр, работающий в режиме «стержень-пламя» и «графитовая печь», состоит из 3-х перестраиваемых лазеров на красителях, накачиваемых эксимерным лазером на XeCl ($\lambda=308\text{нм}$, $\tau=10\text{нс}$, $E=70\text{мДж}$), атомизатора-ионизатора «стержень-пламя» и «графитовой печи» и системы регистрации. Лазер на красителях собран по схеме со скользящим падением луча на дифракционную решетку. Они обеспечивают энергию в импульсе до 2мДж в видимом и до 200мкДж в ультрафиолетовом диапазоне, ширину линии генерации $0,2\text{см}^{-1}$.

Атомизаторами служили двухщелевая горелка длиной 20мм , стержень из пирографита длиной 28мм , диаметром 4мм и графитовая трубка диаметром 8мм и длиной 28мм , нагреваемая с помощью программируемого блока с системой стабилизации мощности, коллектор для сбора заряженных частиц. Внутри графитовой трубки расположена платформа. Исследуемый образец вводится через дозировочное отверстие в центре трубки в виде раствора или порошка массой $1\text{--}20\text{мг}$.

Использование лампы с полым катодом (ЛСП-1) как источник атома индия проводилось на атомно-ионизационном спектрометре. В лампе

происходит газовой разряд при токе 30мА. Излучение лазера на красителях с длительностью 8нс направлялось в газовый разряд. Оптогальванический (ОГ) сигнал снимался через двухзвенный RC-фильтр с постоянной времени 14мкс и подавался на вход предусилителя, либо поступал на вход стробоскопического вольтметра сигналов с длительностью строба 2мкс, либо записывался в первом канале самопишущего прибора с помощью интерферометра Фабри-Перо.

В этой главе также описаны внутрирезонаторные лазерные абсорбционные спектрометры для измерения экстинкции света частицами аэрозоля. В спектрометре для образования аэрозольных частиц были использованы мощное лазерное излучение и пневматические распылители. В экспериментальной установке использовали два варианта формирования лазерных импульсов испарения и накачки лазера на красителях: одним и двумя Nd:YAG лазерами. Первый вариант – Nd:YAG лазер запускается от формирователя двойных импульсов генератора DG535. Вторая установка была основана на применении двух лазеров; первой Nd:YAG лазер использован для накачки лазера на красителях; второй Nd:YAG лазер использовался для образования плазмы.

Спектрометр состоит из генератора DG535, линзы ($F=50\text{мм}$), двух высоко отражательных вогнутых зеркал ($R>99.97\%$, $r=100\text{см}$), трубки из нержавеющей стали, резонатора длиной 75см, фотоумножителя и цифрового осциллографа (LeCroy 9362), электростатического классификатора и счётчика конденсации частицы.

Экспериментальная установка для исследования характеристики поглощения и рассеяния прозрачных аэрозольных частиц состоит из пневматического распылителя, трубки из нержавеющей стали резонатора с диаметром $d=10\text{см}$ и длиной 85см. Для сушки аэрозоля использована кварцевая труба длиной 80см и диаметром 10см, заполненная силикагелем (molecular sieves 4A). Вогнутые зеркала ($R>99.97\%$, $r=100\text{см}$), оптимизированные на длину волны 575–670нм, были точно расположены в концах трубки из нержавеющей стали резонатора с диаметром $d=10\text{см}$ и длиной 85см.

Экспериментальная установка для измерения коэффициента экстинкции различных аэрозольных частиц состоит из нескольких компонентов: система лазеров, система блоков для чистого воздуха, аэрозоля и газоразрядной лампы с полым катодом, система регистрации. Внутрирезонаторные зеркала были расположены в концах трубки из нержавеющей стали резонатора длиной 65см. Сигнал затухания был измерен с помощью фотоумножителя (Photosensor Module H6780-04). Сигнал фотоумножителя был переведен в цифровую форму с помощью осциллографа (Tektronix TDS3032B) и затем подавался на персональный компьютер.

Экспериментальная установка для измерения коэффициента экстинкции атмосферных аэрозольных частиц (рис. 1) работает следующим образом. Излучение двухобъемного лазера на молекулу азота 1 ($\lambda=337,1\text{нм}$, $\tau=8\text{нс}$, $E=10\text{мДж}$), использовалось для накачки лазера на красителях. Для

регистрации сигнала затухания были использованы фотоумножитель ФЭУ–79, выпрямитель стабилизированный ВС–22, осциллограф С1–70, цифровой осциллограф TDS 2022B, генератор чистого воздуха и персональный компьютер.



Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Запуск развертки осциллографа осуществляется сигналом с фотодиода, на который отводится часть излучения азотного лазера. Внутррезонаторные зеркала были расположены в концах трубки из медного резонатора с длиной 65см. Сигнал фотоумножителя подавался на цифровой осциллограф (Tektronix TDS 2022B) и персональный компьютер.

В третьей главе диссертации «Разработка методов получения свободных атомов и исследование основных процессов атомно-ионизационного метода» приведены данные исследования высоковозбужденных состояний s(Na, Ca), p(Al, In), d(Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Au, Pt, Hg, Cd, Zn), f(Yb, Eu) элементов в различных атомизаторах. Универсальный лазерный фотоионизационный спектрометр использован для определения локального распределения атомов Na, Ca в алюминиевых сплавах, работающий с термической атомизацией вещества в вакууме и атомизацией пробы в пламени. Были реализованы двухступенчатые схемы возбуждения для атомов Ca ($\lambda_1=422,67\text{нм}$, $\lambda_2=399, 2\text{нм}$ для вакуума, $\lambda_2=518,9\text{нм}$ для пламени) и Na ($\lambda_1=589,9\text{нм}$, $\lambda_2=418,7\text{нм}$ для вакуума, $\lambda_2=568,8\text{нм}$ для пламени). Для исследования пробы применены стандартные методики.

Запись фотоионных сигналов с выхода ВЭУ приведена на рис. 2. Для проверки правильности полученных результатов синхронно проведены эксперименты по определению концентрации Ca и Na в водных стандартных растворах описанным выше способом в режиме пламенной атомизации пробы. Ионизационный сигнал при исследовании натрия в пламени пропан-бутан достигает максимального значения при соотношении газ-окислитель 1:8,5. Ионизационный сигнал для кальция при изменении расхода ацетилен-воздух сильно не меняется. Уровень содержания Ca и Na в используемых химических реактивах, а также чистота посуды во время эксперимента контролировались. Таким образом, методом «введено-найдено» установлено, что при массовом отношении основа/определяемый элемент 10мкг/мл: 0,1мкг/мл обнаружено подавление сигналов Ca и Na в растворе алюминия. Здесь подавление исчезает лишь при разбавлении растворов алюминия более чем в 100 раз.

Проведено около 60 анализов на 11 образцах различных поверхностей и глубин геометрии. Экспериментальные результаты показывают, что распределение примесей натрия по объему образца примерно одинаково, около $10^{-3}\%$. Но распределение примесей кальция оказалось неравномерным. Причем, в отдельных участках образца концентрация достигала до $10^{-2}\%$ и более.

Были реализованы трехступенчатые схемы возбуждения для атомов Hg, Cd, Zn. Исследование высоковозбужденных ридберговских состояний атомов Hg, Cd, Zn проводилось в вакууме с использованием электротермического атомизатора.

По результатам обработки полученных ионизационных спектров были определены значения энергии (E_n), квантовые дефекты (Δ), и тонкие структуры (ΔE) ридберговских состояний главных серий у атомов ртути вплоть до $n=18\div 60$, у атомов цинка $n=17\div 55$ и у атомов кадмия $n=17\div 50$.

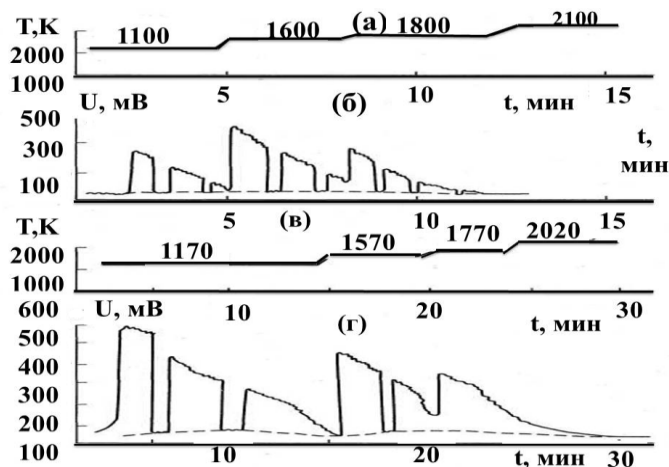
Приведены результаты численного расчета значения энергии (E_n) ридберговских состояний для $n\leq 50$. Полученные экспериментальные данные сравнивали с известными литературными данными. Результаты анализа показывают, что относительная ошибка расчета составляет $\leq 4\%$.

Для дальнейшего улучшения процесса испарения, атомизации и уменьшения пределов обнаружения в методе атомной ионизации нами был использован электротермический атомизатор «графитовая печь». Для изучения характеристик электротермического атомизатора-ионизатора использовались водные растворы исследуемых элементов. Реализованы двухступенчатые и трехступенчатые схемы возбуждения исследуемых атомов в атомизаторе «графитовая печь». Впервые реализованы двухступенчатые столкновительные схемы возбуждения атомов In, Li, Au, Ag, Pt, Yb в атомизаторе «графитовая печь», состоящей из графитовой трубки, платформы и охлаждаемого коллектора, в которой получена чувствительность элементов в водных модельных растворах в 100 и 10 раз лучше по сравнению с атомизаторами «пламя» и «стержень-пламя» соответственно. Показано, что максимальный сигнал наблюдается для атомов In при переходе $5p^2P_{3/2} \rightarrow 6s^2S_{3/2} \rightarrow 8p^2P_{1/2}$ и для атомов Li, Na, Ag, Au, Pt при переходе $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ соответственно (рис. 3). Это, по-видимому, связано с изменением орбитального момента ℓ от 0 до 2, а также ширина линии данного квантового перехода в 10 раз больше чем другой квантовый переход. В результате эксперимента разработаны фотоионизационный и столкновительный механизмы ионизации.

Результаты исследования Au, Yb, Li, Ag, Pt и In в водных растворах приведены в таблице 1. Полученные результаты показывают, что столкновительный механизм ионизации является доминирующим процессом. Для многих элементов в графитовых печах чувствительность в 100–1000 раз выше, чем в пламени. Причина тому – более длительное время пребывания атомов в исследуемом объеме и возможность достижения больших температур атомизации.

В этой главе также представлены результаты исследования различных

каналов ионизации атомов Na, Ca, Cs, Al, In, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Pt, Au, Yb, Eu из различных состояний.



а) (Ca), в) (Na) - последовательность поэтапного повышения температуры атомизатора, б) зависимость ионного сигнала Ca от времени в образце ($M=1\text{мг}$), г) зависимость ионного сигнала Na от времени в образце ($M=2\text{мг}$)

Рис. 2. Зависимость ионных сигналов Ca и Na от времени и температуры испарения

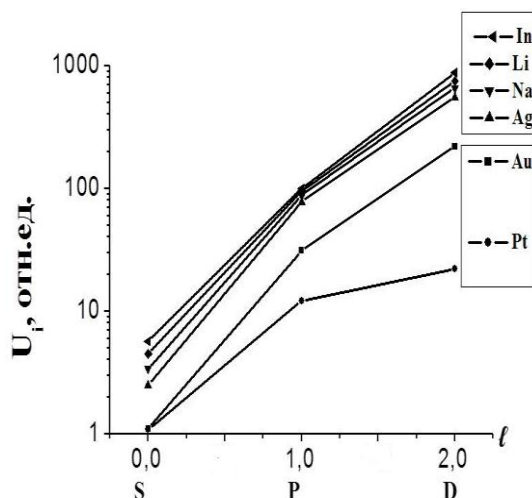


Рис. 3. Зависимость интенсивности ионизационных сигналов (U_i) от орбитального момента (l)

Таблица 1

Результаты определения Li, In, Au, Ag, Pt, Yb в водных растворах с использованием системы «графитовая печь»

Элемент	$\lambda_{\text{возб.}} \text{ (нм)}$			$t_{\text{доп.}}^{\text{д.д.}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$\Delta E = E_i - E_j$		$C_{\text{min}}, \text{ пг/мл}$	
	λ_1	λ_2	λ_3		$\Delta E, \text{ см}^{-1}$	$\Delta E, \text{ эВ}$	ЭР	ТР
Li	670	610		2300	12204	1,49	0,006	0,002
In	451	571		2400	4802	0,59	0,008	0,03
Au	267	294		2400	3046	0,42	5	0,05
	267	306.5		2400	4439	0.66	5	0,05
	267	406.7	643.1	2400		AC	10	0,05
Ag	328	282		2300		AC	0.20	0,03
Pt	266	292		2400	587	0,06	50	0,04
Yb	555	581	581	2700		AC	10	0,03

Фотоионизационный механизм ионизации. Идея метода заключается в ступенчатом возбуждении атомов в высоколежащих электронных состояниях, из которых они ионизируются либо столкновительно, либо с помощью дополнительного излучения.

Сравнение сигналов, измеренных для этих двух случаев, позволяет определить параметры, характеризующие столкновительную ионизацию. Сравнение сигналов, измеренных для этих двух случаев, позволяет определить параметры, характеризующие столкновительную ионизацию. Выход ионизации связан с коэффициентом увеличения сигнала за счет

фотоионизации K и эффективности столкновительной ионизации β следующими простыми соотношениями

$$Y = K^{-1}; \quad \beta = \left(1 - \frac{g_b}{\sum g_i} + \frac{g_b}{\sum g_i} K \right)^{-1}, \quad (1)$$

где g_b – статистический вес верхнего возбужденного уровня, $\sum g_k$ – сумма статистических весов всех участвующих в возбуждении уровней. Экспериментально получены выход ионизации (Y) и эффективность столкновительной ионизации (β) для атомов Au, Ag, Fe, In (0.11, 0.1, 0.08, 0.06 и 0.59, 0.15, 0.25, 0.087) соответственно. Полученные значения показывают, что столкновительная ионизация для всех уровней идёт неэффективно. Это обусловлено большим значением разности потенциала ионизации и энергии возбуждения ($\Delta E = 1,5 \text{ эВ} \div 3,87 \text{ эВ}$), что почти в $8 \div 38$ раз больше kT (для пламени ацетилен-воздух $kT = 0,217 \text{ эВ}$). Был разработан фотоионизационный метод определения коэффициента атомизации $K_{\text{ат}}$ определяемых элементов, Au, Ag, In, Fe в атомизаторах «пламя» и «стержень-пламя». В ограниченном объеме пламени проводится ступенчатая фотоионизация выбранных атомов в режиме насыщения оптических переходов. В результате все атомы из основного состояния переводятся в ионы, а величина регистрируемого при этом ионизационного сигнала $U_i^{\text{макс}}$ связана с коэффициентом атомизации $K_{\text{ат}}$ простым соотношением:

$$K_{\text{ат}} = \frac{C_0 U_i^{\text{макс}}}{e K_y V n_0} \quad (2),$$

где C_0 – ёмкость коллектор-горелки, определяемая экспериментально, e – заряд электрона, K_y – коэффициент усиления системы регистрации, V – облучаемый объем, n_0 – общая концентрация элемента в пламени. В оптимальных условиях мы экспериментально получили коэффициенты атомизации $K_{\text{ат}}$ для атомов Au, Ag, In, Fe (0.3, 0.2, 0.5 и 0.2) соответственно.

Для атомов Ag характерна длина волны 272.0 нм и 282.0 нм, от $5p^2P_{3/2}$ состояния дали два сильных автоионизационных состояния. Были реализованы трехступенчатые фотоионизационные схемы возбуждения для атомов Eu ($\lambda_1 = 601.815 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 540.533 \text{ нм}$, $\lambda_3 = 618.203 \text{ нм}$) в универсальном лазерном фотоионизационном спектрометре. Предел обнаружения в водных стандартных растворах составил $10^{-8}\%$ при относительном стандартном отклонении $S_r = 0.1$.

Фотоионизационные схемы возбуждения атомов индия можно реализовать в лампе с полым катодом. При настройке частоты генерации перестраиваемого лазера на спектральную линию ($\lambda = 451,1 \text{ нм}$ и $\lambda = 303,9 \text{ нм}$) атомного $5p^2P_{1/2,3/2} \rightarrow nd^2S_{1/2}$, $nd^2D_{1/2, 3/2}$ перехода в электрической схеме возникает отрицательный и положительный ОГ сигналы.

При газовом разряде ионы инертного газа бомбардируют поверхность катода и распыляют часть катодного материала в газовую фазу, где атомы In с $5p$ состояния возбуждаются посредством соударения с ионами и электронами на $5d$ состоянии. Далее возбужденные атомы в этом состоянии

взаимодействует с лазерным излучением. Продолжая перестройку длины волны излучения лазера в диапазонах 455.8нм, 456.1нм, 458.9нм, было обнаружено увеличение ОГ сигналов. Измерение значения ОГ сигнала дало возможность определить положение автоионизационных состояний атома In. В результате исследования двухступенчатой схемы возбуждения атома индия в лампе с полым катодом обнаружены автоионизационные состояния. Энергии автоионизационных уровней рассчитывались из измеренных значений длин волн лазерного излучения, осуществляющего с $5d^2D_{5/2}$ уровня атома In. Энергии этих автоионизационных состояний составляли 52651.2см^{-1} , 52638.2см^{-1} , 52503.2см^{-1} .

Столкновительный механизм ионизации. Были изучены различные схемы возбуждения атомов в атомизаторах «пламя» и «стержень-пламя»: одноступенчатые с основного и возбужденных состояний, двухступенчатые схемы возбуждения от возбужденных состояний, двухступенчатая схема возбуждения от основного состояния и трехступенчатая схема возбуждения от основного состояния. Во всех случаях выбрано оптимальное соотношение «горючий газ» – «воздух», 0,21л/мин:1,3л/мин для атомов Al, Eu, (0,21л/мин:6,6л/мин) – Cs, (0,22л/мин:1,7л/мин) – Na соответственно. Для атомов Ca, In, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Pt, Au, Ag, Yb расходы горючего газа ацетилена и воздуха составили 0,27л/мин и 1,6л/мин соответственно. Для каждой схемы исследовали зависимости ионизационного сигнала от плотности мощности возбуждающего лазерного излучения W в широком диапазоне ее изменения (700кВ/см^2 для 10нс длительности лазерного излучения). Были использованы двухступенчатые схемы ионизации с $\lambda_1=267.6\text{нм}$ и $\lambda_2=294.0\text{нм}$ для Au и $\lambda_1=266\text{нм}$ и $\lambda_2=292.9\text{нм}$ для Pt в атомизаторе стержень-пламя. Лазерные лучи имеют относительно большие диаметры (~2мм). На рис. 4 представлена зависимость интенсивности ионизационных сигналов (U_i) атома золота от плотности мощности лазерного излучения (W). Были использованы чистые водные растворы (10пг/мл – 1мг/мл) атомов Au для калибровки в спектрометре «стержень-пламя» и электротермического атомизатора. Настраивая второй лазер в диапазоне между 250–340нм, обнаружили несколько пиков резонанса (рис. 5). Эти пики соответствуют высоко возбужденному ридберговскому состоянию атомов Au. Эти состояния соответствуют основным квантовым числам $n=8$ и $n=9$, где амплитуды сигналов ионизации от двухступенчатых возбуждений оказываются приблизительно в 1000 раз больше, чем при одноступенчатом возбуждении атомов Au. Исследованы одноступенчатый и двухступенчатый схемы возбуждения из основного $3d^54s\ ^7S_3$ состояния на септитные состояния $3d^54p\ ^7P_{2,3,4}$, $3d^44s4p\ ^7P_{2,3,4}$ атомов хрома в атомизаторе «стержень-пламя». Нижний предел обнаружения для s(Li, Na, Cs), p(Al, In), d(Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Pt, Au) и f(Yb, Eu) элементов в водных растворах в системе «пламя» составляет $10^{-10}\div 10^{-12}\text{г/мл}$, а для систем «стержень-пламя» $5\times 10^{-10}\div 1\times 10^{-14}\text{г/мл}$.

Результаты исследования теоретической оценки предела обнаружения для s(Li, Na, Cs), p(Al, In), d(Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Pt, Au) и f(Yb) элементов

в водных растворах в системе «стержень-пламя» составляет $1 \times 10^{-14} \div 2 \times 10^{-15}$ г/мл. Экспериментально достигнутые пределы обнаружения оказались примерно на порядок выше, а для некоторых элементов на несколько порядков выше расчетных.

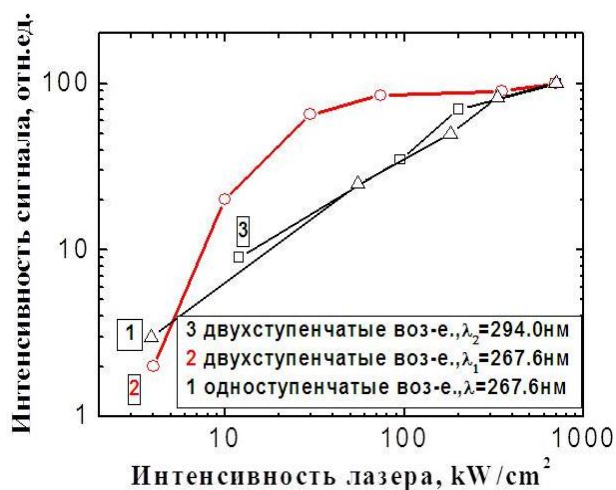


Рис. 4. Зависимость интенсивности ионизационных сигналов (U_i) от плотности мощности лазерного излучения (W)

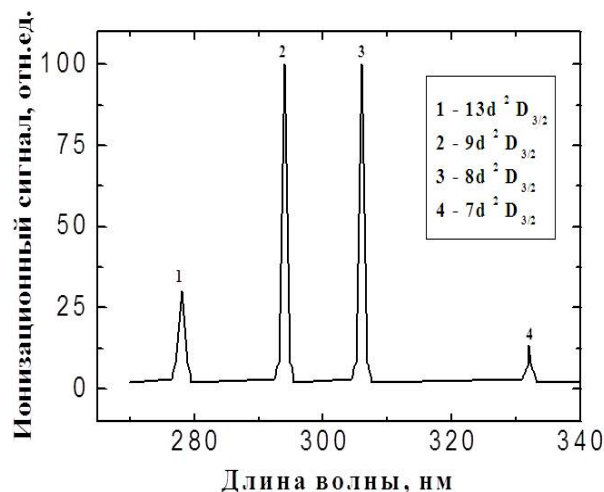


Рис. 5. Атомно-ионизационный спектр золота в области $n=7 \div 13$ при сканировании второго лазера в диапазоне между 250–340 нм

В атомно-ионизационном методе существуют следующие влияющие факторы: термические, спектральные и химические. Сочетание лазерного ступенчатого возбуждения атома в системе «стержень-пламя» с пламенным способом атомизации пробы в атмосфере продемонстрировано для определения содержания Li, Na и Ag в ацетоне, фосфорной кислоте, Cr, Mn, Ni, Co, NH_4F и NaF, Fe, Al, Na и Fe, Cs в GaAs, Si, Au и Au, Na, Pt, AgNO_3 и горной породе (Трапп) 30 г/л, Cs, Na, In в природных водах. На рис. 6. представлены зависимости коэффициента усиления сигнала от исследуемых образцов.

Для решения этой проблемы нами исследован эффект усиления сигнала от исследуемых элементов. Для определения золота в азотнокислом серебре готовились растворы AgNO_3 с концентрацией 1 г/л. Спектральное влияние матрицы в этом случае проявляется в виде аддитивного фонового сигнала от Ag. Для решения этой проблемы нами использованы ступенчатые схемы возбуждения атома Au. Установлено, что химические влияния матрицы отсутствуют.

Для исследования следов золота в горных породах использован электротермический атомизатор «графитовая печь». Были реализованы двухступенчатые столкновительные схемы возбуждения атома золота ($\lambda_1 = 267$ нм, $\lambda_2 = 294$ нм, $\lambda_2 = 306$ нм). Обнаружено химическое влияние матрицы на аналитический сигнал золота. Основными влияющими элементами являются оксиды алюминия и соединения натрия. Эта проблема решается путем разбавления раствора горных пород от $C = 0,3$ г/л до $C = 0,05$ г/л.

Для анализа растворителей наилучшим образом подходит пламенный атомизатор-ионизатор, что продемонстрировано на примере определения Li и K в ацетоне. Натрий определяли в системе «стержень-пламя», где предел обнаружения зависит от чистоты графитовых стержней. Для анализа полупроводниковых материалов использовали растворы кремния и арсенида галлия с концентрацией 1г/л. Методом добавок установлено, что влияние основы GaAs с концентрацией 10г/л на величину аналитического сигнала Cr, Al, Na и Fe отсутствует. Предел обнаружения Al в образцах GaAs определялся небольшим аддитивным фоновым сигналом от основы пробы. При определении Fe и Cs в кремнии с помощью стандартных добавок установлено, что влияние основы пробы на величину аналитического сигнала Fe и Cs не обнаружено. Предварительные оценки содержания Fe в растворах GaAs и Si с концентрацией 1г/л показали, что примеси Fe в используемых для приготовления растворов кислотах HCl, HNO₃ ограничивали предел обнаружения Fe в растворах GaAs и Si на уровне 10⁻³%. Для решения этой проблемы мы использовали особочистые кислоты и реактивы, а также контролировали чистоту посуды. Поэтому предел обнаружения Fe в этих образцах определялся флуктуациями фонового сигнала от соединений GaAs и Si в пламени.

Для определения Cr, Mn, Ni, Co в фторсодержащих материалах мы впервые использовали атомизаторы «пламя» и «стержень-пламя». Для анализа фторсодержащих материалов использовали растворы NH₄F и NaF с концентрацией 50г/л и 0,2г/л соответственно. Методом добавок установлено, что влияние основы NH₄F с концентрацией 50г/л на величину аналитического сигнала Cr, Co, Mn, Ni отсутствует. При определении никеля и кобальта в 5%-м растворе NH₄F наблюдался неселективный ионизационный фон от матрицы. Природа этого фонового сигнала нами не была исследована. Предел обнаружения Ni и Co в пробе определялся флуктуациями фонового сигнала от соединений NH₄F в пламени. Анализ пробы NaF является более сложным для пламенного АИМ. Атомы Na, находящиеся в основном состоянии 3s и возбужденных состояниях 3p, имеют довольно высокую эффективность ионизации лазерным излучением первой и второй ступеней возбуждения. Подобная ионизация эффективна даже на крыльях линий поглощения вдали от резонанса. Добавление определяемых элементов в разбавленный раствор 0,2г/л NaF также обнаруживает фоновый сигнал от основы пробы. Установлено, что определение содержания Cr, Co, Ni, Mn в образцах NaF с помощью атомно-ионизационного метода в пламени ацетилен-воздух без удаления матрицы невозможно.

В результате проведенных исследований были выбраны следующие режимы нагрева (рис. 7): сушка при t=90°C в течение 50с, предварительный нагрев до t=800°C в течение 100–600с и рабочий цикл для хрома t=1800°C, для марганца t=1700°C, а для никеля и кобальта t=2000°C. Испарение пробы происходит в течение 6с для каждого цикла. При этих режимах нагрева, работая с 2%-ми растворами, удалось эффективно на предварительной стадии удалить натрий, не теряя хром, марганец, никель и кобальт.

В четвертой главе «Экспериментальные результаты по исследованию экстинкции аэрозольных факелов» приведены результаты экспериментов по исследованию измерения числа частиц, коэффициента экстинкции и время затухания лазерного импульса в оптическом резонаторе. Для исследования аэрозольных факелов от твердых поверхностей нами были выбраны чистые металлы (Fe, Al, Zn, Ag, Au), сплавы и почвы. Морфология аэрозольных факелов была исследована как функция аэрозольных плотностей от расстояния. Мощный Nd-YAG лазер был фокусирован на исследуемые поверхности при частоте 1.0 Гц. Образованные аэрозоли транспортировались в медленном потоке воздуха ($10-12 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$) к счётчику частиц. Результаты показаны на рис.8 где абсолютные концентрации частицы представлены как функция их диаметра.

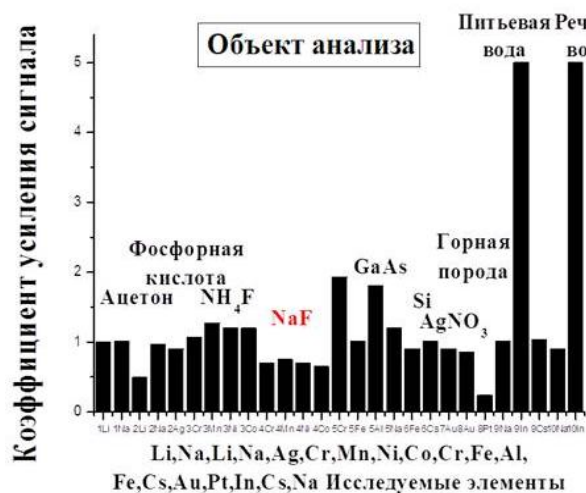


Рис. 6. Зависимости коэффициента усиления сигнала от исследуемых образцов

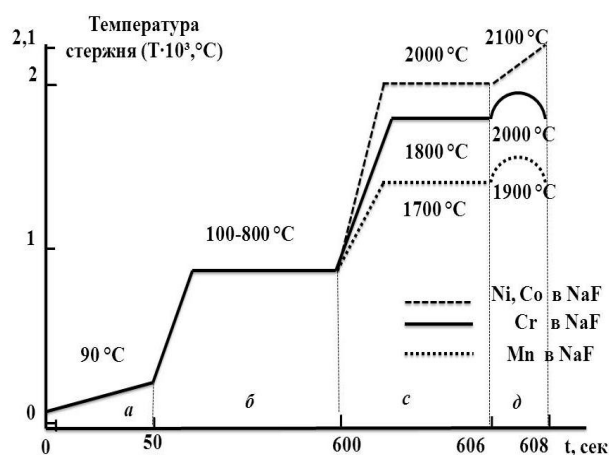


Рис. 7. Режимы нагрева стержня при определении Cr, Mg, Ni и Co в NaF; а) предварительный нагрев, б) испарение натрия, в) испарение определяемых элементов, д) прокаливание стержня

Время затухания было измерено для образцов (рис.9), соответствующие коэффициенту экстинкции рассчитаны по формулу (4), результаты представлены в таблице 2. Было исследовано влияние мощности лазера на морфологию аэрозоля. Аэрозоли с поверхности Zn были получены двумя лазерными мощностями при задержке времени в 50мс. Интересно, что коэффициент экстинкции аэрозоля, соответствующего 750мДж лазерным импульсам, ниже, чем соответствующий ему 250мДж энергии в плазме.

Экстинкцию аэрозоля как функцию расстояния от поверхности для 5 образцов показано на рис. 9. При энергии лазерного импульса 250мДж, времени задержки 50мс и расстоянии 12мм между линзой и пробой наблюдается максимальные экстинкции для всех исследованных образцов. Самый высокий коэффициент экстинкции был измерен для аэрозолей почвы, и самый низкий – для аэрозолей Al.

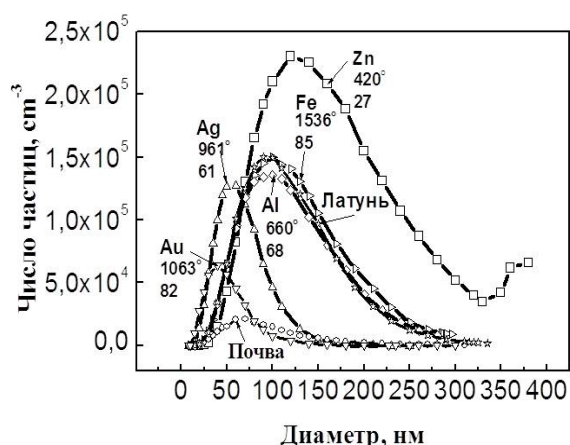


Рис. 8. Зависимость абсолютной концентрации частиц от размера аэрозоля при $T=293K$

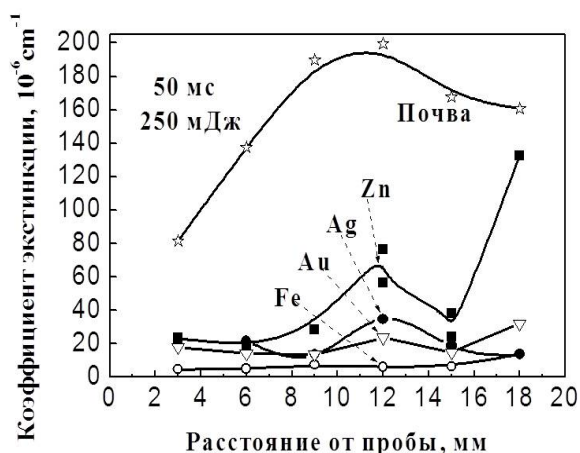


Рис. 9. Зависимость коэффициента экстинкции (σ) от расстояния поверхности пробы

Таблица 2

Результаты исследования различных сплавов

Металлы	Al	Fe	Au	Ag	Zn	Почва
τ_0, c	$1,41 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$
τ_1, c	$9,7 \times 10^{-7}$	$11,7 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-7}$	$5,5 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$
σ, cm^{-1} $L=12mm$	$1,1 \times 10^{-6}$	$6,12 \times 10^{-6}$	24×10^{-6}	35×10^{-6}	77×10^{-6}	200×10^{-6}

В пятой главе «Экспериментальные результаты по изучению морфологических и оптических свойств монодисперсных частиц» получены нами данные.

Входная (I_0) и выходная (I) интенсивности выражаются в следующих формулах:

$$I(t) = I_0 \exp(-[(1-R) + \sigma_e L](tc/L)) \quad (3),$$

где время задержки пустого резонатора τ_0 , время задержки заполненного резонатора с рассеивающей пробой τ_1 , R – коэффициент отражения зеркала, t_r – время полного пути лазерного импульса, L – длина поглощения или рассеяния среды, σ_e – коэффициент экстинкции среды, c – скорость света. Коэффициент экстинкции среды для измеренного времени затухания (пустой резонатор и резонатор с рассеивающей пробой) выражается при помощи следующих формул:

$$\sigma_e = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (4).$$

Рассеяние в каждом случае управляется с помощью отношения диаметра частицы d к длине волны λ излучения. Это отношение называется размером параметра α . Дана следующая формула:

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda} \quad (5),$$

Материалы внутри резонатора влияют на задержку времени.

$$I = I_0 \exp(-t/t_c) \quad (6),$$

где t_c – характеристическое время жизни лазерного импульса в оптическом резонаторе. Для сферических частиц σ принимает следующий вид:

$$\sigma = NQ_{\text{ext}} \frac{\pi}{4} d^2 \quad (7).$$

Впервые исследованы коэффициенты экстинкции и эффективности экстинкции различных аэрозолей соли металлов (NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃) и органические аэрозоли (краситель родамин 640). Образцы растворяли в деионизованной воде, в случае органических красителей были использованы водные/этанольные (1/1) растворы. Концентрации были приготовлены для растворов солей (20–200г/л) и для растворов красителей (1.0–5г/л). Полный путь (туда и обратно) лазерного импульса равен $2L/c=5,3$ нс. Длина волны лазерного излучения сканировалась в пределах длин волн 575–660нм, но все измерения проводили на длине волны 635нм. Было измерено время затухания заполненного резонатора с пробой рассеивающей τ_1 и пустого резонатора τ_0 и результаты представлены в таблице 3.

На рис. 10 показана зависимость коэффициента экстинкции σ органических аэрозолей от длины волны лазера при диаметре частицы 100нм, 150нм и 200нм.

Таблица 3

Результаты исследования органических красителей

Родамин 640	d, нм	τ_1 , с	τ_0 , с	c, см/с	N, см ⁻³	Q	α
$\lambda=615$ нм	$2,75 \times 10^{-5}$	$9,74 \times 10^{-7}$	$1,49 \times 10^{-6}$	3×10^{10}	2206	4,1112	1,40
$\lambda=635$ нм	$5,75 \times 10^{-5}$	$1,45 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	3×10^{10}	64,667	4,1012	2,84

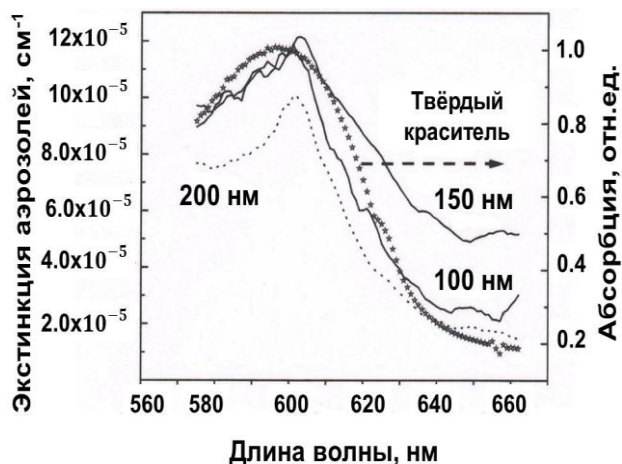


Рис. 10. Зависимость коэффициента экстинкции (σ) от длины волны (λ) лазера

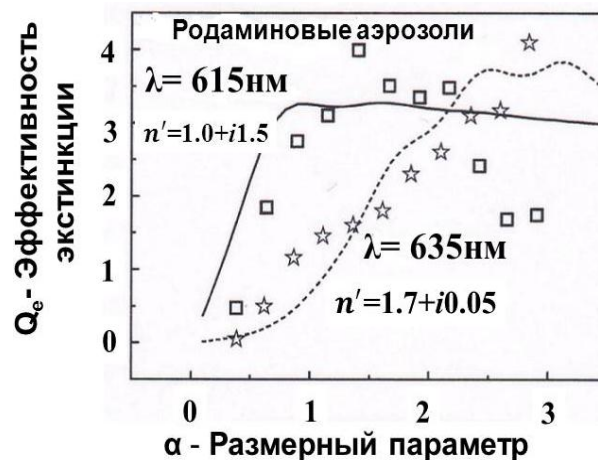


Рис. 11. Зависимость эффективности экстинкции (Q) от размерного параметра (α) аэрозоля

Результаты, приведенные на рис. 11., указывают, что величины фактора эффективности зависят от размерного параметра. Родаминовые аэрозоли поглощают излучения лазера на длине волны $\lambda=635\text{nm}$.

Здесь показатели преломления аэрозолей выражаются комплексным числом для поглощающих частиц $n=1.0+i1.5$ (сплошная линия) и слабо поглощающих частиц $n=1.7+i0.05$ (пунктирная линия). Линейная зависимость параметров для каждого отдельного аэрозоля показана в таблице 4. Q увеличивается более круто и достигает своей максимальной величины на более низких параметрах размера для более высоких показателей преломления. Максимальная величина эффективности экстинкции также увеличивается с показателями преломления.

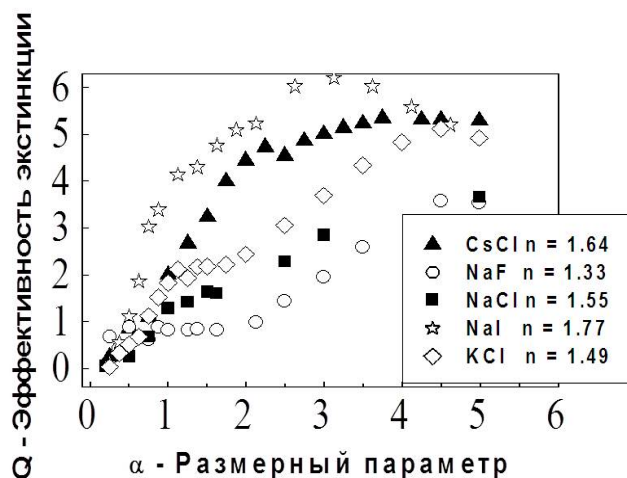


Рис. 12. Зависимость эффективности экстинкции (Q) от размерного параметра (α) аэрозоля

Результаты исследования для непоглощающих аэрозолей, таких как NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl представлены на рис. 12, где видно, что фактор экстинкции является функцией показателя преломления. Максимальное значение Q соответствует минимальному значению размерного параметра и результаты представлены в таблице 4. Эффективность экстинкции аэрозольной частицы возрастает с увеличением показателя преломления.

Таблица 4

Результаты исследования для не поглощающих аэрозолей
NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃

	NaF	KCl	NaCl	CsCl	AgNO ₃	NaI
d, nm	$9,0 \times 10^{-5}$	$9,0 \times 10^{-5}$	$10,0 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$6,3 \times 10^{-5}$
$\tau_1, \text{с}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$
$\tau_0, \text{с}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,47 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,53 \times 10^{-6}$
$N, \text{см}^{-3}$	246,333	96	32	284	223,333	541,333
Q	3,579	5,12	3,6664	5,347	2,756	6,199
α	4,49	4,49	4,984	3,74	1,99	3,12
n	1.34	1.49	1.54	1.64	1.75	1.77
$c, \text{см/с}$	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}

Впервые было исследовано влияние различных аэрозолей на характеристику времени затухания. Объектами исследования были ацетон, дым сигарет, этиловый спирт, пары воды и газовый разряд. Для проведения эксперимента была создана оптическая ячейка. Эффективное оптическое

взаимодействие с потоком проб $-0,8\text{см}$. Полный путь (туда и обратно) лазерного импульса равен $2L/c=4,313\text{нс}$. Экспериментально измеряли время задержки заполненного резонатора с пробой рассеивающей (τ_1) и время задержки пустого резонатора (τ_0).

Были экспериментально измерены коэффициенты экстинкции для всех аэрозолей, которые составляли: $2.06 \times 10^{-6}\text{см}^{-1}$ для атмосферного воздуха; $2.04 \times 10^{-6}\text{см}^{-1}$ для паров воды (H_2O); $2.03 \times 10^{-6}\text{см}^{-1}$ для спирта ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$); $2.37 \times 10^{-6}\text{см}^{-1}$ для ацетона (CH_3COCH_3) и для дыма сигарет $4.86 \times 10^{-5}\text{см}^{-1}$. Мы расположили полукатодную лампу La на угол Брюстера в двух зеркалах. Влияние на форму сигнала и время задержки исследовалось в полукатодной лампе La. Все измерения осуществлены на следующих параметрах лазера на красителях: $\lambda = 550.1\text{нм}$, $\nu = 1\text{кГц}$, $P = 0,100\text{Вт}$. Диаметр и длина оптического резонатора составляли $d = 2\text{см}$, $l = 61\text{см}$ соответственно. Все измерения осуществлены на следующих параметрах лазера на красителях: $\lambda = 524\text{нм}$, энергия лазера на красителях составляла от 10МкДж до 100мкДж в импульсе. Мы использовали лазер на кумарине 307 и растворитель этанол. Полный путь (туда и обратно) лазерного импульса равен $2L/c = 4\text{нс}$. Экспериментально измеряли время задержки заполненного резонатора с пробой рассеивающей (τ_1) и время задержки пустого резонатора (τ_0). Также мы использовали формулы (4) для расчёта экспериментальных результатов. Тогда $\tau_1 = 1/14326,7468 = 6,98 \cdot 10^{-5}\text{с}$, $\tau_0 = 1/13327,12461 = 7,5035 \cdot 10^{-5}\text{с}$, если поставим эти значения в формулу (4), получим коэффициент экстинкции для атмосферного воздуха $3,3 \cdot 10^{-6}\text{см}^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований физических механизмов проявления резонансных и нерезонансных процессов взаимодействия лазерного излучения с ультрамалыми концентрациями атомов и аэрозолей сделаны следующие выводы:

1. Разработан и создан внутрирезонаторный лазерный абсорбционный спектрометр для измерения экстинкции света частицами аэрозоля, который состоит из лазерной системы, системы блока подготовки и очистки газа и системы регистрации сигнала затухания.

2. Разработан новый метод детектирования атомов, молекул и аэрозолей, образующихся при лазерном испарении, который основан на измерении времени затухания пробного излучения при многократном прохождении в оптическом резонаторе с двумя высокоотражающими зеркалами.

3. Определены максимальные экстинкции при энергии лазерного импульса 250мДж , времени задержки 50мс и расстоянии 12мм между линзой и пробой для всех аэрозолей на основе зависимости закономерности расстояния между линзой и пробой (плотность энергии) и времени задержки.

4. Определены зависимости эффективности экстинкции ($Q_{\text{экс}}$) прозрачных аэрозолей солей металлов (NaCl , CsCl , NaI , NaF , KCl , AgNO_3) и аэрозоля органического красителя от размерного параметра (α) аэрозоля при

их импульсном лазерном возбуждении с длинами волн 630, 580÷660, 615 и 635 нм и показано, что зависимости хорошо согласуются с «теорией Ми».

5. Впервые обнаружены максимальные ионизационные сигналы для атомов In при переходе $5p^2P_{3/2} \rightarrow 6s^2S_{3/2} \rightarrow 8p^2P_{1/2}$ и для атомов Li, Na, Au, Ag, Pt при переходе $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ при использовании столкновительной схемы возбуждения и ионизации атомов In, Li, Au, Ag, Pt в атомизаторе «Графитовая печь».

6. Определены селекция легко испаряемых элементов по температуре атомизатора «стержень-пламя» и применение новых электротермических атомизаторов-ионизаторов, состоящих из графитовой трубки и платформы для устранения матричных эффектов.

7. Разработан универсальный лазерный фотоионизационный спектрометр для исследования локального распределения примесей щелочных металлов и кальция в алюминиевых сплавах.

8. Показано распределение примесей натрия по объему образца примерно одинаково, около $10^{-3}\%$, но распределение примесей кальция оказалось неравномерным.

9. Показано, что высоковозбужденные $np^3P_{0,1,2}$ – триплетные состояния атомов Hg, Cd, Zn и полученные расчетные результаты значения энергии (E_n) ридберговских состояний для $n \leq 50$ хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами на основе альтернативных методов.

10. Показано, что с увеличением энергии лазерного излучения селективный ионизационный сигнал от исследуемых атомов линейно растет до достижения порога насыщения резонансных переходов.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES
DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 AT PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE,
INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES,
SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

SAMARKAND STATE UNIVERSITY

KHALMANOV AKTAM TOSHKUVATOVICH

**HIGH-SENSITIVITY LASER SPECTROSCOPY OF ULTRA SMALL
CONCENTRATION OF ATOMS IN VARIOUS PHASE STATES OF
SUBSTANCE**

01.04.05 – Optics

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)
ON PHYSICAL-MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT– 2017

The theme of the doctoral dissertation was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2.DSc/FM50

The doctoral dissertation has been carried out at Samarkand State University.

The abstract of the dissertation was posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website (fti-kengash.uz) and on Information and educational portal “ZiyoNet” (www.ziynet.uz).

Scientific consultant: **Eshkobilov Napas Beknazarovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Official opponents: **Nematov Sherzod Kalandarovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Nizomov Negmat Nizomovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Azamatov Zakirjan Tokhirovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organisation: **National University of Uzbekistan**

Dissertation defense will take place “__” _____ 2017 at ____ at the meeting of Scientific Council number DSc.27.06.2017. FM/T.34.01 at the Physicotechnical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University. (Address: 2b Bodomzor Yuli str., 100084, Tashkent, Uzbekistan. The administrative building of the Physicotechnical Institute, conference hall. Phone/Fax: (99871) 235-42-41; e-mail: lulp@uzsci.net.

It is possible to review the dissertation in the Information resource centre of the Physicotechnical Institute (registered under № ____). Address: 2b Bodomzor Yuli str., 100084, Tashkent, Uzbekistan. Phone/Fax: (99871) 235-42-41.

Abstract of dissertation was sent out “__” _____ 2017.
(Registry № ____ on “__” _____ 2017).

S. L. Lutpullaev
Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D.F.-M.S., Professor

A. V. Karimov
Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D.F.-M.S., Professor

S. A. Bakhramov
Chairman of the Scientific Seminar under the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
D.F.-M.S., Professor

INTRODUCTION (abstract of DSc dissertation)

Topicality and relevance of the subject of dissertation. At present, in the world, development of new analytical methods of the determination of ultra-low concentration of elements in a variety of materials plays an important role in many areas of modern science and technology. This is due to the fact that there are a large number of solutions of problems, such as high-purity materials technology, geology and geochemistry, toxicology, environmental protection and others, which are necessary to monitor the content of certain elements in the material at the level of 10^{-8} - 10^{-11} %. In some cases, a sensitivity analysis can provide traditional analytical methods or their modifications.

The relevance of the theme of the dissertation is conditioned by the necessity of establishing general laws of morphological and optical properties of aerosol particles not having certain quantum states, as well developing methods of high-sensitivity laser spectroscopy, problems of detection of ultra small concentration of single atoms and aerosols, determination of effective identification of dynamics and types of physical processes with excited atoms and molecules.

Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the republic. The dissertation research has been carried out in accordance with the priority areas of science and technology in the country: II “Physics, astronomy, energy and mechanical engineering”.

A review of international researches on the topic of dissertation. Investigations of the nature of excitation processes and ionization of atoms by resonant laser spectroscopy and interaction of tunable laser radiation with aerosol particles inside the resonator are being studied in leading research centers, institutes and universities, including the Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS (Russia), the Institute of Spectroscopy of RAS (Russia), Moscow State University (MSU, Russia), Chalmers Technology University (Sweden), the University of Florida (USA), Technion-Israel Institute of Technology (Israel), Advanced Photonics Research Institute (APRI, South Korea).

The degree of study of the problem. In spite of a large number of studies conducted up to present days, problems of detection of single atoms, aerosols or similar complex molecules have remained unsolved. Photoionization and collisional excitation schemes of investigated atoms with high ionization potentials in different atomizers have been little studied.

Connection of the theme of dissertation with the scientific research works of the higher educational institution, where the dissertation was conducted. The dissertational research was carried out according to the approved plan of research works of Samarkand State University within the framework of State Research and Development Programs of the Republic of Uzbekistan.

The aim of research work is finding out the physical mechanisms of manifestation of resonans and nonresonans process of interaction of laser radiation with ultrasmall concentrations of atoms and aerosols of substances.

The tasks of the research are developing and creating the cavity ring-down laser absorption spectrometer and investigating the local distribution of atoms,

molecules and aerosols in various samples of alloys and model water solutions.

The objects of the research are aqueous standard solutions of aluminium alloys, crystals (NH_4F , NaF), semiconductor materials (GaAs , Si) and various aerosols of metal salts (NaCl , CsCl , NaI , NaF , KCl , AgNO_3), organic dyes (rhodamine dyes), alloys, soil and rocks.

The subject of the research are the resonant and nonresonant process of interactions of intensive pulsed laser radiations with atoms, molecules and aerosols of substances.

The methods of the research. Such methods were used in the dissertation as cavity ring-down laser absorption spectroscopy, laser resonant ionization and atomic ionization spectroscopy.

Scientific novelty of the research consists of the following results:

inverse dependence of regularities ($N \sim d^{-2}$) between the absolute concentration of the aerosol particles (N) formed from solid surfaces of metals, alloys and the soil under the influence of high-power pulsed infrared laser radiation ($\lambda=1064\text{nm}$, 250mJ) and size of aerosol particles (d) also direct dependence ($\sigma \sim L$) between the extinction coefficient (σ) and the distance (L) from solid surfaces to the laser radiation were detected;

inverse dependence of regularities ($Q \sim \alpha^{-2}$) between extinction efficiency (Q) and size parameters (α) of different transparent (NaCl , CsCl , NaI , NaF , KCl , AgNO_3) and organic dye of aerosol particles was found;

effective collisional excitation schemes by p and d state versus state s atoms were detected;

the physical mechanism of formation of the useful signals (selective ionization signal and cavity ring-down signal) were identified that allow registration of parameters of atomic and aerosols systems in the intensive pulsed laser field;

the way of improvement of the selectivity and sensitivity of the method of atomic ionization spectroscopy on the basis of the selection of the temperature atomizer “rod-flame” and the implementation of the new electrothermal atomizers ionizer consisting of the graphite tube and platform were determined;

cavity ring-down laser absorption spectrometer based on two volume nitrogen laser for measurement of light extinction by aerosol particles was developed.

Practical results of the research. For the first time, a universal laser photoionization spectrometer was proposed and experimentally used for investigation of the local distribution of alkali metal and calcium impurities in aluminium alloys.

The new methods of detection of aerosol by physical and chemical properties of aerosol plume from solid surfaces and aerosols of metal salts and organic aerosols were detected.

Reliability of the research results is confirmed by the use of modern methods and approaches of optics and laser spectroscopy for the study of ultra-low concentrations of atoms and aerosols. The theoretical calculations and experimental results proven by methods of additives, added-found; the useful signal recording method (electrical and optical), a method of correct accounting background and wavelength scanning method are completely consistent with the

results of other authors. All digital research data were processed with using modern computer technology.

Scientific and practical significance of the research results.

The scientific significance of the obtained results in scientific investigations allow to widen notion about the resonant and nonresonant process of interactions of intensive pulsed laser radiations with ultrasmall concentrations of atoms, molecules and aerosols of substances.

The practical significance of the research results is that the developed spectrometers and methods can be used for producing high purity solvents and high-purity semiconductor materials as well as in the fields of the geology and geochemistry for determining the content of various elements also for control and management of concentrations of aerosol by laser radiation.

Implementation of the research results. Based on the results of studying the mechanisms of formation of high-sensitivity laser spectroscopy of ultra small concentration of atoms and aerosols in various phase states of substance:

the experimental dates by investigation of the morphological parameters of aerosols were used in foreign journals (Journal of Analytical Atomic Spectrometry V.20., p. 53-59 (2005); Journal of Analytical Atomic Spectrometry V.29., p. 2267-2274 (2014); Chinese Science Bulletin Vol.58 № 20, p. 2440-2446 (2013); Anal. Bioanal. Chem. (2005) 383, p. 1090-1097) for determinations of the aerosol particles and the optical extinction of aerosols. Application of scientific results allowed determining the extinction coefficient of light and absolute concentration of the aerosol particles;

results by investigation of absorption and scattering of light with microparticles using cavity ring-down spectroscopy were used in foreign journals (Journal of Enviromental Sciences 26 (2014) p.2412-2422; Atmospheric Chemistry and Physics 7, p. 1523-1536, 2007; Laser Photonics Re. 5, №4, p. 534-552 (2011)) for studying the optical properties of aerosol particles, chemical structure, measuring the light extinction by scattering and absorption aerosol particles. Application of scientific results allowed determining extinction efficiency of the aerosol particles;

The obtained scientific results of the dissertation were used in the grant F-2-15 “Near-threshold laser ionization spectroscopy of atoms of heavy elements (Pt, Au, Hg, Tl, Pb)” for explaining the collisional mechanisms of ionization atoms in the system “graphite furnace” and also morphological and optical properties of aerosol particles (Reference FTK-03-13/656 of the Committee for Coordination of Science and Technology Development of the Republic of Uzbekistan of 6 October 2016). Application of two- stepwise collisional excitation scheme of atoms allowed to increase the sensitivity of determination of elements in the system “graphite furnace” more than 10 times as well as number of aerosol particles by 2 times by the method of laser ablation.

Testing of the research results. The results of the research were discussed at 16 international and republican scientific and practical conferences.

Publication of the results. The results obtained on the theme of the dissertation were presented in 38 scientific works, of these, 1 is a monograph and

17 are scientific articles. They were published in 9 foreign and 8 republican journals, 20 theses were published in the proceedings of international and national conferences.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of used references. The size of the dissertation is 206 pages, including 48 figures and 26 tables.

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
LIST OF PUBLISHED WORKS**

I бўлим (I часть, Part I)

1. Халманов Н., Халманов А. Пахтачиликда органик ўғитлар ва атроф муҳит муҳофазаси. – Самарқанд: Zarafshon, 2015, 136 бет.
2. Халманов А.Т., Эшкobilов Н.Б. Идентификация ультрамалых концентраций атомов в различных фазовых состояниях вещества // Узбекский физический журнал, Ташкент, 2014. – Т.16, № 2. – с. 100-105 (01.00.00; № 5).
3. Халманов А.Т. Исследование процессов возбуждения и ионизации атомов хрома методом резонансной лазерной спектроскопии // Узбекский физический журнал, Ташкент, 2011. – Т. 13, № 1. С. 33-41 (01.00.00; № 5).
4. Халманов А.Т. Исследование следов d(Cr,Fe,Mn) элементов в водных растворах методом лазерной атомно-ионизационной спектрометрии // Доклады Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2008, № 5. – с. 30-34 (01.00.00; № 7).
5. Халманов А.Т. Исследование и детектирование следов различных аэро-золей методом лазерной абсорбционной спектроскопии внутри резонаторного затухания // Доклады Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2007. – № 2. – с. 57-60 (01.00.00; №7).
6. Халманов А.Т. Внутри резонаторная спектроскопия следов различных аэрозолей // СамДУ Илмий тадқиқотлар ахборотномаси, Самарақанд, 2006. – Т. 39, № 5. – С. 43-46 (01.00.00; № 2).
7. Bulatov V. Khalmanov A., Yuheng Chen, Schechter I. Absorption and scattering characterization of airborne microparticulates by a cavity ringdown technique // Anal Boianal Chem, – Springer Verlag, Heidelberg, 2006. – Vol.384, – pp.155-160 (№40. ResearchGate; IF=2,16).
8. Халманов А.Т. Исследование лазерной аналитической спектроскопии благородных металлов (Au, Pt, Ag) методом резонансной лазерной ионизационной спектроскопии // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2005. – № 6. – с. 27-30 (01.00.00; №7).
9. Khalmanov A.T. Investigation of aerosol plumes from the solid surfaces by cavity ringdown laser absorption spectroscopy // Uzbek Journal of Physics, Tashkent, 2005. – Vol. 7, – № 5-6. – pp. 348-353 (01.00.00; № 5).
10. Khalmanov A.T., Do-Kyeong Ko, Jongmin Lee, Eshkobilov N., Tursunov A. Study of Traces of Au and Ag Atoms by Resonant Laser Stepwise Ionization Spectroscopy // Journal of the Korean Physical Society, Seoul, 2004. – Vol.44, № 4. – pp. 843-848 (№ 40. ResearchGate; IF=0,98).
11. Bulatov V. Khalmanov A., Schechter I. Study of the morphology of a laser-produced aerosol plume by CRLAS // Anal Boianal Chem, Springer Verlag, Heidelberg, 2003. – Vol. 375, pp. 1282-1287 (№ 40. ResearchGate; IF=1,44).

12. Khalmanov A.T., Khamraev Kh.S., Tursunov A.T. and Tuxhlibaev O. Study of Europium Traces by Laser Resonance Ionization Spectroscopy // Optics and Spectroscopy. Pleiades Publishing, New York, 2002. – Vol. 92, № 6. PP. 815-817 (№ 40. ResearchGate; IF=0,72).
13. Khalmanov A.T., Khamraev Kh.S., Tursunov A.T. and Tuxhlibaev O. Study of Traces of Elements on a Universal Laser Photoionization Spectrometer // Optics and Spectroscopy. Pleiades Publishing, New York, 2001. – Vol. 90, № 3. – PP. 344-347 (№ 40. ResearchGate; IF=0,72).
14. Khalmanov A.T., Khamraev Kh.S. Analytical laser photoionization spectroscopy of calcium and sodium on a general-purpose laser photoionization spectrometer // Measurement Techniques, 2001. – Vol. 44, № 7. – PP.753-757 (№ 3. Scopus; IF=0,32).
15. Khalmanov A.T., Khamraev Kh.S. A laser flame atomic ionization spectrometer // Measurement Techniques, 2001. – Vol. 44, № 4. – PP. 437-441 (№ 3. Scopus; IF=0,32).
16. Khalmanov A.T. Laser optogalvanic spectroscopy of an indium atom // Journal of Applied Spectroscopy, 2000. – Vol. 67, № 3. – PP. 550-553 (№ 3. Scopus; IF=0,411).
17. Khalmanov A.T. Determination of traces of elements in solutions by the method of flame atomic-ionization spectroscopy // Journal of Applied Spectroscopy, 2000. – Vol. 67, № 1. – PP. 9-13 (№ 3. Scopus; IF=0,411).
18. Халманов А.Т., Хамраев Х., Аюпов Р. Исследование двухступенчатого возбуждения атома индия в лампе с полым катодом методом лазерной оптогальванической спектроскопии. // Узбекский физический журнал. Ташкент, 1999. – Т. 1, № 6, с. 455-458 (01.00.00; № 5).

II бўлим (II часть, Part II)

19. Халманов А.Т., Эшкobilов Н.Б. Исследование механизмов ионизации атомов и молекул в высокочувствительной лазерной спектроскопии. «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари» / Материалы республиканской научно-практической конференции, Андижан, 4-5 декабря 2015, с. 367-369.
20. Khalmanov Aktam, Eshkabilov Napas. Physical methods for studying the objects of environment. 2nd International Conference on Arid Lands Studies. Innovations for sustainability and food security in arid and semiarid lands, Samarkand, Uzbekistan, September 2014. – PP.61.
21. Халманов А.Т., Ярманова Д. Внутррезонаторная лазерно-абсорбционная спектроскопия для исследования аэрозольных частиц / Республика илмий-амалий анжумани «Замонавий ишлаб чиқариш энергия таъминоти илмий муаммолари», Бухара. Узбекистан, ноябрь 2014. – С. 220-221.
22. Khalmanov A. Development and creation of the cavity ring-down spectrometer for measurements of light extinction and absorption by aerosol

particles / Proceedings of International Workshop, Almaty, Kazakhstan, March 17-19, 2014, pp. 141-148.

23. Халманов А., Эшкобилов Н., Хамраев Х., Холмонов Н., Суванов А. Использование лазерных методов для идентификаций ультрамалых концентраций атомов в различных фазовых состояниях вещества / V Международный научный семинар, НМТ-2013, Иссык-Куль, Кыргызстан, Сентябрь, 2013. – С. 88-93.

24. Халманов А.Т. Исследование различных состояний атомов методами высокочувствительной лазерной спектроскопии // ВЕСТНИК КазНУ,- Алматы, 2012. – Т. 67, № 3. – С. 65-69 (по Каз. базе цит.; IF=0,032).

25. Халманов А.Т., Хамраев Х.С., Тошкuvatова Н.А., Суванов А., Гозиев Т., Эшкобилов Н. Исследование и измерение оптической экстинкции атмосферного аэрозоля методом внутрирезонаторной спектроскопии / Материалы международной молодежной конференции «Экология России и сопредельных территорий», Кемерово, Россия, июнь 2012. – С. 58-62.

26. Khalmanov A.T., Eshkobilov N.B., Suvanov A. and Toshkuvatova N. Using an new powerful nitrogen laser with two active volumes as pumping dye lasers in universal laser photoionization spectrometer / International conference on analytical chemistry and applied spectroscopy, PITTCO, Orlando, USA, March 2012. – 1820-9p, – pp.80.

27. Халманов А.Т., Эшкобилов Н.Б. Высокочувствительная лазерная спектроскопия атомарных, газообразных и гетерогенных состояний многоэлектронных элементов и формирование полезных сигналов / Тезисы Республиканской конференции «Конференция, посвященная 80-летию акад. М.С.Саидова», Ташкент, 2010. – С. 430-431.

28. Халманов А.Т., Эшкобилов Н.Б. Определение новой эффективной схемы возбуждения s-, p-, d-элементов методом атомно-ионизационной спектрометрии в пламени / Республиканская конференция «Современные проблемы физики и физического образования», Самарканд, 2009, с. 81-82.

29. Bulatov V., Khalmanov A., Schechter I. Characterization of Airborne Micro-particulates by Cavity Ringdown Technique / Abstracts of Laser applications to Chemical Environmental Analysis, Maryland, USA, 2004. – PD2-1.

30. Khalmanov A.T. Analytical spectroscopy of Au and Ag atoms by resonant laser stepwise ionization spectroscopy / Abstracts of III International conference on Laser Induced Plasma Spectroscopy and Applications (LIBS 2004), Torremolinos, Malaga, Spain, 2004. – P. 99.

31. Khalmanov A.T., Ko D.K., Lee J. Studying the traces of Au and Ag atoms by resonant laser stepwise ionization spectroscopy / Bulletin of the Korean Physical Society. – Seoul, 2003. – p. 533.

32. Khalmanov A.T., Khamraev H. Optogalvanic Spectroscopy of In Atoms in Flame and in a Hollow Lamp / Technical digest of the international conference on LASERS 2001, Tucson, Arizona, USA, December 2001. – pp. 25.

33. Khalmanov A.T., Ishniyazova Sh. Determination and investigation of Pb, As, Hg, Sb in human hair by atomic-absorption and resonant laser stepwise

ionization spectroscopy / Technical digest of the international conference on LASERS 2001, Tucson, Arizona, USA, December 2001. – PP. 23.

34. Khalmanov A.T., Ishniyazova Sh. Determination and investigation of Pb, As, Hg, Sb in human hair by atomic-absorption and resonant laser stepwise ionization spectroscopy / Proceedings of the international conference on LASERS 2001. December 3-7 2001. Tucson, Arizona (USA), 2001. – PP. 400-405. ISSN: 0190-4132.

35. Khalmanov A.T., Khamraev H. Resonance Ionization Spectroscopy of Atoms by the Laser Evaporations of Samples / Abstracts of International conference on LASERS 2000, Albuquerque, New Mexico, USA, December 2000. – PP. 43.

36. Khalmanov A.T., Khamraev H. Optogalvanic Spectroscopy of Al, In, Ga atoms in the Hollow Lamp / Abstracts of X International Symposium on RIS and Its Applications, Tennessee, USA. 2000. – pp. 76.

37. Khalmanov A.T., Ajupov R.M., Tursunov A.T. Determination contents of Na, Cs, In, Pb elements by laser atom-ionization method / Abstracts of International congress on Analytical Chemistry, Moscow, Russia, 1997. V.2. – L 42.

38. Khalmanov A.T., Ayupov R.M., Tursunov A.T. Application of resonance photoionization Spectrometry for analysis of natural objects / Abstracts of VIII International Symposium on Resonance Ionization Spectroscopy and Its Applications, Pennsylvania, USA. 1996, – P. 171.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида таҳрирдан
ўтказилди (04.08.2017 йил).

Босишга рухсат этилди: _____ 2017 йил
Бичими 60x45 ¹/₈, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3,4. Адади: 100. Буюртма: № _____.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.