

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**МИРЗО УЛУҒБЕК НОМИДАГИ
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ**

ҚУРБОНОВ АБДУЛЛА КЕНЖАЕВИЧ

**ИМПУЛЬСЛИ-ДАВРИЙЛИ ЛАЗЕР НУРИ ТАЪСИРИДА МИКРО ВА
НАНО ЎЛЧАМЛИ КУКУНЛАРДА ИККИЛАМЧИ НУРЛАНИШ**

01.04.05 – Оптика

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

Тошкент – 2020

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

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

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

Қурбонов Абдулла Кенжаевич

Импульсли-даврийли лазер нури таъсирида микро ва нано ўлчамли
кукунларда иккиламчи нурланиш.....3

Қурбонов Абдулла Кенжаевич

Вторичное излучение в микро- и нанопорошках при импульсно-
периодическом лазерном возбуждении.....25

Kurbonov Abdulla Kenjaevich

Secondary radiation in micro- and nanopowders under pulsed-periodic laser
excitation.....47

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works.....51

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**МИРЗО УЛУҒБЕК НОМИДАГИ
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ**

ҚУРБОНОВ АБДУЛЛА КЕНЖАЕВИЧ

**ИМПУЛЬСЛИ-ДАВРИЙЛИ ЛАЗЕР НУРИ ТАЪСИРИДА МИКРО ВА
НАНО ЎЛЧАМЛИ КУКУНЛАРДА ИККИЛАМЧИ НУРЛАНИШ**

01.04.05 – Оптика

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

Тошкент – 2020

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.2.PhD/FM246 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университети ва Россия Фанлар академиясининг П.Н.Лебедев номидаги Физика институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.iplt.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталининг www.ziyounet.uz веб-саҳифаси манзилига жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Рахматуллаев Илёс Арзимуродович
физика-математика фанлари доктори

Расмий оппонентлар:

Нематов Шерзод Қаландарович
физика-математика фанлари доктори

Эшчанов Баходир Худайберганович
физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот:

Самарқанд давлат университети

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «15» 12 соат 16⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (7 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел: (+99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2020 йил «5» 12 да тарқатилди.

(2020 йил «5» 12 даги 7 рақамли реестр баённомаси).



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

И.Д.Ядгаров,
илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда жаҳонда саноатдаги талабларни, айниқса илғор технологик йўналишдаги: наноэлектроника, фотоника, компьютер технологиялари, лазер тизимлари талабларини қондириш учун долзарб ҳисобланган материалларни излашдаги тадқиқотлар энг муҳим саналади. Кейинги йилларда оптикада янги йўналиш фаол ривожланиб бормоқда: мазкур йўналиш микро ва нанотузилишли тизимлар, хусусан, уларнинг кукунларидан олинган объектларнинг оптик тадқиқоти билан бевосита боғлиқдир.

Ҳозирги кунда жаҳонда микро ва айниқса наноўлчамли кукунларга янги усуллар орқали уларни синтез қилиш ҳамда кенг амалиётда қўлланиши сабабли улкан қизиқиш уйғонди. Қизиқиш катта ўлчамдаги кристаллардан кукунларнинг электрофизик, оптик, механик ва бошқа хусусиятлари кескин фарқ қилиши билан боғлиқдир. Ушбу намуналарни муваффақиятли тадқиқот қилиш ва қўллаш учун мазкур тизимларнинг тузилиш хусусиятлари тўғрисида аниқ маълумотларга эга бўлиш лозим. Макро кристаллдан нанокристалл кўринишига ўтганда кристалл панжара тузилиши кескин ўзгариши мумкин. Заррачаларнинг ўлчамлари кичрайиб бориши билан уларнинг физикавий ва кимёвий хусусиятлари асосан юзага боғлиқ бўлган эффектлар орқали аниқланади ва макроскопик объектларнинг физик параметрларини белгиловчи ҳажмга боғлиқ бўлган эффектлар таъсири эса камаяди. Иккиламчи нурланиш (ИН) фотолюминесценция (ФЛ), ёруғликнинг комбинацион сочилиши (ЁКС) жараёнлари ва ҳар хил турдаги кўп фотонли эффектлар натижасида вужудга келади. ИНнинг мавжудлик вақти жараённинг турига ва материал муҳитнинг характеристикаларига боғлиқ. ИН лазер спектроскопиясининг улкан ютуқларига қарамасдан ҳозиргача лазер нур манбаини оптималлаштириш билан боғлиқ ҳамда уйғотувчи нурланишни ИН сигналига самарали айлантириш усулларини яхшилаш борасида муаммолар мавжуддир. Бу жумладан, уйғотувчи (лазер) нурланишнинг кукунларда кучли сочилиши билан боғлиқдир. Импульсли лазерларнинг етарли даражадаги интенсив нурланишларида моддаларнинг дастлабки характеристикалари кучли ўзгаради: муҳит кучли қизиб кетади ва балки моддаларда фотодеструкция юзага келади.

Республикада турли турдаги диэлектрик ва яримўтказгичли микро ва нанотузилмалар асосида оптик нурланишни қабул қилувчилар – оптоэлектрон курилмалар, ультрабинафша ва инфрақизил нурланишни кўриниш диапазонида трансформация этувчи асбобларни яратиш учун фундаментал тадқиқотларга улкан эътибор қаратилмоқда. Республикамиз фанининг ривожланиши ва унинг амалий қўлланиши учун улкан аҳамиятга эга бўлган мазкур фундаментал тадқиқотлар ва ишланмалар 2017 – 2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида белгилаб берилган.

Мазкур диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг «Муқобил энергия манбаларини янада ривожлантириш чора-тадбирлари

тўғрисида» 2013 йил 1 мартдаги ПФ-4512-сон, «Ўзбекистон Республикаси янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон Фармонлари, Ўзбекистон Республикаси Президентининг «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида» 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сон Қарорида ҳамда мазкур соҳада қабул қилинган бошқа норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифалар ижросини таъминлаш учун муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг «II. Энергетика, энерготехкорлик ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммони ўрганилганлик даражаси. Микро ва нанотузилмаларни таҳлил қилиш ва ўрганишлар соҳасидаги тадқиқотлар жаҳондаги кўп олимлар томонидан ўтказилган, масалан, россиялик олимлар (М.М. Михайлов, С.Н. Миков, В.С. Горелик, А.Л. Верещагин, П.А. Родный, А.А. Хомич, Н.Л. Векшин, Ю.П. Мешалкин), америкалик (W. Kaiser, V.A. Fonoberov, W. Shan, W. Walukiewicz, M. H. Huang, H. Feick, C.A Smith), украиналик (О.Г. Лысенко, В.П. Махний, Д.Д. Недеогло, А.В. Симашкевич), белоруслик (В.С. Бураков, Н.В. Тарасенко), хитойлик (С. Fan, Q. Zhang, H. Dong, B. Zhou, H.Y. Li), канадалик (A. Saxena, S. Yang), ҳиндистонлик (D. Sridevi, K.V Rajendran, A. Yadav, S.P. Nehra), польшалик (M. Skrobot, M. Godlewski, E.M. Shishonok), республикамиз олимлари (Э.М. Ибрагимова, С.С. Курбонов) ва бошқа мутахассислар.

Мазкур тадқиқотлар натижасида яримўтказгичли нанокристаллар (олмос, ZnSe, CdS, ZnO)да қатор қонуниятлар аниқланди: сиртдаги ва квант-ўлчамли эффектлар туфайли ушбу нанотузилмаларнинг кўп физик хоссалари (тузилмавий, магнит, оптик, иссиқлик) макро кристаллардан кескин фарқ қилади. Қатор ноорганик бирикмалари микро ва нанокристаллари (олмос, Al₂O₃, ZnS)нинг электрон ва тебранма спектрлари тадқиқот қилинган ва уларнинг иккиламчи нурланиш спектрларининг шаклланиш қонуниятлари аниқланган. ZnO юпқа пленкаларнинг электрик ва оптик хусиятлари комплексли ўрганилган. Синтез қилинган наноўлчамли ZnO ва ZnSe тузилмаларнинг структурали ва фазавий хусусиятлари тақдирот қилинган. Жумладан, ZnO нанокристалларида 390 ва 520 нм соҳадаги ФЛнинг максимумлари экситонлар ва нуқсонлар туфайли юзага келишлари кўрсатилган. Ўртача ўлчами 15 нм бўлган ZnSe нанозаррачалари ФЛ спектрида учта 480, 453 ва 520 нм максимумлар аниқланган бўлиб, улар монокристаллар ФЛ спектридан фарқ қилади. Ундан ташқари соҳада ZnSe намунасида ТО-фононлар туфайли вужудга келадиган 210 см⁻¹ соҳада ЁКС максимуми кузатилган. Юқори стехиометрик селеннинг аралашishi ва хлор аралашмаси натижасида, рух панжарасида бўш (вакант) нуқсонлар билан боғлиқ ZnSe да 590-610 нм (2,10-2,00 эВ) ФЛ чизиклари тажриба йўли билан

аниқланган. Детонацион наноолмослар (ДНО) олиш йўллари ва таҳлилига бағишланган кўп ишлар мавжуд. Ҳар хил турдаги биологик фаол препаратларнинг ФЛ ва ЁКС спектрлари хусусиятлари тўғрисида тажрибада натижалар олинган. Биофаол препаратларнинг микротузилиши, уларда мавжуд аралашмалар ва нуқсонлар бўйича муҳим маълумотлар олинган бўлиб, улар орқали таҳлил этиладиган препаратни микдорий жиҳатдан эталон препарат билан таққослаш имконияти мавжуд. Назарий жиҳатдан ва тажрибада ароматик ва биологик молекулалар билан лазер нурининг ўзаро таъсирлашувидаги икки босқичли жараёнлар тадқиқот қилинган. Илк бор бир қатор биологик-фаол моддаларнинг эритмалар (сув, этанол)да икки фотонли ютилиши (ИФЮ) кўндаланг кесим юзалари ўлчанган.

Аммо, микро ва нанокукунлар (МК ва НК)ни олиш ва оптик хусусиятларини ўрганиш бўйича кўп тадқиқот ишлари бўлишига қарамасдан, мазкур тузилмалар ИНнинг энергетик ва спектрал хусусиятларини тадқиқот қилишга бағишланган ишлар ҳам Ўзбекистонда ҳам жаҳонда деярли даражада кам. Масалан, кукунлар оптик хусусиятига заррачалар ўлчамларининг таъсирига бағишланган саволлар кам ўрганилган. Ҳозирги пайтгача фотонли тузоқларда жойлаштирилган МК ва НКлар ИН спектрларининг шаклланиш қонуниятлари ва хусусиятлари тўғрисида ўта кам маълумот мавжуд.

Шундай қилиб, мазкур муаммоларнинг долзарблиги ва етарлича даражада ўрганилмаганлиги муаллиф томонидан ҳар хил турдаги истиқболли материалларнинг МК ва НКлари ИНнинг оптик характеристикаларини ўрганиш йўналишини танлаш учун асос қилиб олинди.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетида ОТ-Ф2-67 «Импульсли лазер таъсирида кичик ва ультрадисперсли муҳитларда уйғотилган ночизикли опалесценция ҳодисасини ўрганиш» (2012–2016 йй.) ва А-3-113 «Озиқ-овқат маҳсулотлари ва фармацевтик препаратларининг сифатини экспресс-таҳлил этиш учун кичик ўлчамли кўчириб юрувчи спектрал қурилманинг макетини лойиҳалаш ва яратиш» (2015–2017 йй.) давлат илмий-техникавий лойиҳалари доирасида ўтказилган илмий-тадқиқот ишлар режасига мувофиқ бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади импульсли-даврийли лазер нури таъсирида ноорганик бирикмалар (олмос, рух селени, рух оксиди, иттрий оксиди) ва ароматик бирикмалар ҳамда биофаол препаратлар (аспирин, анальгин, цитрамон, парацетамол, 1,4-Ди-2-(5-фенилоксазол) бензол – РОРОР, 2,5-Дифенилоксазол – РРО, соя уни, тўйинган ёғли $C_nH_{2n}O_2$ кислоталар)нинг микро ва нанокукунларида юзага келадиган иккиламчи нурланиш спектрларининг шаклланиш қонуниятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

импульсли-даврийли лазер нури таъсирида яримўтказгичли ва диэлектрикли микро ва нанокукунларда иккиламчи нурланиш спектрларини ўрганиш учун янги турдаги минирезонаторли кюветалар (фотонли тузоқлар)

ва нуртолали-оптик техника асосида тажриба курилмани ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш;

фотонли тузоқларда олмос, РОРОР, РРО микрокукунларида «комбинацион опалесценция» эффектининг юзага келиш шароитларини аниқлаш ва ЁКС самарадорлигини ошириш;

иккиламчи нурланиш сигналларининг самарали кучайишига кукунлар дисперслиги таъсири шароитларини ўрганиш;

ZnO ва ZnSeФЛ экситон чизиқлари (ультрабинафша (УБ) чизиқ)) ва (кўк чизиқ) ҳамда узун тўлқин томонидан уларга бириккан чизиқларнинг дамлаш (накачка)га аномал боғлиқлик сабабларини аниқлаш;

кукунларнинг бир фотонли ва икки фотонли люминесценция спектрларини қиёсий таҳлил қилиш;

микрокукунли соя унида ИФЛнинг спектрал ва энергетик характеристикаларини тажрибада ўрганиш;

тўйинган ёғли $C_nH_{2n}O_2$ кислоталарнинг суюқ ва қаттиқ кўринишли намуналарида ЁКС спектрларини шаклланишини ўрганиш ва уларни назарий жиҳатдан тушунтириб бериш.

Тадқиқот объекти сифатида қатор ноорганик моддалар (олмос, рух селени, рух оксиди, итрий оксиди) ва ароматик бирикмалар ҳамда биофаол препаратлар (аспирин, анальгин, цитрамон, парацетамол, РОРОР, РРО, соя уни, тўйинган ёғли $C_nH_{2n}O_2$ кислоталар)нинг микро ва нанокукунлари олинган.

Тадқиқот предмети импульсли-даврийли лазер нури таъсирида қатор ноорганик ва органик бирикмалар микро ва нанокукунларида иккиламчи нурланиш спектрларини шаклланиш қонуниятлари ва физик механизмлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертация ишини бажариш жараёнида элемент таркибини рентген-флуоресцент таҳлили, электрон микроскопия, иккиламчи нурланиш лазер спектроскопияси усулларидадан фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилigi қуйидагилардан иборат:

янги турдаги минирезонаторли кюветалар (фотонли тузоқлар), нуртолали-оптик техника ва импульсли-даврийли лазерлар асосида яримўтказгичлар ва диэлектрикларнинг микро ва нанокукунларида иккиламчи нурланиш спектрларини қайд этувчи оригинал усул ишлаб чиқилган;

илк бор фотонли тузоқларда олмос, РОРОР, РРО микрокукунларида «комбинацион опалесценция» эффектининг юзага келиш шароитлари аниқланган. Резонаторли кюветаларнинг чиқиш қисмида ЁКС интенсивлиги уйғотувчи нурланиш интенсивлигига нисбатан кескин кучайиши аниқланган;

ZnO кукун заррачалари ўлчамларининг микроўлчамдан наноўлчамга кичрайиб бориши билан УБ чизиқ максимуми кичик тўлқин узунлик томон силжиши кўрсатиб берилган. Биринчи марта олмос микрокристалларининг ФЛ спектрларининг тузилиши уларнинг ўлчамларига боғлиқ эмаслиги аниқланган;

уйғотувчи нурланиш қуввати зичлигининг тақрибий 10^6 Вт/см² кийматларида ZnO ва ZnSe микрокукунларда экситон ФЛ учун спонтан люминесценциядан мажбурийга ўтиш, яъни суперлюминесценция ҳолати кузатилган;

ароматик моддаларнинг микрокукунларида спектрнинг УБ соҳасида биринчи уйғотилган электрон синглет термига тўғри келувчи сатҳда суперлюминесценция эффекти кузатилган;

илк бор генетик модификацияланган соя уни микрокукунларида ИФЛнинг энергетик характеристикалари ўрганилган;

тўйинган ёғли $C_nH_{2n}O_2$ кислотларнинг суюқ кўринишли намуналарида ёруғликнинг комбинацион сочилиш спектрларида бўйлама акустик тебранишлар (LAM) туфайли вужудга келадиган интенсив ва етарлича тор полосалар кузатилган ва ушбу моддалар частоталари молекула узунлигига боғлиқ равишда монотон тарзда ўзгариши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари куйидагилардан иборат:

микро ва нанокукунлар ва тузилмаларда резонаторли кюветалар (фотонли тузоқлар)ни қўллаш асосида ЁКС ва ФЛ спектрларининг интенсивлигини ошириш ҳисобига иккиламчи нурланишнинг суст сигналларини ишончли қайд этувчи оригинал усул ишлаб чиқилган;

илк бор ЁКС спектрини автоматик калибровка қилувчи, фон порлаши таъсирини камайтирувчи ва ўлчаш аниқлигини оширувчи қурилма яратилган (у кукун кўринишидаги намуналарнинг суст ЁКС спектрларини қайд этиш имкониятини беради – қайд этиш чегараси $\sim 10^{-10}$ г);

кукунсимон моддаларни бузмасдан лазерли тадқиқот этишда резонаторли кюветаларнинг роли кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий асбоблар ва қурилмалар, тадқиқот усулларини қўллаш ҳамда тажриба маълумотлари билан ишлаш ва уларнинг яхши такрорланувчанлиги, ҳамда бошқа муаллифлар томонидан олинган натижаларга мос келганлиги билан асосланган. Диссертацияда тузилган қоидалар ва хулосалар назарий ва тажрибавий жихатидан асосланган бўлиб, кукунлардаги ИН табиати тўғрисидаги тушунчаларга зид эмаслиги умумий илмий тушунчаларга мос келган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти импульсли-даврийли лазерлар нури таъсирида МК ва НКда ИН спектрлари вужудга келишининг физик механизмларини тушунтириб бериш ҳисобланади.

Мазкур ишда олинган натижалар физика фанини, жумладан, диэлектрик ва яримўтказгичли материаллар ҳамда улар асосидаги гетероген тизимларда заррачалар ўлчамларига боғлиқ равишда ИН спектрларининг шаклланиш механизм хусусиятлари ва эволюцияси тўғрисидаги мавжуд тушунчалар ривожланишига маълум бир даражада ҳисса қўшади. Тадқиқот натижалари ҳар хил дисперсли МК ва НКлар асосли диэлектрик ва яримўтказгичли материаллар тузилиши ва хоссаларини йўналтирилган тартибда бошқариш имкониятини беради. Бу эса амалиётда саноат учун жуда муҳим бўлиб,

олдиндан маълум комплекс физик хоссаларга эга бўлган ҳар хил тузилмаларни олиш имкониятини беради. ИН лазер спектроскопияси усуллари яқин келажакда янги микро ва наноўлчамли тузилмаларни тадқиқот қилишда қўлланишлари мумкин: ушбу тузилмалар амалий муҳим объектлар (фармацевтик препаратлар, биологик объектлар, замонавий микро ва нанотехнологиялар ҳамда гетероген тузилмалар)ни таҳлил этишда муносиб амалий тадқиқини топишлари мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Импульсли-даврийли лазер нури таъсирида микро ва нанокукунларда иккиламчи нурланишни ўрганиш натижалари асосида:

кичик ўлчамли портатив спектрометр яратилган бўлиб, унга Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигидан фойдали модел патенти (“Кўп каналли спектрометр”, №FAP 01158, 11.11.2016 й.) олинган. Яратилган спектрометр автоматик режимида ишлаб, фон порлаши таъсирини камайтириш, ўлчаш аниқлигини ошириш ва кукунсимон намуналарнинг суст ЁКС спектрларини $\sim 10^{-10}$ г қадар қайд этиш имконини берди;

ZnO микро ва нанокукунларини бир ва икки фотонли уйғотилган ФЛ спектрлари қонуниятларини ўрганишдан олинган илмий натижалар Ф2-ФА-Ф147 – сонли «Фотосинтезнинг бирламчи жараёнларида куёш энергиясини юқори самарали ўзлаштирилишининг физикавий механизмларини ўрганиш» фундаментал лойиҳасида рух оксиди (ZnO) микро ва нано ўлчамли кунларининг иккиламчи нурланиш фотолюминесценция спектрларини қайд қилишда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2019 йил 18 июлдаги 2/1255-1992-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш ZnO кристаллининг нуқсонлари ва абсорбцион-флуоресцент спектроскопик хоссаларининг муҳим параметрларини аниқлаш имконини берди.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 10 та халқаро ва 2 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация материаллари бўйича 23 та илмий иш, шу жумладан 6 та илмий мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия этилган журналларда, шуларнинг 4 таси чет эл журналларида чоп этилган ва 1 та фойдали моделга патент олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 47 та расм ва 5 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 156 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация иши мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари аниқланган, тадқиқотнинг Республика фан ва технологиялари ривожланишининг асосий устувор йўналишларига мослиги,

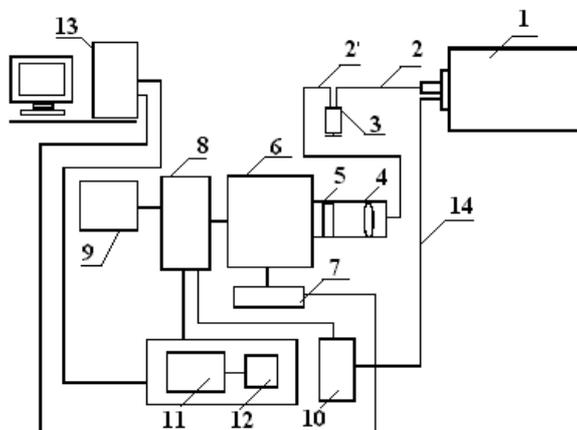
илмий янгилиги кўрсатилган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, улардан амалда фойдаланилганлиги, чоп этилганлиги ва апробацияси ҳамда диссертациянинг тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Микро ва нанотузилмалар ва кукунларнинг оптик хусусиятларини ўрганишдаги муаммолар ва тенденциялар ҳолати**» деб номланган биринчи бобида нанокукунлар ва наноматериалларни олиш бўйича адабиётлар маълумотлари таҳлили келтирилган. Наноматериалларни диагностика усуллари бағишланган ишларнинг қисқача шарҳи келтирилган ва муҳим ноорганик (олмос, ZnO, ZnSe, Y₂O₃) ва ароматик фармацевтик препаратлар микро ва нанокукунларини лазер таъсирида уйғотилган иккиламчи нурланиш тадқиқотлари соҳасидаги тажриба ишлари таҳлил қилинган.

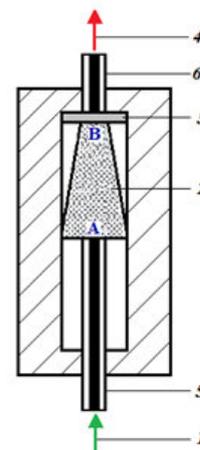
Мавжуд назарий ва амалий маълумотларни таҳлил қилиш асосида микро- ва нанотузилмалар ва нанокукунларнинг иккиламчи нурланишини тадқиқот қилишдаги асосий муаммолар кўрсатилган. Ечилмаган муаммолар аниқланган бўлиб, улар асосида ушбу диссертация ишининг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг «**Тажриба қурилмаси ва ўлчаш усуллари**» деб номланган иккинчи бобида импульсли-даврийли лазер нури таъсирида кукунларда ИНни тажриба тадқиқот усули ҳамда моддаларда иккиламчи нурланишнинг суст сигналларини «кучайтириш» учун резонаторли кюветалар ва стробоскопик қайд этиш тизимлари ҳамда импульсли-даврийли лазерлар нурлари таъсири қўллашга асосланган уйғотиш ва қайд қилиш усуллари хусусиятлари баён этилган. Қўлланилган қайд этувчи тизимнинг ишлаш принципи муҳокама қилинган. Тизимда фотонларни санаш усулини қўллаш билан бирга строблашдан фойдаланилган. Кукунларда ИНни ўрганиш учун «ўтказувчи» ва «қайтарувчи» схемали (1-расм) қурилмалар ишлаб чиқилди: *1 – мис буғларидаги лазер, 2,2' – кварцли световодлар, 3 – кукунли минирезонаторли кювета, 4 – йиғувчи линза, 5 – ёруғлик фильтри, 6 – монохроматор, 7 – монохроматорни бошқариш блоки, 8 – фотоэлектрон кучайтиргич (ФЭК), 9 – ФЭК қувват манбаи блоки, 10 – стробшакллантирувчи, 11 – кучайтиргич, 12 – кечиктириш линияси, 13 – компьютер, 14 – оптик тола.* Лазер генерацияси ($\lambda=510,6$ ёки $578,2$ нм) қисқа импульслар (20 нс) кўринишида 16 кГц частотали такрорланиш тарзида чиқарилган. Ёруғлик фильтри ёрдамида ўртача қуввати 5 Вт бўлган фақат битта генерация чизиғини (масалан, яшил чизиқ $\lambda=510,6$ нм) ажратиб олиш мумкин. Кукунларда ИН сигналларини кучайтириш учун махсус минирезонаторли кюветалар – фотонли тузоқлар (кюветалар капилляр диаметри 1,5–3 мм ва узунлиги 20–50 мм) ишлаб чиқилган бўлиб, уларда нур кўп марта қайтади ва сочилади. ИН сигналларини кучайтиришда энг мақбул вариант сифатида конуссимон бўшлиқ шаклидаги кюветалар (2-расм) топилди (*1- уйғотувчи нур; 2 – ўрганиладиган модда (кукун); 3 – ютувчи фильтр; 4 – иккиламчи нурланиш; 5 – кирувчи световод; 6 – чиқувчи*

световод). Ушбу кюветаларнинг ички қисми ҳам уйғотувчи нур ҳам иккиламчи нур учун юқори қайтариш коэффициентига эга бўлиб, кюветанинг кирувчи ва чиқувчи тирқишлари унинг чизиқли ўлчамидан жуда кичикдир. Нурни қайтарувчи вазифасини кюветанинг ичига жойлаштирилган дисперсли муҳит заррачалари ҳам хизмат қилади.



1-расм. Кукунларда ИНИни ўрганиш учун тажриба қурилма схемаси («қайтарувчи» схема)



2-расм. Конуссимон резонаторли минирезонаторли кювета тузилиши («ўтказувчи» схема)

Мисол тарзида минирезонаторли кюветада ЁКС сигналини кучайиш жараёнини кўриб чиқамиз. Бир жинсли муҳитда ИН спектрида ЁКС интенсивлигининг $I_{\text{ЁКС}}$ тушаётган нурга $I_{\text{уй}}$ нисбатини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин

$$\frac{I_{\text{ЁКС}}}{I_{\text{уй}}} = \sigma N L \delta \Omega, \quad (1)$$

бу ерда σ – ЁКС самарали кесими ($\sigma \approx 10^{-28}$ см²). N – заррачалар концентрацияси, L – намунада уйғотувчи нур фотонининг ўтган йўли, Ω – ўрганилаётган нурланиш бурчаги. Узунлиги ~ 1 см га эга бўлган оддий кюветаларда кукунларни тадқиқот этишда $\delta \Omega = 1$ ср бурчакда ИН спектрида ЁКС интенсивлигининг $I_{\text{ЁКС}}$ тушаётган нурга $I_{\text{уй}}$ нисбати қуйидагига тенг:

$$\frac{I_{\text{ЁКС}}}{I_{\text{уй}}} \approx 10^{-6}. \quad (2)$$

Агар ички қисми уйғотувчи ва иккиламчи нурлар учун юқори қайтариш коэффициентига эга бўлган ва кюветаларнинг кирувчи ҳамда чиқувчи тирқишлари ўлчами ёпиқ кюветаларнинг чизиқли ўлчамларидан деярли тарзда кичик бўлса ҳамда улар бир жинсли молекуляр модда билан тўлдирилса, уйғотувчи ва иккиламчи нурларнинг кўп марта кюветанинг ички қисмидан тўла қайтишлари туфайли, кюветаларнинг чиқувчи тирқишида ўта юқори интенсивликка эга бўлган иккиламчи нурланишни олиш мумкин. Масалан, кювета ичида уйғотувчи нурни $t = 100$ нс вақтгача ушлашга

эришилса, $l=ct$ формулага асосан уйғотувчи нурнинг самарали босиб ўтган йўл узунлиги $l=30$ м ни ташкил этади. Шундай қилиб, $l_0=3 \cdot 10^{-3}$ м узунликдаги кюветада иккиламчи нурланишни ошиши $l/l_0=10^4$ баробарни ташкил этади. Мос равишда контраст кучаяди, яъни $I_{\text{ин}}/I_{\text{уй}} > 10^4$ ($I_{\text{уй}}$ – кюветанинг чиқишида бирламчи (уйғотувчи) нур интенсивлиги). Уйғотувчи нурнинг кювета ичида бўлиш вақтини узайтириш учун кюветанинг чиқиш тирқиши ўлчамини кичрайтириш ва унинг ички деворлари нурни юқори қайтариш коэффициентига эга бўлиши лозим.

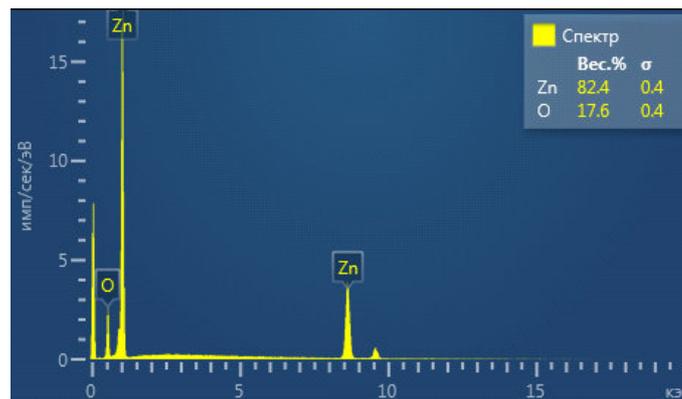
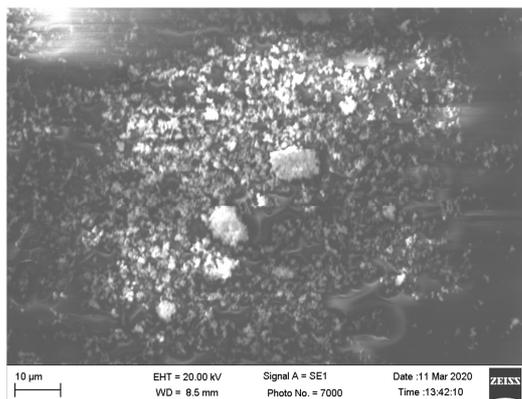
Диссертациянинг «**Ноорганик кукунларнинг морфологик, тузилмавий ва оптик хусусиятлари**» деб номланган учинчи бобида олмос, рух селени ва оксиди микро ва нанокукунларида ИНнинг спектрал ва энергетик характеристикаларини ўрганиш тўғрисида тажриба маълумотлари, рух ва итрий оксидлари морфологияси ва элемент таҳлил натижалари келтирилган. ZnO ва ZnSe микрокукунларининг ФЛ интенсивлигининг дамлаш (накачка) даражасига боғлиқлик графиклари намойиш этилган ва таҳлил қилинган. Олмос микрокукунларининг ЁКС интенсивлигининг дамлаш даражасига боғлиқлик қонуниятлари ўрганилган. Y_2O_3 микрокукунларида ФЛ спектрлари вужудга келишининг хусусий нуқтавий нуқсонлар билан боғлиқлик механизмлари тадқиқот қилинган. Фотонли тузоқлар ичида олмос МКда рўй берадиган комбинацион опалесценция эффекти ўрганилган. Мазкур намуналарда илк бор аниқланган эффектлар таҳлил қилиниб, улар сифат ва тақрибий миқдорий жиҳатдан тушунтирилган.

ZnO кукунларининг сканерли электрон микроскоп (СЭМ)даги тасвирдан (3,а-расм) намуналар кўндаланг ўлчамлари 8 мкм гача бўлган нотўғри шаклдаги агломерат кўринишидаги ковакларга эга бўшашган йиғилмалардан иборатлиги кўриниб турибди. Асосий фракция — 0,7–1 мкм. Агломератлар унча кучли бўлмаган механик таъсирда осон бузилади. Элемент таҳлил кўрсатишича (3,б-расм) ўрганилган кукунлар таркибида бегона киришмалар мавжуд эмас.

4-расмда турли интенсивликда олинган ($\lambda_{\text{уй}}=255,3$ нм) ZnO микрокукунлар ФЛ спектрлари келтирилган. Уйғотувчи нурланишнинг кичик интенсивлигида ФЛ спектри 386 нм максимумга эга бўлади (1 ва 2 чизиқлар). $15 \cdot 10^6$ Вт/см² дан юқори интенсивликларда эса (3-5 чизиқлар) дамлаш интенсивлигининг ошиши билан ФЛ интенсивлиги ночизиқли равишда кўпайиб боради (5-расм) ва экситон ФЛ спектри торайиши кузатилади. Бундан ташқари ФЛ полосасининг торайиши яққол кўрина бошлайди ва спектр интенсивлигининг максимуми узун тўлқин соҳа йўналишида 4 нм гача силжийди.

Уйғотувчи нурланиш интенсивлигининг $24 \cdot 10^6$ Вт/см² (эгри чизиқ 6) қийматида ФЛ интенсивлиги тўйинишга эришади. ФЛ интенсивлигининг дамлаш интенсивлигидан бундай боғлиқлиги ZnO микрокукунларидаги УБ нурланишида спонтан режимдан мажбурий нурланиш режими кўринишига ўтишдан далолат беради. Аммо спектрда етарлича даражада торайиш кузатилмаётганлиги бизнинг тажрибада мажбурий ФЛ учун фақат чегаравий

эффектлар вужудга келаётганликдан далолат беради.



а)

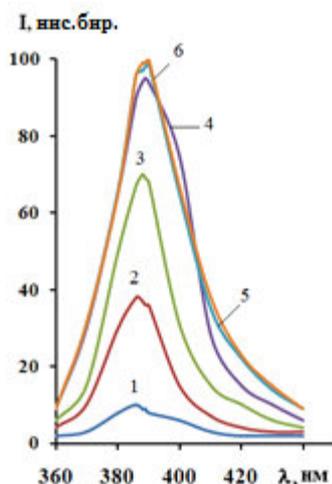
б)

3-расм. (а) ZnO микрокукунларининг СЭМ-тасвири ва (б) уларнинг элемент таркиби

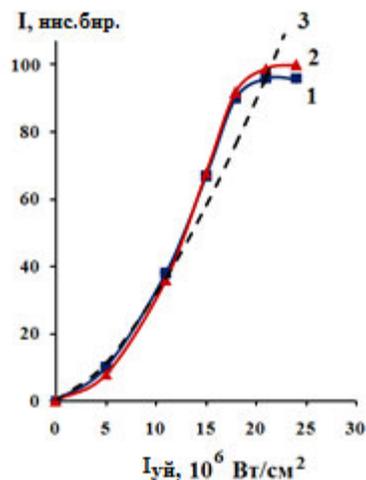
ФЛ интенсивлиги (I) таҳлили учун қуйидаги ифодадан фойдаланилди

$$I = \eta \cdot I_{uy}^{\alpha} \quad (3)$$

бу ерда I_{uy} – уйғотувчи нурланиш интенсивлиги, η – квант чиқиши, α – нурланиш рекомбинация механизмини характерлайди.



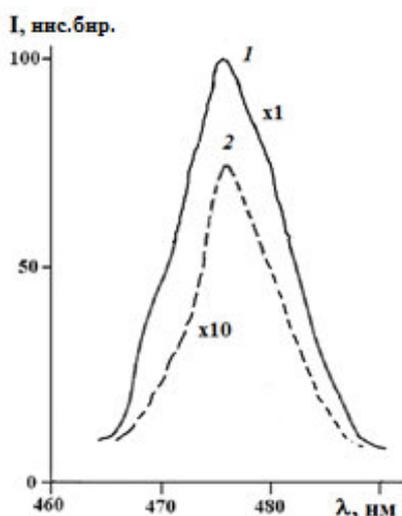
4-расм. Уйғотувчи нурланишнинг турли интенсивлигида (I_{uy}) ZnO МК ($d_{\text{ўр}}=0,8$ мкм)нинг ФЛ спектрлари олинган: (1) чизик $I_{uy}=5$ мос келади; (2) - $I_{uy}=11$; (3) - $I_{uy}=15$; (4) - $I_{uy}=18$; (5) - $I_{uy}=21$; (6) - $I_{uy}=24$ ($I_{uy}-10^6$ Вт/см²)



5-расм. (I) ZnO МК ($d_{\text{ўр}}=0,8$ мкм) ФЛинтенсивлигининг уйғотувчи нурланиш интенсивлиги (I_{uy})га боғлиқлиги. (1) чизик $\lambda=386$ нм тўлқин узунлигига мос келади; (2) - $\lambda=390$ нм; (3) - $I \approx I_{uy}^{1.5}$ қонунга мос назарий боғлиқлик.

Экситон рекомбинация учун $1 < \alpha < 2$, фундаментал нурланиш учун $\alpha \approx 2$ ва аралашмали сатҳлардан ўтишлар учун $\alpha < 1$. Ҳақиқатдан ҳам бизнинг тажриба шароитида ($I_{\text{возб}} \sim 10^6$ Вт/см²) ZnO МК учун (4 ва 5-расмларга қаранг) $\alpha \approx 1,5$ даражали боғлиқлик кузатилади (5-расм), бу эса ZnO монокристаллдаги $\alpha = 1,5 \pm 0,2$ қийматга тўғри келади. Уйғотувчи нурланишнинг юқори интенсивликларида ФЛ интенсивлигининг секинлашуви рўй беради

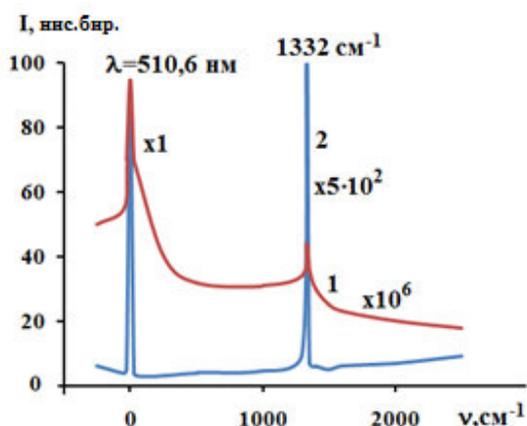
(5-расмдаги 1 ва 2 чизикларга қаранг): бу ҳол ҳам иссиқлик таъсири ҳам фотолиз ва термодеструкцияси туфайли нуқсонларнинг генерацияси орқали содир бўлиши мумкин. Ўхшаш қонуният бошқа тадқиқотчиларнинг ZnO монокристалларни квант нуқталар (КН)ни тадқиқот қилишларида кузатишган. 386-390 нм соҳадаги максимум А-экситонларнинг кўп фононли аннигиляциясидаги 3L0 чизик ҳолатига мос келади. Аммо, бизнинг тажриба тадқиқотларимизда намуналарда ФЛ спектрнинг кўриш диапазонида кузатилмади. Кўпинча тажриба тадқиқотларида 450-550 нм диапазон оралиғида яшил ФЛ максимуми кузатилади ва ушбу максимум табиатини кислород вакансияларининг мавжудлиги билан боғлашади, лекин бошқа аралашмалар ҳам ушбу максимумнинг вужудга келишига сабабчи бўлишлари мумкин. Бизнинг намуналарда кўриш диапазонида ФЛ йўқлиги кислород нуқсонларининг ўта камлиги ёки умуман йўқлиги ва ўрганилган ZnO микрокукунларнинг элемент таҳлил натижаларига кўра (3,б-расмга қаранг) намуналарнинг тозалигидан далолат беради.



6-расм. Алюмоитрий гранат лазерининг 4-гармоникаси ($\lambda_{\text{үй}}=266$ нм) таъсирида олинган ZnSe НК (1) ва МК (2) ($d_{\text{ўр}}=2$ мкм) ФЛ спектрлари

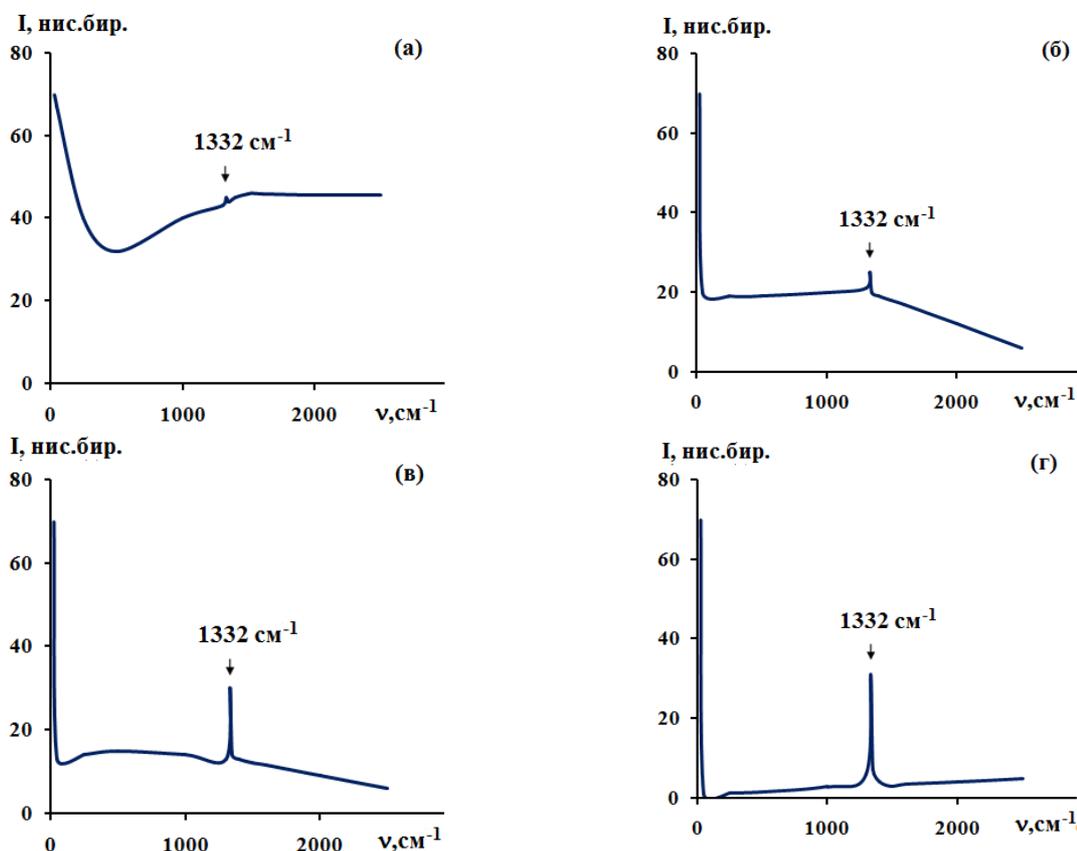
6-расмда алюмоитрий гранат лазерининг 4-гармоникаси ($\lambda_{\text{үй}}=266$ нм) таъсирида олинган ZnSe НК (1) ва МК (2) ($d_{\text{ўр}}=2$ мкм) ФЛ спектрлари келтирилган. Спектрлар хона ҳароратида олинган. Бу спектрлар шакллари бўйича бир-биридан фарқ қилмайди, аммо НК интенсивлиги ZnSe МК интенсивлигидан 14 марта юқори. Минирезонаторли кювета-нинг чиқиш қисмида лазер (уйғотувчи) нурланиш интенсивлиги ФЛ интенсивлигига нисбатан оддий тизимдаги ИНни уйғотиш билан таққосланса, анча камайган қийматга эга бўлади. Ишда олинган ZnSe

микро ва нанокукунларининг ФЛ спектридаги максимум ($\lambda_{\text{мак}}=476$ нм) А-экситонларнинг кўпфононли аннигиляциясидаги 3L0 чизик ҳолатига мос келади (A^{3L0}). 7-расмда турли конструкцияли кюветаларда бир хил тажриба шароитларида олинган олмос МК ЁКС спектрлари келтирилган. 1-чизик нисбатан катта ҳажмга эга бўлган кюветага (кювета диаметри - 18 мм), 2-чизик эса капилляр диаметри 3 мм бўлган резонаторли кюветага тегишлидир. Монохроматор кириш тирқиши олдида мис буғларидаги лазернинг уйғотувчи нурланиш чизиғи ($\lambda_{\text{үй}}=510,6$ нм) интенсивлигини камайтириш учун OG-1 ёруғлик фильтри ўрнатилган бўлиб, филтёр лазер нури 100 марта камайтиради ва уйғотувчи лазер нуридан 800 см^{-1} масофада жойлашган ЁКС сигналининг тўлиқ ўтказилади. Расмдан кўришиб турибдики, резонаторли кюветада ЁКС сигнали цилиндрик кюветага нисбатан тахминан 1000 марта юқори.



7-расм. Цилиндрик (1) ва резонаторли кювета (2) ларда олинган олмос МК ($d_{\text{ўр}}=10$ мкм) ЁКС спектрлари ($I_{\text{уй}}\sim 10^5$ Вт/см²)

510,6 нм таъсирида олмос МК ФЛ спектри фонининг ошиши азот вакансия нуқсонлари сабабли юзага келадиган кучли люминесценциядир: кўриш диапазони соҳасида мавжуд лазер нурланишини (510,6 нм) қўллаш, $\sim 10^6-10^8$ Вт/см² интенсивликларда олмосларда етарлича интенсив ИФЛ вужудга келишга олиб келади. Шу сабабли ИФЛ фонини камайтириш ва ЁКС сигнали интенсивлигини эса ошириш мақсадида олмос МК тадқиқот қилишда $I_{\text{уй}}\sim 10^5$ Вт/см² интенсивлик қўлланилди.



8-расм. Мис буғларидаги лазернинг яшил нури ($\lambda_{\text{уй}}=510,6$ нм) таъсирида олмоснинг турли ўлчамдаги ЁКС спектрлари: (а) - $d_{\text{ўр}}=4$ нм (KBg матричасида 1 мас.% концентрацияли); (б) - $d_{\text{ўр}}=0,5$ мкм; (в) - $d_{\text{ўр}}=1$ мкм; (г) - $d_{\text{ўр}}=50$ мкм ($I_{\text{уй}}\sim 10^6$ Вт/см²)

Ҳар хил ўлчамдаги олмос МК ва НКнинг мис буғларидаги лазернинг яшил нури ($\lambda_{\text{уй}}=510,6$ нм) таъсирида уйғотилган ЁКС спектрлари 8-расмда келтирилган. Барча намуналарда олмос панжарасининг фундаментал тебраниши билан боғлиқ $\nu=1332$ см⁻¹ чизиқ мавжуд. Ушбу частотали тор чизиқнинг қайд қилиш в тадқиқот қилинаётган намуналарда олмоснинг кристалл фаза мавжудлигидан далолат беради. Аммо, барча спектрларда

ИФЛ билан боғлиқ бўлган люминесценция фони мавжуд. МКнинг ўлчами 50 мкмга борганда яхлит фон кескин камаяди ва 1332 см^{-1} фундаментал моладаги ЁКС интенсивлиги фонга нисбатан кескин ошади (8,г-расм). МКнинг ўртача ўлчамлари катталашишлари сари 1332 см^{-1} интенсивлиги ошиб боради ва 50 мкмда интенсивлик максимал қийматга эришади. Олмос НК ЁКС интенсивлиги ФЛ фониға нисбатан жуда ҳам су́ст. Бу ишда олмос МК ($d_{\text{ўр}}=10 \text{ мкм}$) ЁКС интенсивлигининг уйғотувчи нурланиш интенсивлигига боғлиқлиги ҳам аниқланган. Дамлаш интенсивлигининг ошиши билан намуналарда су́ст ночизиқлик қонуният аниқланган (боғлиқлик $I \approx I_{\text{уй}}^{1.25}$ қонуниятдан деярли четланиш билан характерланади).

Фотонли тузоқларда олмослар МК ЁКС интенсивлиги кюветадан чиқиш вақтида анча ошади (7-расм, 2-чизиқ): уйғотувчи нурланишнинг интенсивлигига нисбатан ЁКС нисбий интенсивлиги кескин кўпаяди (комбинацион опалесценция режими). Бу ҳолат фотоннинг тузоқ деворларидан кўп марта қайтиши ва муҳитнинг гетерогенлиги туфайли сочилиши туфайли вужудга келади: фотоннинг тўлиқ йўли анча кўпаяди (уйғотувчи нурланиш фотони тадқиқот объектига киради). Маълумки, бир жинсли муҳитда ИН спектрида ЁКС интенсивлиги ($I_{\text{ЁКС}}$) нинг уйғотувчи нурланиш интенсивлигига нисбати (1) формула кўринишида ёзилади.

Тажибада қўлланиладиган фотонли тузоқ учун (2-расм) световодлар четлари орасидаги масофа, яъни фотонли тузоқда фотоннинг ҳаракатланиши $R=1 \text{ см}$ тенг. Ультрадисперсли муҳитда фотоннинг эркин югуриш узунлигинизаррачалар ўлчамлари билан тенг деб ҳисоблаш мумкин, яъни $\Delta x \approx 10^{-4} \text{ см}$. Унда фотонли тузоқ ичида уйғотувчи нурланиш фотонининг босиб ўтган тўлиқ йўли $L \approx 10^4 \text{ см}$ га тенг. Шу билан бирга фотонли тузоқни қўллашда сочилган нурланишнинг қаттиқ бурчаги $\delta\Omega \approx 4\pi$. Бундай ташлаш $\delta\Omega$ сабаби, уйғотувчи нур фотонли тузоқга келиб тушгандан сўнг, кўп марта унинг деворларидан ва ультрадисперсли муҳит заррачаларининг сиртларидан қайтади. $\sim 1 \text{ см}^3$ ишчи ҳажмга эга фотонли тузоқ қўлланганда ультрадисперсли шакл кўринишида бўлган моддалар ИН спектридаги ЁКС контрастлиги оддий кюветалар билан таққослаганда 5-6 мартага ошади ва куйидаги қийматга тенг бўлади:

$$\frac{I_{\text{ЁКС}}}{I_{\text{уй}}} = 10^{-1} - 10^{-2} \quad (4)$$

Шундай қилиб, натижада яратилган фотонли тузоқлар қўлланилганда ультрадисперсли шакл кўринишида бўлган моддаларнинг ЁКС контрастлиги кюветанинг чиқиш қисмида оддий кюветалар билан таққосланганда 5-6 тартибга ошади. Бу ҳолатда комбинацион опалесценция эффекти кузатилади, яъни ИН спектрида ЁКС сигнали интенсивлиги уйғотувчи нурланиш интенсивлиги билан тенглашади (7-расм). Барча ўрганилган олмос намуналарида ФЛ спектрида 410–460 нм соҳада, азот аралашмалар билан боғлиқ чизиқлар аниқланди (N3-нуксонлар).

Диссертациянинг «Лазер спектроскопиясини ароматик бирикмалар ва биофаол препаратларни таҳлил қилиш учун фойдаланиш» деб номланган тўртинчи бобида ароматик бирикмалар ва биофаол препаратлар (аспирин, анальгин, цитрамон, парацетамол, РОРОР, РРО, соя уни, тўйинган ёғли кислоталар $C_nH_{2n}O_2$)нинг микро ва нанокукунларида ИН спектрларини тадқиқоти бўйича олинган тажриба натижалари келтирилган. Қатор фармацевтик препаратлар микро ва нанокукунларининг бир ва икки фотонли уйғотилган люминесценция спектрлари қиёсий таҳлил қилинган. Илк бор фотонли тузоқларга жойлаштирилган РОРОР ва РРО МК комбинацион опалесценция эффекти қайд этилган бўлиб, бунда ЁКС интенсивлиги уйғотувчи нурланиш интенсивлигига қарийб тенглашган ҳамда уйғотувчи лазер нурига яқинида етарли даражада интенсив бўлган ЁКС чизиқлар кузатилди. Илк бор генетик модификацияланган соя уни микрокукунларида ИФЛнинг энергетик характеристикалари тадқиқот қилинган.

Тўйинган ёғли $C_nH_{2n}O_2$ кислоталарнинг суяқ кўринишдаги намуналарида ёруғликнинг комбинацион сочилиш спектрларида бўйлама акустик тебранишлар (ЛАМ) туфайли вужудга келадиган интенсив ва етарлича тор полосалар кузатилди ва ушбу модалар частоталари молекула узунлигига боғлиқ равишда монотон тарзда ўзгариши кузатилди. ЁКС спектрларида кузатилган қонуниятлар чекли узунликка эга бўлган икки атомли кристалл занжирли модели асосида тушунтирилган.

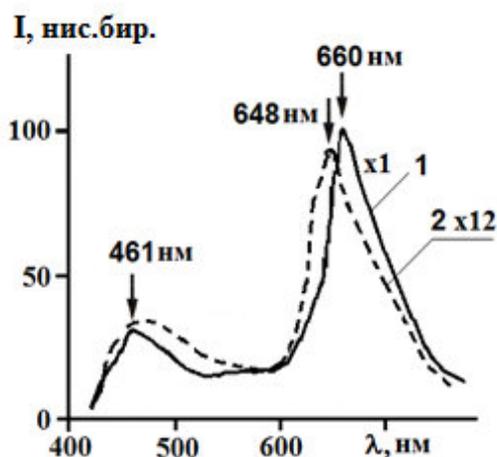
9-расмда УБ нурланиш ($\lambda_{\text{уй}}=255,3$ нм) таъсирида уйғотилган анальгин МК ФЛ спектрлари ва мис буғларидаги лазернинг икки яшил кванталари таъсирида ($\lambda_{\text{уй}}=510,6$ нм) уйғотилган анальгин МК ФЛ спектрлари келтирилган. Анальгин МК ФЛ спектри 430-800 нм диапазонда жойлашган бўлиб, 461 нм ва 660 нм максимумларга эга. ИФЛ спектри резонанс люминесценция спектридан иккинчи максимуми жойлашиши ($\lambda_{\text{мак}}=648$ нм) билан фарқ қилади (максимум 12 нм қисқа тўлқин узунлиги томон силжиган). Мазкур спектрлар бир биридан интенсивликлари билан ҳам фарқ қилади. ИФЛ спектр ($\lambda_{\text{мак}}=648$ нм) интенсивлиги ФЛ спектр ($\lambda_{\text{мак}}=660$ нм) интенсивлигидан қарийб 12 марта кичик. Олинган спектрлар адабиётда келтирилган анальгиннинг сувдаги эритмаси ФЛ спектридан фарқ қилади: анальгиннинг сувдаги эритмасида люминесценция нурланиши иккита 650 и 457 нм интенсив максимумларга эга спектрдан иборат.

Парацетамол МК ФЛ ва ИФЛ спектрлари (10-расм) бир-биридан интенсивлиги, шакли ва жойлашиши билан фарқ қилади. Расмдан кўришиб турибдики, ИФЛ спектрида қисқа тўлқин соҳасида максимум мавжуд эмас ва узун тўлқин узунлиги соҳасидаги максимум 5 нмга силжиган ($\lambda_{\text{мак}}=650$ нм).

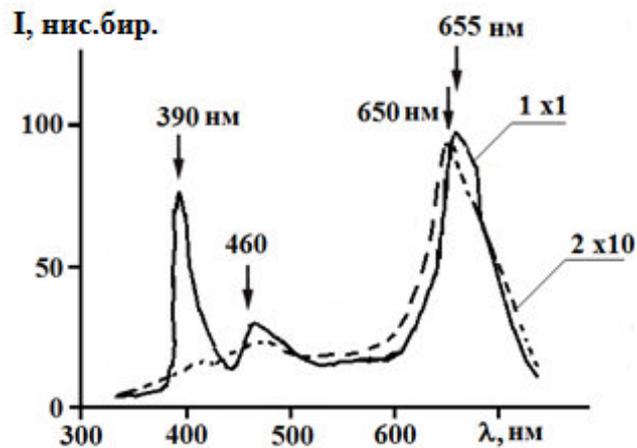
Қайд этиш лозимки, икки фотонли ва бир фотонли спектрлар ҳар хил ахборотни беради. Масалан, диполь яқинлашувида икки фотонли ўтишлар бир хил тенгликка эга бўлган ҳолатлар мумкин бўлса, бир фотонли ўтишлар ҳар хил тенгликка эга бўлган ҳолатлар учун мумкин. Фармацевтик объектларларида кузатиладиган асосий ҳолатнинг тебранма ИФЛ спектрлар

ароматик молекуланинг биринчи уйғотилган электрон сатҳидан асосий ҳолатнинг тебранма сатҳига ўтиш натижасидир. Бунда кузатилаётган спектрларнинг қисқа тўлқинли қирраси ушбу тузилмалар молекулалари бензол халқасининг электрон ўтишлари π - π га мос келади. Узун тўлқинли континуум эса қаралаётган молекулаларнинг тебранма структураси ва экситон ҳолатларнинг энергетик зонаси орасидаги ўтишлар билан боғлиқ.

Кузатилаётган эффектларни – ароматик моддалар ИН спектрларидаги интенсивликнинг тақсимланишларини спонтан ФЛ режимидан суперлюминесценция режимига ўтиш деб тушунтириш мумкин.



9-расм. 1) –УБ нурланиш($\lambda_{\text{уй}}=255,3$ нм) таъсирида уйғотилган аналгин МК ФЛ спектрлари; 2) – мис буғларидаги лазернинг икки яшил кванталари таъсирида ($\lambda_{\text{уй}}=510,6$ нм) уйғотилган аналгин МК ФЛ спектрлари



10-расм. 1) - УБ нурланиш($\lambda_{\text{уй}}=255,3$ нм) таъсирида уйғотилган парацетамол МК ФЛ спектрлари; 2) – мис буғларидаги лазернинг икки яшил кванталари таъсирида ($\lambda_{\text{уй}}=510,6$ нм) уйғотилган парацетамол МК ФЛ спектрлари

Бу интенсив импульсли УБ лазер нури таъсирида ароматик молекуласининг уйғотилган синглет терми тўлдириш билан боғлиқ. Ушбу эффектнинг табиати бўёқли лазерлардаги механизмга ўхшайди. Кучайтириш коэффициентини қуйидаги формула орқали топиш мумкин:

$$K = \sigma \cdot (N_1 - N_0) \approx \sigma \cdot N_1 \quad (5)$$

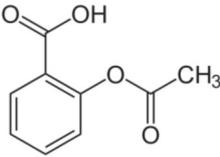
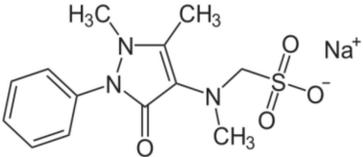
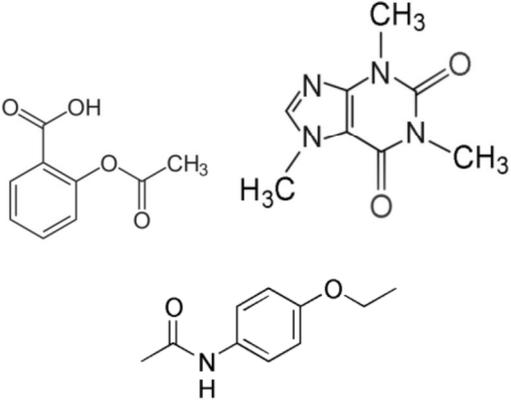
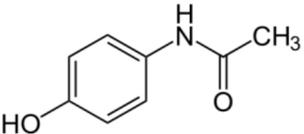
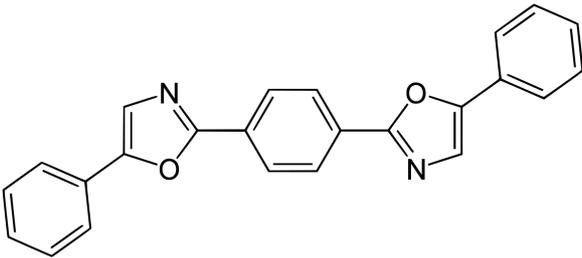
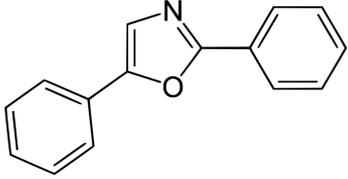
Агар самарали кесим катталиги $\sigma \approx 10^{-16}$ см² ҳамда сув эритмасида молекулалар концентрацияси $N_1 \approx 10^{17} \div 10^{18}$ см⁻³ каби шартлардан фойдалансак, кучайтириш коэффициенти учун $K \approx 10 \div 100$ см⁻¹ катталикни оламиз.

Бугер қонунига мувофиқ фаол муҳитлар ($L=0,1 \div 1$ мм) учун қуйидаги формулага эга бўламиз:

$$I(L) = I_0 \cdot e^{KL} \approx (10^2 - 10^3) \cdot I_0 \quad (6)$$

Кузатилган эффектнинг хусусияти – ароматик моддаларнинг микрокунларида спектрнинг УБ соҳасида биринчи уйғотилган электрон синглет терми (S_1)га тўғри келувчи сатҳда суперлюминесценция эффекти кузатилди.

Фармацевтик препаратларнинг кимёвий ва тузилиш формуллари

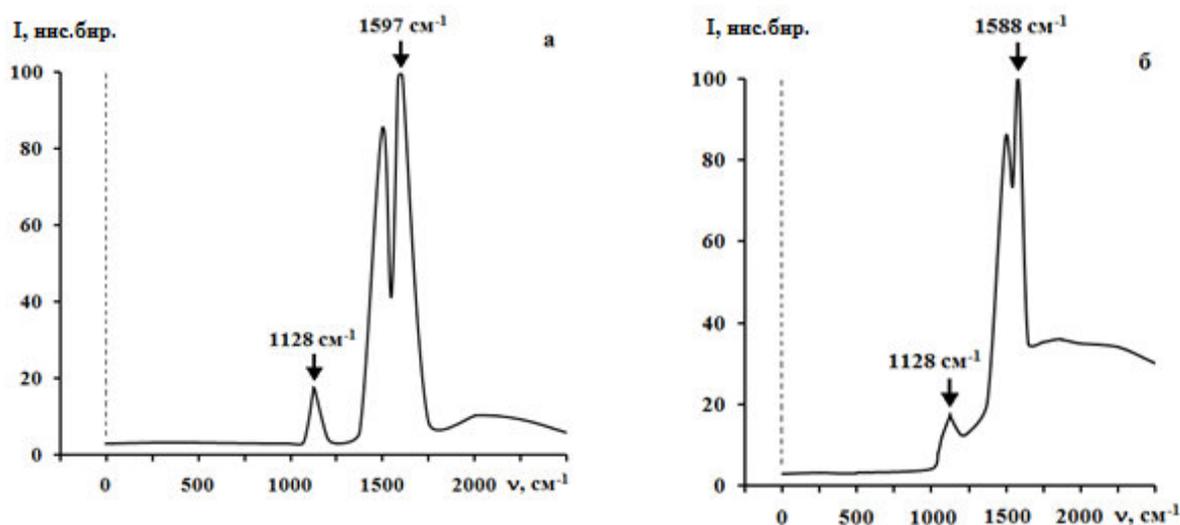
Модданинг номи	Кимёвий формуласи	Тузилиш формуласи
Аспирин	$C_9H_8O_4$	
Анальгин	$C_{13}H_{16}N_3NaO_4S$	
Цитрамон (аспирин, кофеин, фенацетин)	$C_9H_8O_4 +$ $C_8H_{10}N_4O_2 +$ $C_{10}H_{13}NO_2$	
Парацетамол	$C_8H_9NO_2$	
1,4-ди-2-(5-фенилоксазол) бензол (РОРОР)	$C_{24}H_{16}N_2O_2$	
2,5-дифенилоксазол (РРО)	$C_{15}H_{11}NO$	

Полициклик, конденсатланган углеводородлар ясси каттиқ тузилишга эга бўлганлиги туфайли, тебранма структурали чизикларнинг вужудга келади. Ушбу бирикмалар турида чизикларнинг тебранма структураси

асосан молекула углерод скелети (ν_{C-C})нинг тўлиқ симметрик тебранишлари асосида рўй беради. Бундай пайтларда энергетик ҳолатларни симметрияси ва ўрганилаётган молекула учун танлов қоидалари орқали қараб чиқилади. Полициклик ароматик бирикмалар яхши люминофорлар ҳисобланади ва бўёқли лазерлар учун фаол муҳитлар сифатида қўлланилади. Бунда люминесценциянинг энг юқори квант чиқиши ўта симметрик молекулалар учун амалга оширилади.

11-расмда фотонли тузоқларга жойлаштирилган кукунлар (РОРОР, РРО) ЁКС спектрлари келтирилган. Ушбу спектрлардаги ЁКС чизиқлари стрелкалар билан белгиланган, уйғотувчи нур жойлашиши эса пунтир кўринишида белгиланган. Бу ҳолатда фотонли тузоқлар қўлланганлиги туфайли уйғотувчи нурланиш кўринмади. Бу шароитда комбинацион опалесценция кузатилади. Лекин, илгари уйғотувчи нурланишни тўлиқ йўқотиб бўлмаган.

Демак, амалиётга қўллаш борасида ушбу маълумотлар султ ИН сигналларини қайд этиш учун яхши натижадир



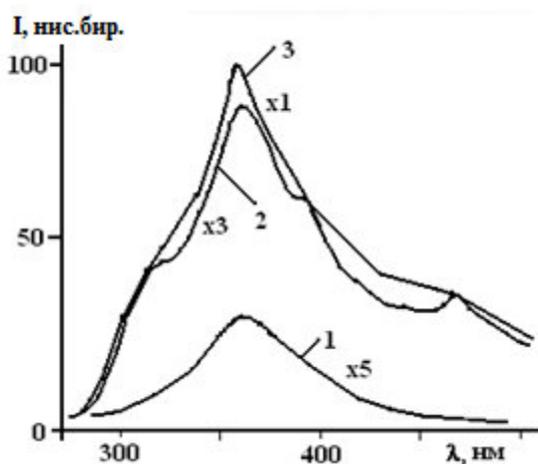
11-расм. Мис буғларидаги лазернинг яшил нури ($\lambda_{\text{уй}}=510,6$ нм) таъсирида уйғотилган полициклик ароматик бирикмаларнинг ЁКС спектрлари: а – РОРОР, б – РРО

Маълумки, флуоресценцияни ҳодиса сифатида ЁКС эффекти билан солиштирса, ундан 10^4-10^7 мартадан кўпроқ интенсив ҳисобланади. Шунинг учун ЁКСни уйғотишдаги (кўриш диапазонида) уринишларда спектрда флуоресценциядан ташқари ҳеч нима кузатилмайди. Люминесценцияга сабабчи аралашмаларнинг излари, полимерлар юзасидаги қатламлар, қўшимчаларни молекуляр бирикмалар учун паст молекуляр бирикмалардан фарқли равишда тозалаш ўта қийин ёки умуман тозалаб бўлмайди. Айнан шу ҳолат юқори молекуляр бирикмаларнинг чоп этилган «эталон» ЁКС спектрлари коллекцияси йўқлигига асосий сабаблардан ҳисобланади.

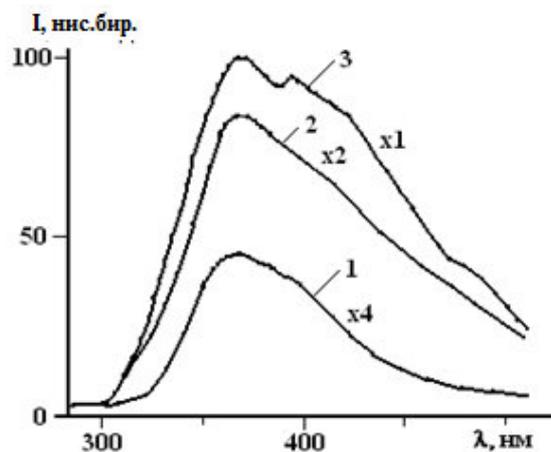
Соя унининг ИФЛ спектрлари таҳлили икки ўлчашлар сериясидан иборат эди. Биринчи серия ўлчашлар назорат намунаси – модификацияланмаган соя уни бўлиб, ушбу намуналар генетик

модификация қилинмаган соя уни майдалаш усули билан олинган. Иккинчи серия тадқиқотлари махсус генетик усуллар орқали олинган трансген (ТГ) соя намуналари эди.

12,а-расмда $T=300$ К ҳароратда уйғотувчи нурланишнинг ҳар хил интенсивлигида олинган Модификацияланмаган соя унининг ИФЛ спектрлари келтирилган. Барча спектрлар бир хил техник шароитларда ёзилган бўлиб, усулни келтириб чиқадиган фарқлар мавжуд эмас. Лазер (уйғотувчи) нурланишининг кичик интенсивлигида (1-чизик) ИФЛ спектри 360 нм максимумга эга бўлади. Уйғотувчи нурланишнинг интенсивлиги ошиши билан ИФЛ спектр интенсивлиги кескин ортади. Бунда ИФЛ спектри (2-чизик) 280-510 нм диапазонда жойлашган бир нечта ўзаро бир-бирини полосалардан ташкил топади. УБ соҳада (300 нм яқинида) «зинали» максимум кузатилади. Мазкур максимум ДНК ва РНК таркиби кирувчи нуклеин асослари хромофор гуруҳларининг намоён бўлиши билан боғлиқдир. Спектрнинг ушбу соҳасида одатда асосан гетероароматик аминокислота – триптофан билан боғлиқ оксиллар флуоресценцияси кузатилади. Бундан ташқари, бу максимумга соя унидаги ДНК ва РНК таркибига кирувчи нуклеин асосларининг тегишли хромофор гуруҳлари ҳам ҳиссасини қўшишлари мумкин.



12,а-расм. Модификация қилинмаган соя унининг уйғотувчи нурланиш ($\lambda_{\text{уй}}=578,2$ нм)нинг турли интенсивликларида ва $T=300$ К олинган ИФЛ спектрлари: (1) чизик $I_{\text{уй}}=10$ интенсивликка мос келади; (2) - $I_{\text{уй}}=15$; (3) - $I_{\text{уй}}=20$ ($I_{\text{уй}} \sim 10^7$ Вт/см²)



12,б-расм. Генетик модификация қилинган соя унининг уйғотувчи нурланиш ($\lambda_{\text{уй}}=578,2$ нм)нинг турли интенсивликларида ва $T=300$ К олинган ИФЛ спектрлари: (1) чизик $I_{\text{уй}}=10$ интенсивликка мос келади; (2) - $I_{\text{уй}}=15$; (3) - $I_{\text{уй}}=20$ ($I_{\text{уй}} \sim 10^7$ Вт/см²)

Кичик интенсивликда ИФЛ спектри (12,б-расм, 1-чизик) Модификацияланмаган соя унининг ИФЛ спектрига айнан ўхшайди. Уйғотувчи нурланишнинг интенсивлиги ошиши билан ИФЛ спектр интенсивлиги кескин ортади. Бунда спектр максимуми ўзгармайди (12,а-расм, 2-чизик). Кейинчалик уйғотувчи нурланишнинг интенсивлигининг янада ошиши (3-чизик) туфайли ИФЛ спектрида 360 ва 390 нм ди иккита тор максимум вужудга келади. Модификацияланмаган соя намунасида фарқли равишда

спектрнинг УБ соҳасида «зинали» максимум кузатилмайди. Уйғотувчи нурланишнинг юқори интенсивликларида барча ўрганилган намуналарда ИФЛ интенсивлиги квадратик қонуният бўйича ўзгаради. Бунинг сабаби спонтан люминесценциядан мажбурий люминесценция ўтиш жараёнидир.

Шундай қилиб, тадқиқотлар шуни кўрсатадики, соя унининг импульсли лазер нурланиши ёрдамида уйғотганимизда 280-510 нм соҳада ИФЛ спектрларини кузатиш мумкин. Олинган ИФЛ спектрларини таққослаш натижасида модификация қилинмаган ва генетик модификация қилинган соя уни спектрларидаги максимумлар кўринишидаги фарқ аниқланган.

ХУЛОСА

1. Янги турдаги минирезонаторли кюветалар (фотонли тузоқлар), нуртолали-оптик техника ва импульсли-даврийли лазерлар асосида яримўтказгичлар ва диэлектрикларнинг микро ва нанокукунларида иккиламчи нурланиш спектрларини қайд этувчи оригинал усул ишлаб чиқилди. Таклиф этилган усулнинг сезгирлиги 10^{-10} г ни ташкил этади.
2. Илк бор кукунсимон муҳитларда ЁКС таҳлили учун фон порлаши таъсирини камайтирувчи ва ўлчаш аниқлигини оширишга имкон берувчи фойдали модели патенти билан ҳимояланган, автоматлаштирилган кўп каналли спектрометр яратилди.
3. Илк бор фотонли тузоқларда олмос, РОРОР, РРО микрокукунларида «комбинацион опалесценция» эффеқтини ЁКС интенсивлиги муҳитда кескин кўпайиб кетиши (5-6 мартагача) орқали кузатиш мумкинлиги кўрсатилди.
4. ZnO кукун заррачалари ўлчамларининг микроўлчамдан наноўлчамга кичрайиб бориши билан УБ чизиқ максимуми кичик тўлқин узунлик томон силжиши кўрсатиб берилди. Биринчи марта олмос микрокристалларининг ФЛ спектрларининг тузилиши уларнинг ўлчамларига боғлиқ эмаслиги аниқланди.
5. Уйғотувчи нурланиш қуввати зичлигининг тахминан 10^6 Вт/см² қийматларида ZnO ва ZnSe микрокукунларда экситон ФЛ учун спонтан люминесценциядан мажбурийга ўтиш, яъни суперлюминесценция ҳолати кузатилди. ZnSe микрокукунларидаги ФЛ яшил-сарик нурланиш чизиғи ($\lambda_{\text{мак}}=560$ нм)нинг интенсивлиги дамлаш ошиши билан чизиқли равишда ўзгариши кўрсатилди.
6. ФЛ ва ИФЛ спектрлардаги фарқланиш хусусиятлари аниқланди: ноорганик моддалар (олмос, ZnO, ZnSe) нанокукунларида уларнинг улкан кристалларига нисбатан спектр полосаларининг шакли, кенглиги ва максимум силжишлари кузатилди.
7. Ароматик моддаларнинг микрокукунларида спектрнинг УБ соҳасида биринчи уйғотилган электрон синглет термига тўғри келувчи сатҳда суперлюминесценция эффеқти кузатилди.

8. Илк бор генетик модификацияланган соя уни микрокукунларида ИФЛнинг энергетик характеристикалари ўрганилди.
9. Тўйинган ёғли $C_nH_{2n}O_2$ кислоталарнинг суюқ кўринишли намуналарида ёруғликнинг комбинацион сочилиш спектрларида бўйлама акустик тебранишлар (LAM) туфайли вужудга келадиган интенсив ва етарлича тор полосалар кузатилди ва ушбу модалар частоталари молекула узунлигига боғлиқ равишда монотон тарзда ўзгариши аниқланди. ЁКС спектрларида кузатилган қонуниятлар чекли узунликка эга бўлган икки атомли кристалл занжирли модел ёрдамида тушунтирилди.

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

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА
ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

КУРБОНОВ АБДУЛЛА КЕНЖАЕВИЧ

**ВТОРИЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МИКРО- И НАНОПОРОШКАХ ПРИ
ИМПУЛЬНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

01.04.05 – Оптика

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

Ташкент – 2020

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2018.2.PhD/FM246.

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека и Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.iplt.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель:

Рахматуллаев Илёс Арзимуродович
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Нематов Шерзод Каландарович
доктор физико-математических наук

Эшчанов Баходир Худайбергенович
доктор физико-математических наук

Ведущая организация:

Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится «15» 12 2020 г. в 16⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г.Ташкент, ул.Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 7). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.: (+99871) 262-31-69.

Автореферат диссертации разослан «5» 12 2020 года.

(Реестр протокола рассылки 7 от «5» 12 2020 года).



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

И.Д.Ядгаров,
учёный секретарь Научного совета по присуждению
учёных степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире актуальными являются исследования по поиску перспективных материалов, которые в дальнейшем могли бы обеспечить возрастающие потребности промышленности, и особенно высокотехнологичных направлений как: наноэлектроника, фотоника, компьютерные технологии, лазерные системы. В последние годы бурно стало развиваться актуальное новое направление в оптике, связанное с исследованиями оптических процессов в микро- и наноструктурных системах, включая их порошкообразные формы.

На сегодняшний день, микро- и, особенно, нанопорошки приобрели огромный интерес в связи с разработкой новых методов их синтеза, а также с широким практическим использованием. Интерес вызван благодаря их уникальным электрофизическим, оптическим, теплофизическим, механическим и другим свойствам, которые сильно отличаются от свойств крупных кристаллов. Для успешного исследования и применения подобных образцов нужно иметь точные данные о структурных свойствах этих систем. При переходе от объемного кристалла к нанокристаллам структура кристаллической решетки может измениться коренным образом. Различия возникают из-за того, что по мере уменьшения размеров частиц их физические и химические параметры в основном определяются эффектами, связанными с поверхностью, а вклад эффектов, связанных с объемом, которые определяют физические параметры макроскопических объектов, уменьшается. Вторичное излучение (ВИ) возникает в процессах фотолюминесценции (ФЛ), комбинационного рассеяния света (КРС) и в результате разнообразных многофотонных эффектов. Время существования ВИ зависит от типа процесса и характеристик материальной среды. Несмотря на огромные успехи лазерной спектроскопии ВИ до сих пор остаются проблемы, связанные с оптимизацией лазерного источника света, также с методами повышения эффективности преобразования возбуждающего излучения в сигнал ВИ. Это, в частности, относится к порошкам, характеризующимся сильным рассеянием возбуждающего (лазерного) излучения. Обычно при регистрации спектров ВИ в порошках лазерное излучение фокусируется во внутрь исследуемой среды. При достаточно интенсивных излучениях импульсных лазеров, исходные характеристики веществ сильно изменяются: среда сильно разогревается и даже может происходить фотодеструкция вещества.

В республике огромное внимание уделяется разработке фундаментальных основ изготовления различных типов диэлектрических и полупроводниковых микро- и наноструктур для создания приёмников оптического излучения — оптоэлектронных приборов, преобразователей ультрафиолетового и инфракрасного излучений в видимое. Направления этих фундаментальных исследований и разработок, имеющих огромное значение для развития науки нашей республики и их практического применения,

отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы.

Настоящая диссертационная работа в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указах Президента Республики Узбекистан №УП-4512 от 1 марта 2013 года «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», в Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационное исследование проведено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан – II. «Энергия, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Исследования в области диагностики и исследования микро- и наноструктур проводились многими учеными мира, например, российскими (М.М. Михайлов, С.Н. Миков, В.С. Горелик, А.Л. Верещагин, П.А. Родный, А.А. Хомич, Н.Л. Векшин, Ю.П. Мешалкин), американскими (W. Kaiser, V.A. Fonoberov, W. Shan, W. Walukiewicz, M. H. Huang, H. Feick, C.A Smith), украинскими (О.Г. Лысенко, В.П. Махний, Д.Д. Недеогло, А.В. Симашкевич), белорусскими (В.С. Бураков, Н.В. Тарасенко), китайскими (C. Fan, Q. Zhang, H. Dong, B. Zhou, H.Y. Li), канадскими (A. Saxena, S. Yang), индийскими (D. Sridevi, K.V Rajendran, A. Yadav, S.P. Nehra), польскими (M. Skrobot, M. Godlewski, E.M. Shishonok), узбекскими (Э.М. Ибрагимова, С.С. Курбонов) и другими специалистами.

В результате этих исследований были выявлены ряд закономерностей в полупроводниковых нанокристаллах (алмаза, ZnSe, CdS, ZnO): многие физические свойства (структурные, магнитные, оптические, тепловые) подобных наноструктур сильно отличаются от свойств крупного кристалла из-за поверхностных и квантового-размерных эффектов. Исследованы электронные и колебательные спектры микро- и нанокристаллов ряда неорганических соединений (алмаз, Al₂O₃, ZnS) и обнаружены закономерности формирования их спектров вторичного излучения. Комплексно исследованы электрические и оптические свойства тонких пленок ZnO. Исследованы структурные и фазовые особенности синтезированных образцов наноразмерных структур ZnO и ZnSe. В частности, показано, что характерные максимумы ФЛ при 390 и 520 нм в нанокристаллах ZnO, связаны с излучением экситонов и дефектами. При исследовании наночастиц ZnSe со средним размером 15 нм, выявлено, что в спектре ФЛ три линии генерации с максимумами в областях 480, 453 и 520 нм, которые отличаются от спектра ФЛ крупных кристаллов, а также пик

КРС в области 210 см^{-1} , возникающий за счет ТО-фононов в образце ZnSe. Экспериментально установлено, что широкая полоса ФЛ 590–610 нм (2,10–2,00 эВ) в ZnSe связана с наличием вакансионных дефектов в подрешетке цинка, которые могут формироваться, как за счет растворения сверхстехиометрического селена, так и примеси хлора. Имеются работы, посвященные способам получения и анализа детонационных наноалмазов (ДНА). Получены экспериментальные результаты об особенностях спектров ФЛ и КРС различных типов биологически активных препаратов. Получена важная информация о микроструктуре биоактивных препаратов, о присутствии в них примесей и дефектов, что позволяет получить количественные данные о соответствии анализируемого препарата эталону. Теоретически и экспериментально исследованы двухступенчатые процессы взаимодействия лазерного излучения с ароматическими и биологическими молекулами. Впервые измерены сечения двухфотонного поглощения (ДФП) ряда молекул биологически-активных веществ в растворителях (воде, этаноле).

Однако, несмотря на большой объем работ, по получению и изучению оптических свойств микро- и нанопорошков (МП и НП), вопросы по изучению, энергетических и спектральных характеристик ВИ подобных структур, еще слабо изучены, как в Узбекистане, так и за рубежом. Например, мало изучены вопросы по влиянию размеров частиц на оптические свойства порошков. К настоящему времени имеются отдельные данные о закономерностях и особенностях формирования спектров ВИ в МП и НП в фотонных ловушках.

Таким образом, актуальность и недостаточная изученность этих проблем послужили основанием для проведения автором исследований в направлении по изучению оптических характеристик ВИ в МП и НП различных перспективных материалов.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнялась в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ Республики Узбекистан по темам: Ф2-67 «Исследование явления неупругой опалесценции в мелко- и ультрадисперсных средах при импульсном лазерном возбуждении» (2012–2016) и А-3-113 «Разработка и создание макета малогабаритного переносного спектрального устройства для экспресс-анализа качества продуктов питания и фармацевтических препаратов» (2015–2017).

Целью исследования является определение закономерностей формирования спектров вторичного излучения в микро- и нанопорошков неорганических соединений (алмаз, селенид цинка, оксид цинка, оксид иттрия) и ароматических соединений и биоактивных препаратов (аспирин, анальгин, цитрамон, парацетамол, 1,4-Ди-2-(5-фенилоксазол) бензол - РОРОР, 2,5-Дифенилоксазол - РРО, соевая мука, насыщенные жирные кислоты $C_nH_{2n}O_2$) при импульсно-периодическом лазерном возбуждении.

Задачи исследования:

разработка и усовершенствование экспериментальной установки на основе новых типов минирезонаторных кювет (фотонных ловушек) и волоконно-оптической техники для изучения спектров вторичного излучения в микро- и нанопорошков полупроводников и диэлектриков при импульсно-периодическом лазерном возбуждении;

выявление условий возникновения эффекта «комбинационной опалесценции» и повышение эффективности КРС в микропорошках алмаза, РОРОР и РРО в фотонных ловушках;

изучение условий влияния дисперсности порошков на эффективность увеличения сигналов вторичного излучения;

выяснение причин аномальной зависимости от накачки соотношения интенсивностей экситонных полос ФЛ ZnO (УФ-полоса) и ZnSe (синяя полоса) и полосы, примыкающей к ней с длинноволновой стороны;

сравнительный анализ спектров одно- и двухфотонно-возбуждаемой люминесценции порошков;

экспериментальное исследование спектральных и энергетических характеристик ДВЛ в микропорошках соевой муки;

изучение формирования спектров КРС жидких и твердых образцов насыщенных жирных кислот $C_nH_{2n}O_2$ и их теоретическая интерпретация.

Объектом исследования являются микро- и нанопорошки ряда неорганических веществ (алмаз, селенид цинка, оксид цинка, оксид иттрия) и ароматических соединений и биоактивных препаратов (аспирин, анальгин, цитрамон, парацетамол, РОРОР, РРО, соевая мука, насыщенные жирные кислоты $C_nH_{2n}O_2$).

Предметом исследования являются закономерности и физические механизмы формирования спектров вторичного излучения микро- и нанопорошков ряда неорганических веществ и органических соединений при импульсно-периодическом лазерном возбуждении.

Методы исследования. Рентгено-флуоресцентный анализ элементного состава, электронная микроскопия, лазерная спектроскопия вторичного излучения.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана оригинальная методика регистрации спектров вторичного излучения в микропорошках и нанопорошках полупроводников и диэлектриков на основе новых типов минирезонаторных кювет (фотонных ловушек), волоконно-оптической техники и импульсно-периодических лазеров;

впервые обнаружены условия возникновения эффекта «комбинационной опалесценции» и повышение эффективности КРС в микропорошках алмаза, РОРОР и РРО в фотонных ловушках, состоящие в резком возрастании относительной интенсивности КРС в сравнении с интенсивностью возбуждающей линии на выходе из резонаторных кювет;

обнаружено, что с уменьшением размера порошков ZnO от микроразмеров к наноразмером максимум УФ полосы слегка перемещается в коротковолновую область. Впервые установлено, что структура спектров ФЛ не зависит от размеров микрокристаллов алмаза;

выявлено, что при увеличении плотности мощности возбуждающего излучения порядка 10^6 Вт/см² в микропорошках ZnO и ZnSe для экситонной ФЛ наблюдается переход от спонтанной люминесценции к стимулированной, т.е. к суперлюминесценции;

обнаружен эффект суперлюминесценции в микропорошках ароматических веществ в УФ области спектра, соответствующей положению первого возбуждённого электронного синглетного терма;

впервые изучены энергетические характеристики ДВЛ в микропорошках генетически модифицированной соевой муки;

обнаружено проявление в спектрах комбинационное рассеяние света жидких образцов насыщенных жирных кислот $C_nH_{2n}O_2$ интенсивных и достаточно узких полос, обусловленных продольными акустическими колебаниями (LAM) и установлено, что частоты этих мод монотонно изменяются с изменением длины молекулы.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана оригинальная методика с использованием резонаторных кювет (фотонных ловушек), которая позволяет надежно регистрировать слабые сигналы ВИ посредством усиления интенсивности спектров КРС и ФЛ микро- и нанопорошков и структур;

впервые создано устройство с автоматической калибровкой спектра КРС, в котором уменьшается влияние фоновой засветки и увеличивается точность измерений (оно позволяет регистрировать слабые спектры КРС порошкообразных образцов — порог регистрации $\approx 10^{-10}$ г);

показана роль резонаторных кювет для не разрушающего лазерного исследования порошкообразных веществ.

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием современных приборов и оборудования, методов исследования и обработки экспериментальных данных и их хорошей воспроизводимостью, а также подтверждением последующими работами других исследователей. Положения, выводы и заключения, сформулированные в диссертации, теоретически и экспериментально обоснованы и не противоречат общенаучным представлениям о природе ВИ в порошках.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что они позволяют объяснить физические механизмы возникновения спектров ВИ в МП и НП при импульсно-периодическом лазерном возбуждении.

Результаты, полученные в данной работе будут вносить определенный вклад в развитие физической науки, в частности, существующих представлений об особенностях механизмов формирования и эволюции

спектров ВИ в зависимости от размера частиц для диэлектрических и полупроводниковых материалов, а также в гетерогенных системах на их основе. Результаты исследования позволят целенаправленно управлять структурой и свойствами диэлектрических и полупроводниковых материалов на основе МП и НП различной дисперсности. Это дает возможность на практике получать разнообразные структуры с заданным комплексом физических свойств, которые будут очень важны для промышленности. Методы лазерной спектроскопии ВИ могут быть использованы при исследовании новых микро- и наноразмерных структур, которые в ближайшей перспективе могут найти достойное практическое применение для диагностики практически важных объектов: фармацевтических препаратов, биологических объектов, современных микро- и нанотехнологий, а также гетерогенных структур.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов исследования ВИ в микро- и нанопорошках при импульсно-периодическом лазерном возбуждении:

разработан малогабаритный портативный спектрометр, на который получен патент на полезную модель Агентства по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан («Многоканальный спектрометр», №FAP 01158, 11.11.2016 г.). Разработанный спектрометр, работающий в автоматическом режиме, позволил уменьшать влияние фоновой засветки, увеличить точность измерения и регистрировать слабые спектры КРС порошкообразных образцов $\approx 10^{-10}$ г;

полученные научные результаты, связанные с изучением закономерностей спектров ФЛ при одно- и двухфотонном возбуждении микро- и нанопорошков ZnO, использовались при выполнении фундаментального проекта Ф2-ФА-Ф147 на тему: «Изучение физических механизмов высокоэффективного преобразования солнечной энергии в первичных процессах фотосинтеза» (Справка № 2/1255-1992 Академии наук Республики Узбекистан от 18 июля 2019 года). Использование научных результатов позволило определить информацию о дефектах и важные абсорбционно-флуоресцентные спектральные характеристики кристаллов ZnO.

Апробация результатов исследования. Результаты данных исследований прошли обсуждение на 10 международных и 2 республиканских конференциях.

Публикация результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 1 патент на полезную модель и 6 научных статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации, 4 статьи в международных научных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включая 47 рисунков и 5 таблиц. Текст диссертации изложен на 156 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, определены объект, предмет и основные методы исследования, а также связь темы исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан; сформулирована научная новизна исследований, обоснованы достоверность результатов диссертационной работы и их научно-практическая значимость, представлены данные о внедрении полученных результатов, апробации работы, объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Состояние проблемы и тенденции исследования оптических свойств микро- и наноструктур и порошков»** проводится анализ литературных сведений по получению нанопорошков и наноматериалов. Приведен краткий обзор работ, посвященных методам диагностики наноматериалов и проанализированы экспериментальные работы в области исследования вторичного излучения в важных неорганических (алмаза, ZnO, ZnSe, Y₂O₃) и ароматических фармацевтических препаратах микро- и нанопорошков при лазерном возбуждении.

На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных выявлены основные проблемы исследования вторичного излучения микро- и наноструктур порошков. Определены нерешенные проблемы, на основе которых сформулированы цель и задачи данной диссертационной работы.

Во второй главе **«Экспериментальная установка и методика измерений»** изложена методика экспериментальных исследований ВИ в порошках при их импульсно-периодическом лазерном возбуждении, а также изложены особенности методов возбуждения, необходимые для «усиления» слабых сигналов ВИ в веществах, и регистрации на базе резонаторных кювет, и стробоскопической системы регистрации с использованием излучения импульсно-периодических лазеров. Обсуждается принцип действия использованной системы регистрации. Система использует метод стробирования с применением счета фотонов. Для исследования ВИ порошков была разработана установка, работающая по схеме «на просвет» и «на отражение» (рис. 1): 1 – лазер на парах меди, 2, 2' – кварцевые световоды, 3 – минирезонаторная кювета с порошком, 4 – собирающая линза, 5 – светофильтр, 6 – монохроматор, 7 – блок управления монохроматором, 8 – ФЭУ, 9 – блок питания ФЭУ, 10 – строб-формирователь, 11 – усилитель, 12 – линия задержки, 13 – компьютер, 14 – оптическое волокно. Лазерная генерация ($\lambda = 510,6$ или $578,2$ нм) производилась в виде коротких импульсов (20 нс), с частотой повторения 16 кГц. При помощи светофильтра можно было выделить лишь одну из линий генерации (например, зеленую линию с $\lambda = 510,6$ нм), средняя мощность которой составляла 5 Вт. Для усиления сигнала ВИ в порошках нами были изготовлены специальные минирезонаторные кюветы — фотонные ловушки (кюветы имели диаметр

капилляра 1,5–3 мм и длину 20–50 мм), т.е. кюветы, в которых излучение претерпевает многократное отражение и рассеяние. Установлено, что форма резонаторной кюветы с конусообразной полостью (рис. 2) оказалась самым оптимальным вариантом для усиления сигналов ВИ (*1 – возбуждающее излучение; 2 – исследуемое вещество (порошок); 3 – абсорбционный фильтр; 4 – вторичное излучение; 5 – входной световод; 6 – выходной световод*). Внутренние стенки такой кюветы характеризуются высоким коэффициентом отражения как возбуждающего, так и ВИ, а размер входного и выходного отверстий много меньше линейных размеров кюветы. Отражателями также могут служить частицы дисперсной среды, помещенной внутрь кюветы.

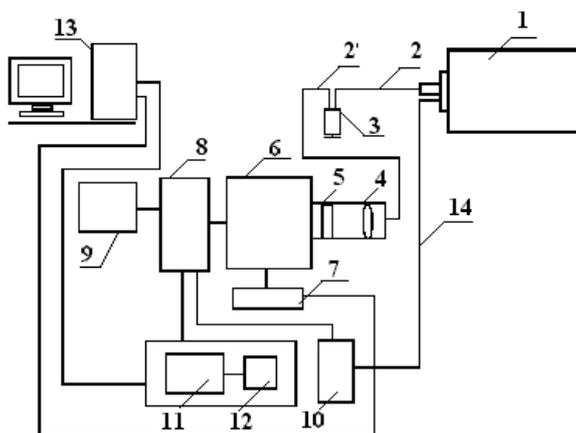


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для изучения ВИ в порошках (схема «на отражение»)

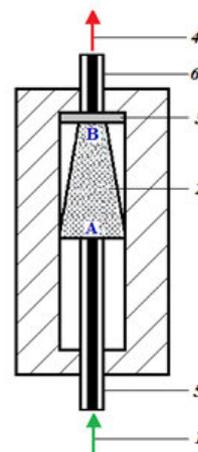


Рис. 2. Устройство фотонной ловушки с конусным резонатором (схема «на просвет»)

Рассмотрим для примера усиление сигнала КРС в минирезонаторной кювете. Отношение интенсивности КРС $I_{КРС}$ в спектре ВИ к интенсивности падающего излучения $I_{возб}$ в однородной среде можно записать в виде:

$$\frac{I_{КРС}}{I_{возб}} = \sigma N L \delta\Omega, \quad (1)$$

где σ – эффективное сечение КРС ($\sigma \approx 10^{-28}$ см²). N – концентрация частиц, L – путь, пройденный фотоном возбуждающего излучения в образце, $\delta\Omega$ – телесный угол, в котором изучается исследуемое излучение. При анализе порошков в обычных кюветах длиной ≈ 1 см отношение интенсивности КРС $I_{КРС}$ в спектре ВИ к интенсивности возбуждающего излучения при концентрации частиц и угле сбора рассеянного излучения $\delta\Omega = 1$ ср составляет

$$\frac{I_{КРС}}{I_{возб}} \approx 10^{-6}. \quad (2)$$

При использовании замкнутой резонаторной кюветы, характеризующейся высоким коэффициентом отражения внутренних стенок, заполненной однородной молекулярной средой и имеющей входное и выходное отверстия, размер которых много меньше линейных размеров кюветы, на выходе из кюветы может быть существенно увеличено отношение интенсивности ВИ к

первичному за счет процессов многократного отражения первичного и вторичного излучения от внутренних стенок кюветы. Например, при задержке возбуждающего излучения внутри кюветы на время $t=100$ нс эффективная длина пути l возбуждающего излучения в соответствии с формулой $l=ct$ составит 30 м. Таким образом, для кюветы длиной $l_0=3 \cdot 10^{-3}$ м получаем возрастание вторичного излучения в $l/l_0=10^4$ раз. Соответственно увеличивается контраст, т.е. $I_{\text{ВИ}}/I_{\text{возб}} > 10^4$ ($I_{\text{возб}}$ – интенсивность излучения на несмещенной частоте на выходе из кюветы). Для увеличения времени задержки возбуждающего излучения в кювете необходимо уменьшить размер выходного отверстия и обеспечить высокий коэффициент отражения внутренней полости кюветы.

В третьей главе «**Морфологические, структурные и оптические свойства неорганических порошков**» представлены экспериментальные данные об исследованиях спектральных и энергетических характеристик ВИ в микро- и нанопорошках алмаза, селенида и оксида цинка, а также морфология и результаты элементного анализа оксидов цинка и иттрия. Продемонстрированы и проанализированы зависимости интенсивности ФЛ микропорошков ZnO и ZnSe от уровня накачки. Исследованы зависимости интенсивности КРС микропорошков алмаза от уровня накачки. Изучен механизм возникновения спектров ФЛ в микропорошках Y_2O_3 , связанные с собственными точечными дефектами. Исследован эффект комбинационной опалесценции в МП алмаза в фотонных ловушках. Эффекты, впервые обнаруженные на этих образцах, проанализированы и им дана качественная и приближенная количественная интерпретация.

Из рассмотрения изображения сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) порошков ZnO (рис. 3, а) можно видеть, что образцы представляют собой рыхлые образования в виде агломератов неправильной формы с поперечными размерами до 8 мкм с развитой поверхностью, пронизанные сквозными порами. Основная фракция — 0,7–1 мкм. Агломераты легко разрушаются при воздействии на них небольшим механическим усилием. Из элементного анализа видно, что в исследованных порошках не содержатся посторонние примеси (рис. 3, б).

На рис. 4 представлены спектры ФЛ микропорошков ZnO, полученных при различных плотностях мощности накачки ($\lambda_{\text{возб}}=255,3$ нм). При малой интенсивности возбуждающего излучения спектр ФЛ, имеет максимум в области 386 нм (кривые 1 и 2). При интенсивности возбуждения более $15 \cdot 10^6$ Вт/см² (кривые 3–5) наблюдается сужение линии экситонной ФЛ, интенсивность которой растет нелинейно при дальнейшем повышении интенсивности накачки (рис. 5). Кроме того, наблюдается сужение полосы ФЛ и максимум интенсивности спектра сдвигается в длинноволновую область до 4 нм. При интенсивности возбуждения $24 \cdot 10^6$ Вт/см² (кривая 6) зависимость переходит на насыщение. Такая зависимость интенсивности ФЛ от плотности мощности накачки указывает на переход от спонтанного к стимулированному механизму УФ излучения в микропорошках ZnO. Однако отсутствие

существенного сужения спектра свидетельствует о том, что в наших экспериментах реализуются лишь пороговые эффекты для вынужденной ФЛ.

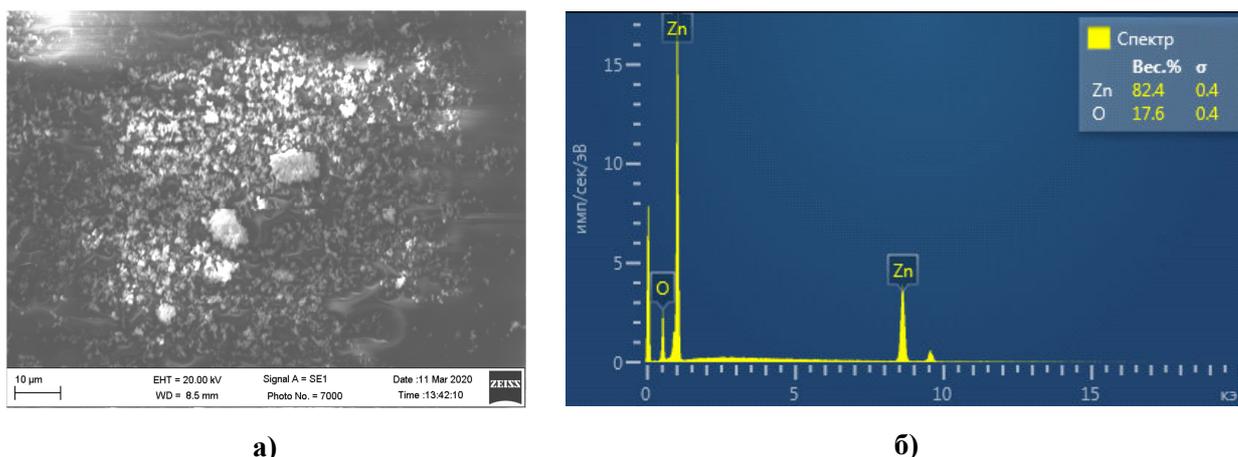


Рис. 3. СЭМ-изображение микропорошков ZnO (а) и их элементный состав (б)

Для анализа интенсивности ФЛ (I) использовалось выражение

$$I = \eta \cdot I_{\text{возб}}^{\alpha}, \quad (3)$$

где $I_{\text{возб}}$ – плотность мощности возбуждающего излучения, η – квантовый выход, α характеризует механизм излучательной рекомбинации. Для экситонной рекомбинации $1 < \alpha < 2$, для фундаментального излучения $\alpha \approx 2$ и для переходов с примесных уровней $\alpha < 1$.

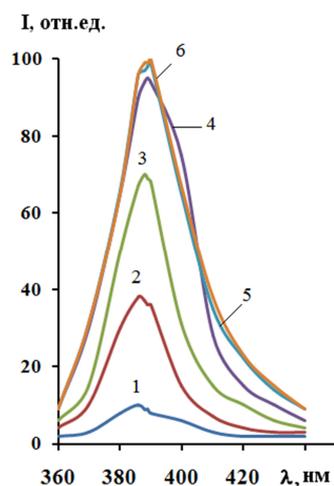


Рис. 4. Спектры ФЛ МП ZnO ($d_{\text{ср}}=0,8$ мкм), полученных при различных плотностях мощности возбуждающего излучения ($I_{\text{возб}}$): кривая (1) соответствует $I_{\text{возб}}=5$; (2) - $I_{\text{возб}}=11$; (3) - $I_{\text{возб}}=15$; (4) - $I_{\text{возб}}=18$; (5) - $I_{\text{возб}}=21$; (6) - $I_{\text{возб}}=24$ ($I_{\text{возб}}$ - 10^6 Вт/см 2)

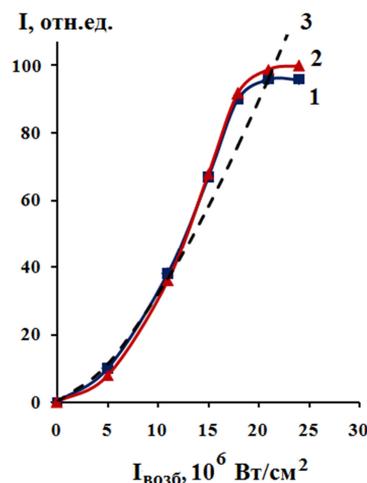


Рис. 5. Зависимости интенсивности ФЛ МП ZnO ($d_{\text{ср}}=0,8$ мкм) (I) от плотности мощности возбуждающего излучения ($I_{\text{возб}}$). Кривая (1) соответствует длине волны $\lambda=386$ нм. (2) - $\lambda=390$ нм. (3) - теоретическая зависимость, соответствующая закону $I \approx I_{\text{возб}}^{1.5}$

Действительно, при наших условиях эксперимента ($I_{\text{возб}} \sim 10^6$ Вт/см 2) для МП ZnO (см. рис. 4 и рис. 5) наблюдается степенная зависимость с $\alpha \approx 1,5$

(кривая 3), что соответствует значению $\alpha=1,5\pm 0,2$ в случае объемного ZnO. При больших плотностях мощности наступает замедление роста интенсивности ФЛ (см. рис. 5, кривые 1 и 2), которое может быть вызвано так и тепловым воздействием, так и генерацией дефектов посредством фотолиза и термодеструкции. Аналогичная закономерность наблюдалась в работах других исследователей для монокристаллов и квантовых точек (КТ) ZnO. Пик в области 386–390 нм соответствует положению $3L_0$ полосы из серий многофононной аннигиляции A-экситонов. Однако, как видно из экспериментальных исследований в спектрах ФЛ в наших образцах отсутствовали полосы ФЛ в видимой области спектра. Часто в экспериментах наблюдают зеленую ФЛ с максимумом в диапазоне 450–550 нм и связывают природу данной полосы с наличием кислородных вакансий, хотя некоторые другие примеси также могут играть роль. Отсутствие видимой ФЛ в наших образцах указывает на низкую концентрацию или отсутствие дефектов кислорода, связанную с высокой чистотой исследованных микропорошков ZnO по данным элементного анализа (см. рис. 3, б).

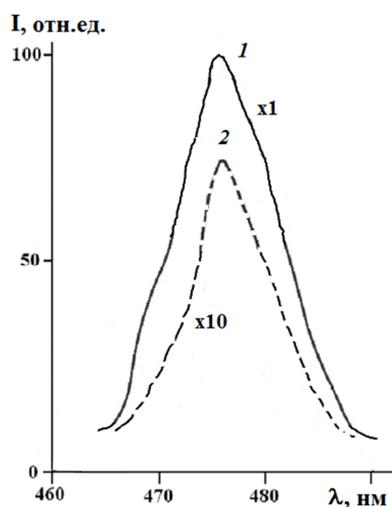


Рис. 6. Спектры ФЛ НП (1) и МП ZnSe ($d_{\text{ср}}=2$ мкм), полученный при возбуждении УФ излучением 4-ой гармоникой ($\lambda_{\text{возб}}=266$ нм) лазера на алюмоиттриевом гранате

На рис. 6 приведены спектры ФЛ нано- (1) и микропорошков ZnSe, полученные при возбуждении УФ излучением 4-ой гармоникой ($\lambda_{\text{возб}}=266$ нм) лазера на алюмоиттриевом гранате. Спектры получены при комнатной температуре. Как видно из рисунка, эти спектры по форме не отличаются, однако интенсивность НП ZnSe в 14 раз выше интенсивности МП ZnSe. На выходе из минирезонаторной кюветы лазерное (возбуждающее) излучение является подавленным по отношению к интенсивности ФЛ, по сравнению с обычной системой возбуждения ВИ. Максимум интенсивности в спектрах

ФЛ микро- и нанопорошков ZnSe ($\lambda_{\text{макс}}=476$ нм) наблюдается при многофононной аннигиляции A-экситонов (A^{3L_0}). На рис. 7 приведены спектры КРС МП алмаза, полученные в кюветах различных конструкций, при одинаковых режимах регистрации. Кривая 1 соответствует цилиндрической кювете со сравнительным большим объемом (диаметр кюветы – 18 мм), а кривая 2 – в так называемой резонаторной кювете, в которой диаметр капилляра равен 3 мм. Перед щелью монохроматора был установлен светофильтр OG-1, ослабляющий возбуждающую линию ЛПМ ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм) в 100 раз при полном пропускании сигнала КРС на расстоянии 800 см^{-1} от возбуждающей линии. Как видно из этого рисунка,

сигнал КРС в резонаторной кювете почти в 1000 раз больше, чем в цилиндрической кювете с большим диаметром.

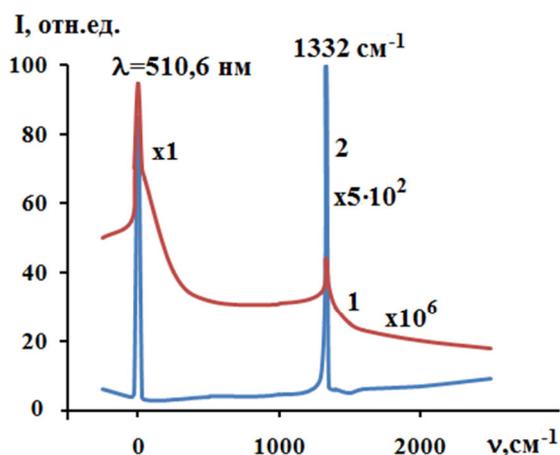


Рис.7. Спектры КРС МП алмаза ($d_{cp}=10$ мкм) в цилиндрической кювете (1) и в резонаторной кювете (2) ($I_{возб} \sim 10^5$ Вт/см²)

Увеличение фона в спектре ФЛ МП при 510,6 нм обусловлено сильной ФЛ дефектов вакансий азота, так как при использовании лазерного возбуждения в видимой области (510,6 нм) приводит к возникновению достаточно интенсивной ДВЛ в алмазах при плотностях мощности возбуждающего излучения $\sim 10^6 - 10^8$ Вт/см². Для уменьшения фона ДВЛ и увеличения сигнала КРС мы использовали плотность мощности возбуждающего излучения $I_{возб} \sim 10^5$ Вт/см².

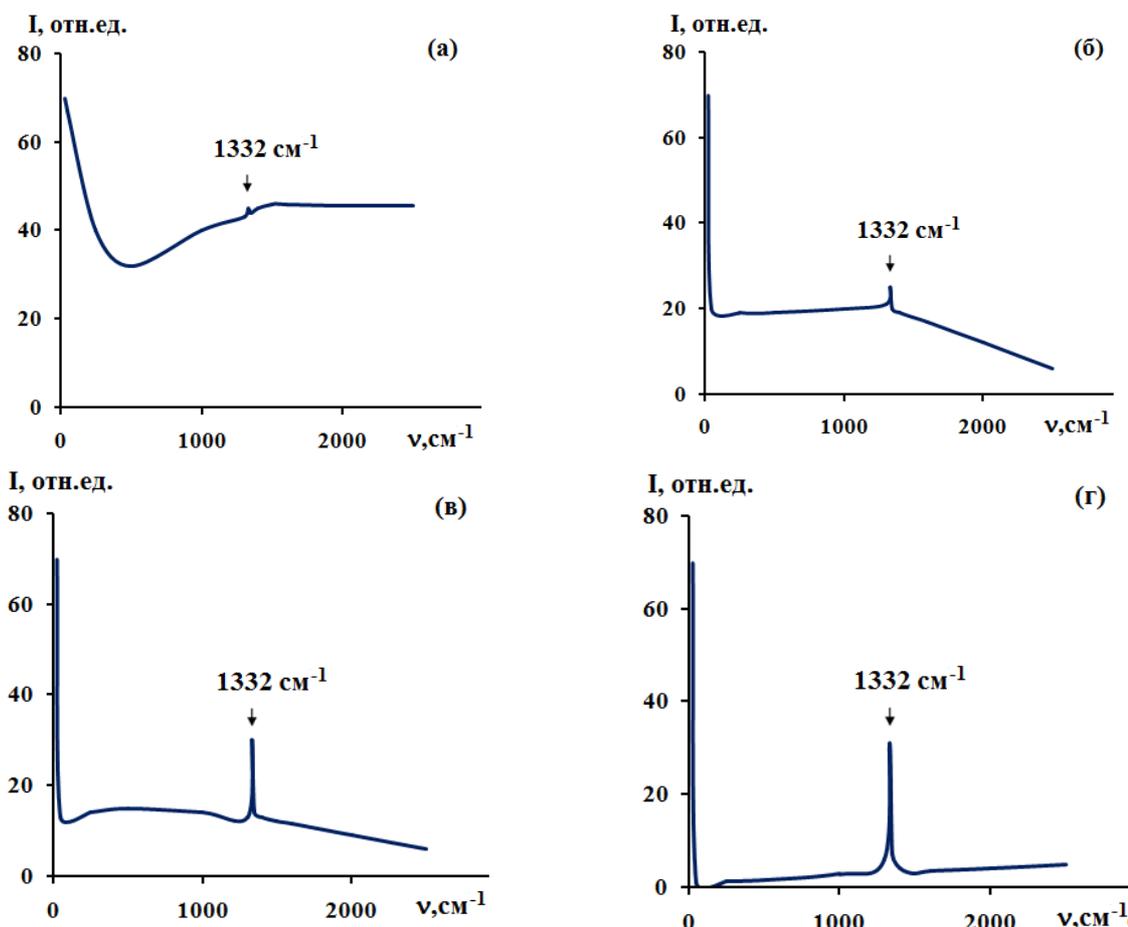


Рис. 8. Спектры КРС МП и НП алмазов различных размеров при возбуждении зеленой линией лазера на парах меди ($\lambda_{возб}=510,6$ нм): (а) - $d_{cp}=4$ нм (в матрице из KBr с концентрацией 1мас.%); (б) - $d_{cp}=0,5$ мкм; (в) - $d_{cp}=1$ мкм; (г) - $d_{cp}=50$ мкм ($I_{возб} \sim 10^6$ Вт/см²)

Спектры КРС МП и НП алмазов различных размеров при их возбуждении зеленой линией ЛПМ ($\lambda_{возб}=510,6$ нм) представлены на

рис. 8. Практически на всех образцах видна линия $\nu=1332\text{ см}^{-1}$, соответствующая фундаментальному колебанию решетки алмаза. Регистрация узкой линии на данной частоте подтверждает наличие кристаллической фазы алмаза в исследуемых образцах. Однако, во всех спектрах присутствует люминесцентный фон во всей области спектра, связанной с ДВЛ. При увеличении МП в диапазоне до 50 мкм сплошной фон резко падает и интенсивность КРС на фундаментальной моде 1332 см^{-1} относительно фона увеличивается (рис. 8, з). Интенсивность 1332 см^{-1} возрастает по мере увеличения средних размеров МП и достигает максимума при 50 мкм. Интенсивность КРС НП алмаза является очень слабой на фоне ФЛ. Также были исследованы зависимости интенсивности КРС МП алмаза ($d_{\text{ср}}=10\text{ мкм}$) от уровня накачки. При повышении плотности мощности возбуждающего излучения была обнаружена слабая нелинейность (зависимость характеризуется явным отклонением от $I \approx I_{\text{возб}}^{1.25}$).

В фотонных ловушках интенсивность КРС МП алмазов на выходе из кюветы существенно возрастает (см. рис. 7, кривая 2): наблюдается существенное возрастание относительной интенсивности КРС в сравнении с интенсивностью возбуждающей линии (режим комбинационной опалесценции). Это объясняется значительным увеличением полного пути, который фотон возбуждающего излучения проходит в исследуемом веществе, за счет многократного отражения от стенок ловушки и рассеяния на неоднородностях среды. Как известно, отношение интенсивности КРС $I_{\text{КРС}}$ в спектре ВИ к интенсивности возбуждающего излучения $I_{\text{возб}}$ в однородной среде записывается в виде формулы (1).

Для фотонной ловушки, используемой в эксперименте (рис. 2), расстояние между входным и выходным торцами световодов, т.е. перемещение фотона в фотонной ловушке, равнялось $R=1\text{ см}$. Длина свободного пробега фотона в ультрадисперсной среде может считаться сравнимой с размерами частиц, т.е. $\Delta x \approx 10^{-4}\text{ см}$. Тогда полный путь, пройденный фотоном возбуждающего излучения в фотонной ловушке, равен $L \approx 10^4\text{ см}$. В то же время при использовании фотонной ловушки телесный угол рассеянного излучения $\delta\Omega \approx 4\pi$. Такой выбор $\delta\Omega$ обусловлен тем, что возбуждающее излучение, попадая в фотонную ловушку, многократно отражается от ее стенок и от поверхностей частиц ультрадисперсной среды. При использовании фотонной ловушки с рабочим объемом $\sim 1\text{ см}^3$ контрастность КРС в спектре ВИ веществ, находящихся в ультрадисперсной форме, по сравнению обычными кюветами возрастает на 5-6 порядков и составляет:

$$\frac{I_{\text{КРС}}}{I_{\text{возб}}} = 10^{-1} - 10^{-2}. \quad (4)$$

Таким образом, в результате использования разработанной фотонной ловушки контрастность КРС на выходе из кюветы для веществ, находящихся в ультрадисперсной форме, по сравнению с обычными типовыми кюветами возрастает на пять порядков. При этом наблюдается комбинационная

опалесценция, т.е. сигнал КРС в спектре ВИ оказывается сравнимым по интенсивности с возбуждающим излучением (см. рис. 7, кривая 2). Во всех исследованных образцах алмаза обнаружены полосы в области 410–460 нм в спектре ФЛ, связанные с примесями азота (N3-дефекты).

В четвертой главе «Использование лазерной спектроскопии для анализа ароматических соединений и биоактивных препаратов» приведены экспериментальные результаты по исследованию спектров ВИ микро- и нанопорошков ароматических соединений и биоактивных препаратов (аспирин, анальгин, цитрамон, парацетамол, РОРОР, РРО, соевая мука, насыщенные жирные кислоты $C_nH_{2n}O_2$). Выполнен сравнительный анализ спектров одно- и двухфотонно-возбуждаемой люминесценции ряда микропорошков фармацевтических препаратов. Впервые был зарегистрирован эффект комбинационной опалесценции в МП РОРОР и РРО, помещенных в фотонные ловушки, при котором интенсивность КРС становится сравнимой с интенсивностью возбуждающего излучения, а также удалось наблюдать довольно интенсивных линий КРС, находящиеся вблизи линии возбуждающего лазерного излучения. Впервые изучены энергетические характеристики ДВЛ в микропорошках генетически модифицированной соевой муки. Обнаружено проявление в спектрах КРС жидких образцов насыщенных жирных кислот $C_nH_{2n}O_2$ интенсивных и достаточно узких полос, обусловленных продольными акустическими колебаниями (LAM). При переходе от жидкой фазы к твердому (порошку) LAM обретает релаксационный характер ($n > 10$), что обусловлено возникновением межмолекулярного взаимодействия в твердой фазе. Обнаруженные закономерности спектров КРС объяснены при помощи модели двухатомной кристаллической цепочки конечной длины.

На рис. 9. представлены спектры ФЛ микропорошков анальгина при возбуждении УФ излучением ($\lambda_{\text{возб}}=255,3$ нм) и спектр ДВЛ микропорошков анальгина при возбуждении излучением ЛПМ ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм). Спектр ФЛ МП анальгина представляет полосу в диапазоне 430–800 нм с двумя максимумами 461 и 660 нм. В отличие от спектра резонансной ФЛ второй максимум спектра ДВЛ ($\lambda_{\text{мак}}=648$ нм) существенно сдвинут в коротковолновую область на 12 нм. Эти спектры отличаются друг от друга интенсивностью. Спектральная интенсивность спектра ДВЛ ($\lambda_{\text{мак}}=648$ нм) меньше соответствующей интенсивности спектра ФЛ ($\lambda_{\text{мак}}=660$ нм) примерно в 12 раз. Полученные спектры отличаются от спектра ФЛ водного раствора анальгина, известного из литературы: в спектре обнаруживается ФЛ с двумя максимумами 650 и 457 нм.

На рис. 10 приведены спектры ФЛ МП парацетамола при возбуждении УФ излучением ($\lambda_{\text{возб}}=255,3$ нм) и спектр ДВЛ МП парацетамола при возбуждении излучением ЛПМ ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм). Спектры ФЛ и ДВЛ отличаются друг от друга интенсивностью, формой и положением. Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что в спектре ДВЛ отсутствует пик в коротковолновой области и максимум в длинноволновой области сдвинут на

5 нм ($\lambda_{\text{макс}}=650$ нм). Необходимо отметить, что двухфотонные и однофотонные спектры несут разную информацию. Так, например, в дипольном приближении двухфотонные переходы разрешены между состояниями одинаковой четности, тогда как однофотонные — между состояниями разной четности.

Наблюдаемые спектры ДВЛ в фармацевтических объектах является результатом переходов с первого возбужденного электронного состояния ароматической молекулы на колебательные подуровни основного состояния. При этом коротковолновый край наблюдаемых спектров соответствует $\pi^*-\pi$ электронному переходу бензольного кольца молекулы этих структур (табл. 1). Длинноволновой континуум можно объяснить проявлением переходов связанных с колебательной структурой рассматриваемых молекул и энергетической зоной экситонных состояний.

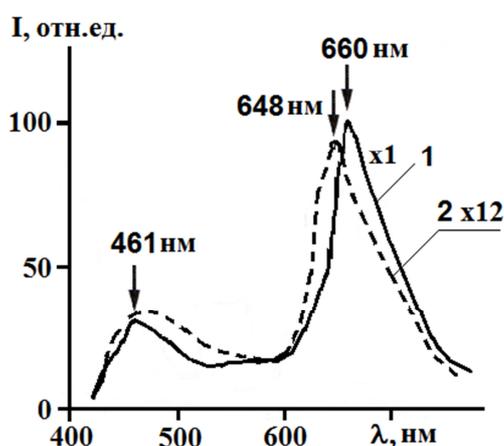


Рис. 9. 1 – спектр ФЛ МП анальгина при возбуждении УФ излучением ($\lambda_{\text{возб}}=255,3$ нм); 2 – спектр ДФЛ МП анальгина, при возбуждении двумя зелеными квантами ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм) лазера на парах меди

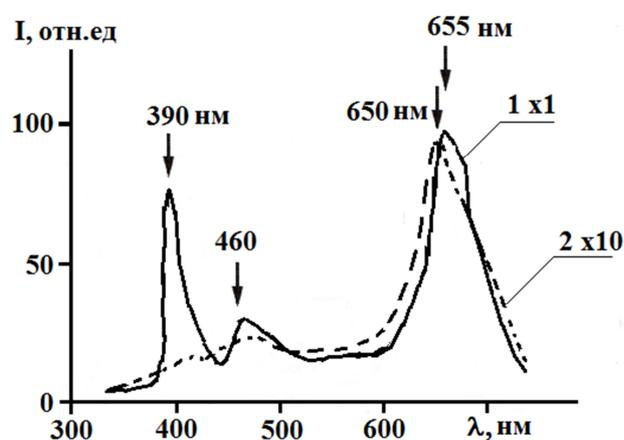


Рис. 10. 1 – спектр ФЛ МП парацетамола, при возбуждении УФ излучением ($\lambda_{\text{возб}}=255,3$ нм); 2 – спектр ДВЛ МП парацетамола, при возбуждении двумя зелеными квантами ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм) лазера на парах меди

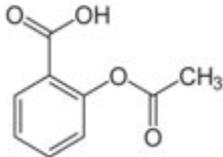
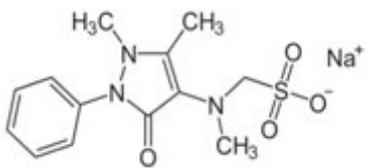
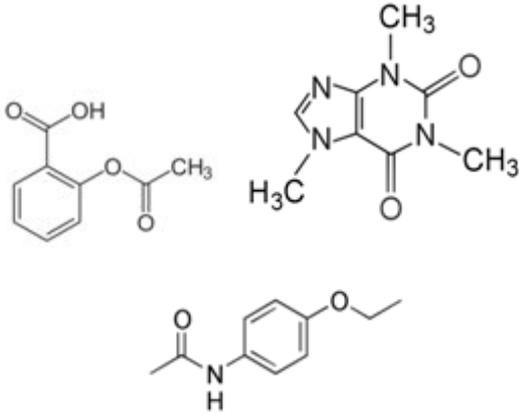
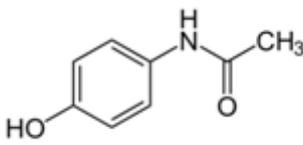
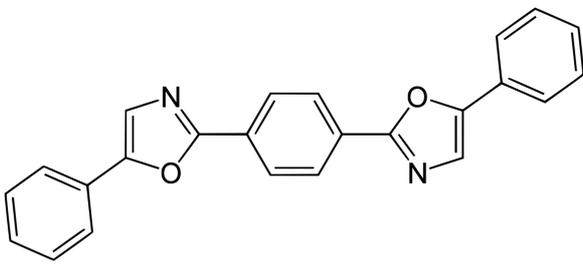
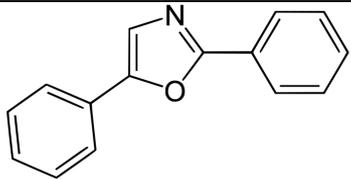
Обнаруженные эффекты – перераспределение интенсивности в спектрах ВИ ароматических веществ можно объяснить переходом от режима спонтанной ФЛ к режиму суперлюминесценции. Это связано с заселением возбужденного синглетного терма ароматической молекулы под влиянием интенсивного импульсного УФ лазерного излучения. Природа эффекта соответствует аналогичному механизму в лазерах на красителях. Коэффициент усиления можно найти по следующей формуле:

$$K = \sigma \cdot (N_1 - N_0) \approx \sigma \cdot N_1 \quad (5)$$

При условии, что величина эффективного сечения $\sigma \approx 10^{-16}$ см², а концентрация молекул в водном растворе $N_1 \approx 10^{17} \div 10^{18}$ см⁻³, получаем, что коэффициент усиления $K \approx 10-100$ см⁻¹.

Таблица 1.

Химические и структурные формулы фармацевтических препаратов

Название вещества	Химическая формула	Структурная формула
Аспирин	$C_9H_8O_4$	
Анальгин	$C_{13}H_{16}N_3NaO_4S$	
Цитрамон (аспирин, кофеин, фенацетин)	$C_9H_8O_4 +$ $C_8H_{10}N_4O_2 +$ $C_{10}H_{13}NO_2$	
Парацетамол	$C_8H_9NO_2$	
1,4-ди-2-(5-фенилоксазол)бензол (РОРОР)	$C_{24}H_{16}N_2O_2$	
2,5-дифенилоксазол (РРО)	$C_{15}H_{11}NO$	

В соответствии с законом Бугера для активной среды ($L=0,1\div 1$ мм) имеем:

$$I(L) = I_0 \cdot e^{KL} \approx (10^2 - 10^3) \cdot I_0 \quad (6)$$

Особенностью наблюдаемого эффекта является проявление суперлюминесценции в УФ области спектра, соответствующей положению первого возбуждённого электронного синглетного терма (S_1) в исследуемых ароматических веществах.

Полициклические, конденсированные углеводороды обладают плоской жесткой структурой, что способствует проявлению колебательной структуры полос. Колебательная структура полос этого класса соединений обусловлена преимущественно полносимметричными колебаниями углеродного скелета молекулы (ν_{C-C}). В этих случаях возможно применение классификации по симметрии энергетических состояний и установление правил отбора для рассматриваемой молекулы. Полициклические ароматические соединения являются хорошими люминофорами и используются как активная среда для лазеров на красителях. При этом наибольший квантовый выход люминесценции реализуется для высокосимметричных молекул.

На рис. 11 представлены спектры КРС исследуемых порошков (РОРОР, РРО), помещенных в фотонные ловушки. На этих спектрах линии КРС обозначены стрелками, а положение возбуждающей линии – пунктиром. При этом интенсивность КРС в спектрах ВИ при используемых условиях регистрации возбуждающая линия не проявлялась: использование фотонной ловушки позволило резко увеличить относительную интенсивность КРС в сравнении с интенсивностью возбуждающей линии. При этом наблюдается комбинационная опалесценция, т.е. сигнал КРС в спектре ВИ оказывается сравнимым по интенсивности с возбуждающим излучением. Однако, ранее не удавалось полностью подавить возбуждающую линию (рис. 11), что является хорошим результатом с практической точки зрения для регистрации слабых сигналов ВИ.

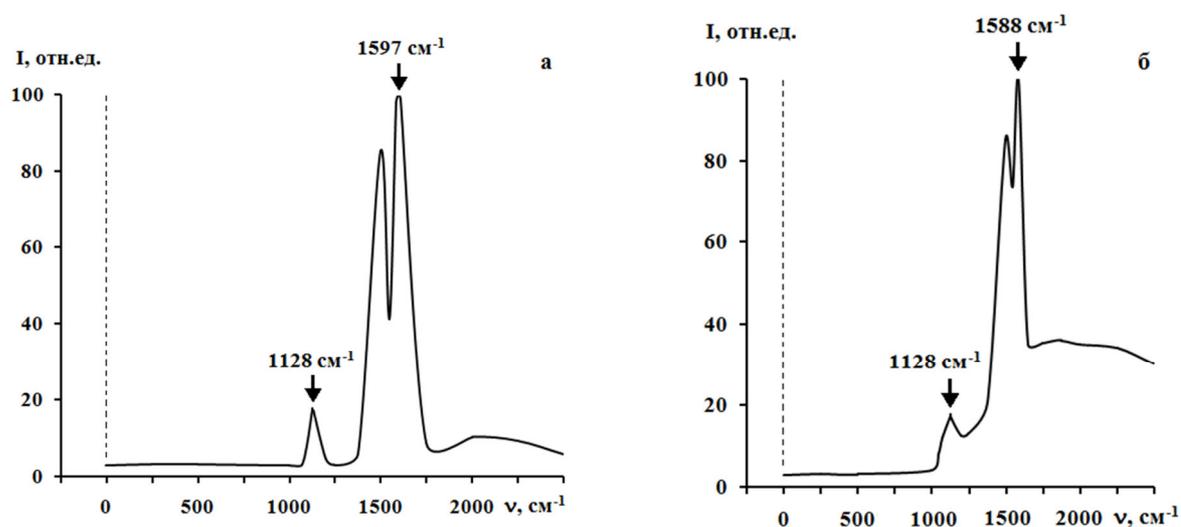


Рис.11. Спектры КРС полициклических ароматических соединений при возбуждении ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм) лазером на парах меди: а – РОРОР, б – РРО

Известно, что флуоресценция, как явление, более чем в 10^4 – 10^7 раз интенсивнее по сравнению с эффектом КРС. Поэтому при попытках возбудить КРС (в видимой области) часто в спектре не наблюдается ничего, кроме флуоресценции. Ответственны за нее следовые количества примесей, слои на поверхности полимеров, добавки и очистка от которых в случае молекулярных соединений в отличие от низкомолекулярных чрезвычайно затруднительна, а часто и невозможна. Именно это обстоятельство является главной из причин отсутствия опубликованных коллекций «эталонных» спектров КРС высокомолекулярных соединений.

Анализ спектров ДВЛ соевой муки состоял из двух серий измерений. Первая серия измерений проводилась с так называемым контрольным образцом – немодифицированной соевой мукой, путем тщательного измельчения зрелых генетически немодифицированных бобов. Во второй серии исследовались образцы ТГ-сои, полученные в результате применения специальных технологических методов генетической модификации.

На рис. 12, а показаны спектры ДВЛ муки немодифицированной сои, полученные при $T=300$ К при различных интенсивностях возбуждающего излучения. Все спектры зарегистрированы при одинаковых технических условиях записи спектров, что исключает возникновение различий, вызванных методикой. Наблюдаемый нами при малой интенсивности лазерного (возбуждающего) излучения (кривая 1) спектр ДВЛ имеет максимум в области 360 нм. При повышении интенсивности возбуждающего излучения интенсивность спектра ДВЛ резко возрастает. При этом спектр ДВЛ (кривая 2) состоит из несколько взаимно перекрывающихся полос, расположенных в диапазоне 280–510 нм. В УФ области (вблизи 300 нм) обнаруживается «ступенчатый» максимум. Этот максимум относится к проявлению хромофорных групп нуклеиновых оснований, входящих в состав ДНК и РНК. В этой области спектра обычно обнаруживается полоса флуоресценции белков, связанная главным образом с проявлением гетероароматической аминокислоты — триптофана. Кроме того, вклад в этот максимум может вносить также соответствующая хромофорная группа нуклеиновых оснований, входящих в состав ДНК и РНК соевой муки. При малой интенсивности возбуждающего излучения (рис. 12, б, кривая 1) спектр ДВЛ имеет максимум в области 360 нм, аналогично спектру ДВЛ немодифицированной сои (рис. 12, а, кривая 1). При нарастании интенсивности возбуждающего излучения интенсивность спектра ДВЛ резко возрастает. При этом максимум спектра не меняется (рис. 12, а, кривая 2). С дальнейшим возрастанием интенсивности возбуждающего излучения (кривая 3) в спектре формируются два узких пика с максимумами 360 нм и 390 нм. В отличие от немодифицированного образца сои «ступенчатый» максимум в УФ области (300 нм) не наблюдается. При больших интенсивностях возбуждающего излучения интенсивность ДВЛ во всех исследованных образцах изменяется по квадратичному закону. Причиной

этого может быть процесс перехода от спонтанной люминесценции к вынужденной.

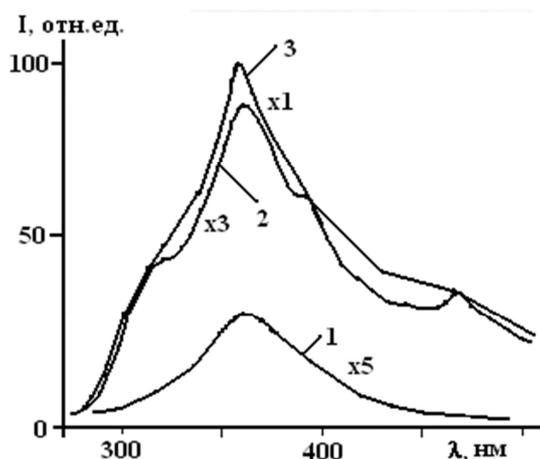


Рис. 12,а. Спектры ДВЛ немодифицированной соевой муки при $T=300$ К и различных интенсивностях возбуждающего излучения ($\lambda_{\text{возб}}=578,2$ нм): кривая (1) соответствует интенсивности $I_{\text{возб}}=10$; (2) - $I_{\text{возб}}=15$; (3) - $I_{\text{возб}}=20$ ($I_{\text{возб}} \sim 10^7$ Вт/см²)

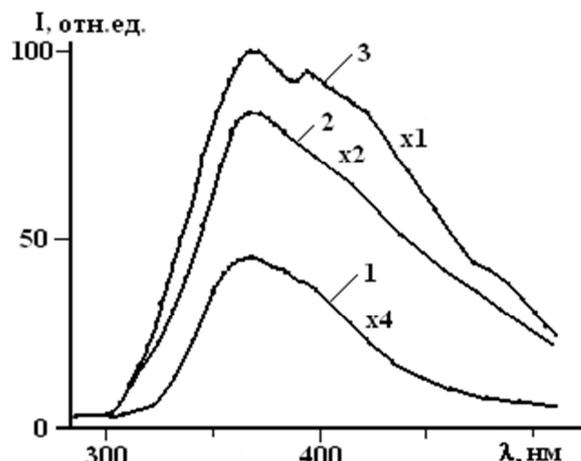


Рис. 12,б. Спектры ДВЛ муки генетически модифицированной сои при $T=300$ К и различных интенсивностях возбуждающего излучения ($\lambda_{\text{возб}}=578,2$ нм): кривая (1) соответствует интенсивности $I_{\text{возб}}=10$; (2) - $I_{\text{возб}}=15$; (3) - $I_{\text{возб}}=20$ ($I_{\text{возб}} \sim 10^7$ Вт/см²)

Таким образом, в данном исследовании показано, что при возбуждении импульсным лазерным излучением наблюдается спектр ДВЛ соевой муки, полоса которой расположена в области 280–510 нм. В результате сравнения полученных спектров ДВЛ для ряда образцов соевой муки, включая генетически модифицированные образцы, установлено, что при переходе от немодифицированных к трансгенным продуктам формы спектров ДВЛ и их максимумы видоизменяются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования, проведенного по теме «Вторичное излучение в микро- и нанопорошках при импульсно-периодическом лазерном возбуждении», сделаны следующие выводы.

1. Разработана оригинальная методика регистрации спектров вторичного излучения в микро- и нанопорошках полупроводников и диэлектриков на основе новых типов минирезонаторных кювет (фотонных ловушек), волоконно-оптической техники и импульсно-периодических лазеров. Чувствительность предложенного метода достигает 10^{-10} г.
2. Впервые создан автоматизированный многоканальный спектрометр, защищенный патентом на полезную модель и позволяющий проводить анализ КРС в порошкообразных сред, уменьшающий влияние фоновой засветки и увеличивающий точности измерений.

3. Впервые показано, что в микропорошках алмаза, РОРОР и РРО в фотонных ловушках возможно наблюдение явления «комбинационной опалесценции», приводящей к резкому (на 5–6 порядков) возрастанию интенсивности КРС в среде.
4. Обнаружено, что с уменьшением размера порошков ZnO от микро размеров к наноразмером максимум УФ полосы слегка перемещается в коротковолновую область. Впервые установлено, что структура спектров ФЛ не зависит от размеров микрокристаллов алмаза.
5. Выявлено, что при увеличении плотности мощности возбуждающего излучения порядка 10^6 Вт/см² в микропорошках ZnO и ZnSe для экситонной ФЛ наблюдается переход от спонтанной люминесценции к стимулированной, т.е. к суперлюминесценции. Показано, что интенсивность излучения зелено-желтой полосы ФЛ ($\lambda_{\text{мак}}=560$ нм) микропорошков ZnSe линейно изменяется с уровнем возбуждения.
6. Обнаружены некоторые отличительные особенности представления спектров ФЛ и ДВЛ: сдвиг максимума и изменения в форме и ширине спектральных полос для нанопорошков неорганических веществ (алмаз, ZnO, ZnSe) по сравнению со спектром в крупных кристаллах.
7. Обнаружен эффект суперлюминесценции в микропорошках ароматических веществ в УФ области спектра, соответствующей положению первого возбуждённого электронного синглетного терма.
8. Впервые изучены энергетические характеристики ДВЛ в микропорошках генетически модифицированной соевой муки.
9. Обнаружено проявление в спектрах комбинационное рассеяние света жидких образцов насыщенных жирных кислот $C_nH_{2n}O_2$ интенсивных и достаточно узких полос, обусловленных продольными акустическими колебаниями (LAM) и установлено, что частоты этих мод монотонно изменяются с изменением длины молекулы. Обнаруженные закономерности спектров КРС объяснены при помощи модели двухатомной кристаллической цепочки конечной длины.

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

**NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN
NAMED AFTER MIRZO ULUGBEK**

KURBONOV ABDULLA KENJAEVICH

**SECONDARY RADIATION IN MICRO- AND NANOPOWDERS UNDER
PULSED-PERIODIC LASER EXCITATION**

01.04.05 – Optics

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

Tashkent – 2020

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2018.2.PhD/FM246.

Dissertation has been prepared at the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek and P.N.Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

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

Scientific supervisor:

Rakhmatullaev Ilyos Arzimurodovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Official opponents:

Nematov Sherzod Qalandarovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Eshchanov Bakhodir Khudayberganovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organization:

Samarkand State University

The defense will take place on «15» 12 2020 at 16⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies

(Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

The PhD dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 7) (Address: 100125, 33, Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on «5» 12 2020.

(Mailing report № 7 on «5» 12 2020).



Kh.B.Ashurov

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical science, professor

I.D.Yadgarov

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

B.E.Umirzakov

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

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

Topicality and necessity of the dissertation. At present, the investigations for searching of the perspective materials that could be meet the growing needs of industry, and especially high-tech areas such as nanoelectronics, photonics, computer technology, laser systems, are actual in the world. In recent years, a new trend has been rapidly developing in optics related to the investigations of optical processes in micro- and nanostructured systems, including their powder forms. Today, in the world micro- and nanopowders have acquired great interest due to development of new synthesis methods, as well as their wide practical use. The interest is caused by the unique electrophysical, optical, thermal, mechanical and other properties, which are very differ from the properties of big bulk crystals. Decreasing of in the size of small particles below a certain limit leads to spatial quantization of the translational motion of elementary excitations in ultrasmall particles and to changing in the energy structure of quasiparticles, also the interaction between these particles. Recently, in connection with the further development of laser technology for the observation of secondary radiation (SR) in such media, high-power pulsed-periodic metal vapor lasers are used. The lifetime of SR depends on the type of process and the characteristics of the material medium.

The basic properties of SR in micropowders (MP) and nanopowders (NP) have been investigated in numerous studies. However, the excitation and the main characteristics of SR in MP and NP until recently remained insufficiently studied.

This dissertation work is devoted to detailing experimental study, identification of features and mechanisms of nature of SR spectra in MP and NP of a number of inorganic and aromatic compounds under pulsed-periodic laser excitation.

The aim of the research work is determination of features of formation of SR spectra in MP and NP of inorganic and aromatic aromatic compounds and bioactive preparations under pulse-periodic laser excitation.

The object of the study is MP and NP of a number of inorganic substances (diamond, zinc selenide, zinc oxide, yttrium oxide) and aromatic aromatic compounds and bioactive preparations (aspirin, analgin, citramone, paracetamol, 1,4-di-2-(5-phenyloxazole) benzene - POPOP, 2,5-diphenyloxazole - PPO, soy flour, saturated fatty acids $C_nH_{2n}O_2$).

The scientific novelty of the research is as follows:

an original technique for recording the SR spectra in semiconductors MP and NP and dielectrics was developed on the basis of new types of mini-resonator cells (photon traps), fiber-optic equipment, and pulsed-periodic lasers;

for the first time, the conditions for the appearance of the effect of "combination opalescence" and an increase in the efficiency of Raman scattering in diamond micropowders, POPOP and PPO in photon traps, consisting in a sharp increase in the relative intensity of Raman scattering in comparison with the intensity of the exciting line at the exit from the resonator cells, were discovered;

it was found that decreasing in the size of ZnO powders from micro-to nanosize, the maximum of the UV band slightly shifts to the short-wavelength region. It was established for the first time that the structure of the PL spectra does not depend on the size of diamond microcrystals;

it was found that an increasing in the power density of the exciting radiation of the order of 10^6 W/cm² in ZnO and ZnSe micropowders for exciton PL, a transition from spontaneous to stimulated luminescence is observed, i.e. transition to superluminescence;

for the first time, an automated multichannel spectrometer was created that allows analysis of Raman scattering for the powdery media, that reduces the effect of background illumination and increases the measurement accuracy, protected by a patent for a utility model;

a superluminescence effect was detected in the UV region of the spectrum corresponding to the position of the first excited electron singlet term in the aromatic substances under study;

for the first time, the energy characteristics of TPEL in micro-powders of genetically modified soy flour were studied;

the manifestation in the Raman scattering spectra of liquid samples of saturated C_nH_{2n}O₂ fatty acids of intense and fairly narrow bands caused by longitudinal acoustic oscillations (LAM) was detected. It is established that the frequencies of these modes change monotonically with a change in the length of the molecule.

Implementation of the research results. Based on the results of the study of SR in micro- and nanopowders with pulse-periodic laser excitation obtained:

a small-sized portable spectrometer was created and received a utility model patent of the Agency for Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan ("Multichannel spectrometer", No. FAP 01158, 11.11.2016). The developed spectrometer operates in automatic mode, which has a high accuracy, allowing to record weak the Raman spectra of powdered samples $\sim 10^{-10}$ g.

the obtained scientific results on the study of the regularity of the photoluminescence (PL) spectra under one- and two-photon excitation of micro- and nanopowders ZnO were used in the implementation of the fundamental project F2-FA-F147 on the topic: "Study of the physical mechanisms of highly efficient conversion of solar energy in the primary processes of photosynthesis" (Reference No. 2/1255-1992 of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan dated July 18, 2019). The use of these scientific results made it possible to determine information about defects and important absorption-fluorescent spectral characteristics of ZnO crystals.

Structure and volume of the dissertation. The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion and list of cited literature including 47 figures and 5 tables. The text of the dissertation is presented on 156 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Азаматов З.Т., Редкоречев В.И., Хусаинов И.А., Курбанов А.К. Многоканальный спектрометр // Патент на полезную модель № FAP 01158, зарегистр. в АИС РУз от 11.11.2016 г.

2. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Азаматов З.Т., Редкоречев В.И., Курбанов А.К. Энергетические и спектральные характеристики вторичного излучения ряда неорганических и органических соединений микронного и субмикронного размеров // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2013.– № 1-2. – С.201-207 (05.00.00.№ 21).

3. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Азаматов З.Т., Редкоречев В.И., Курбанов А.К. Возбуждение комбинационных оптических процессов импульсно-периодическим лазером в нанопорошках // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2014.–Т.16, №5. – С.376-379 (01.00.00.№ 5).

4. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Азаматов З.Т., Редкоречев В.И., Курбанов А.К. Применение фотолюминесцентного анализа для контроля порошков фармацевтических препаратов // Научный вестник СамГУ. – Самарканд, 2014. – № 5. – С.79-82 (01.00.00. № 2).

5. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбанов А.К. Органик мухитлар ва биологик объектларда изохрон флуоресценция спектрлари // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2015. – № 6. – С.25-27 (01.00.00.№7).

6. Rakhmatullaev I.A., Gorelik V.S., Kurbanov A.K. Isochronic secondary radiation in aromatic compounds // Research in Environment and Life Sciences.– India, 2015.–Vol. 8, No.3.– P.403-406 (Current NAAS Rating: 3.74).

7. Рахматуллаев И.А., Семенов Д.И., Горелик В.С., Курбанов А.К., Сабиров Л.М., Рамазанов А.Х., Амирджанова С.А., Самаритдинова Ф.М. Применение фотолюминесцентного анализа для исследования нанопорошков // Вестник НУУз. – Ташкент, 2017. – № 2/2. – С.191-195 (01.00.00.№ 8).

8. Ilyos A. Rakhmatullaev, Vladimir S. Gorelik and Abdulla K. Kurbanov. Spectra of two-photon-excited luminescence in genetically modified soy flour // World Journal of Engineering Research and Technology.– India, 2018.– Vol.4, Issue 6.– P.61-65 (IF: 0,27).

9. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбанов А.К. Спектры фотолюминесценции порошков фармацевтических препаратов, находящихся в фотонных ловушках // Наука и мир. – Волгоград, 2018. – №10(62). – С.36-39. (GIF: 0.325).

II бўлим (II часть, part II)

10. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Азаматов З.Т., Редкоречев В.И., Курбанов А.К. Инновационные методы анализа спектров вторичного излучения в ароматических соединениях при лазерном возбуждении // «Роль

научно - технической информации в развитии инновационной деятельности»: Труды Межд. науч.-практ. конф. 2 ноября 2012. – Ташкент, 2012. – С.258-261.

11. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Азаматов З.Т., Редкоречев В.И., Курбонов А.К. Люминесценция микро- и ультрадисперсных фармацевтических препаратов при двухфотонном возбуждении // «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред»: Матер. IV Межд. конф. 29-31 мая 2013. – Самарканд, 2013. – С.35.

12. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Азаматов З.Т., Редкоречев В.И., Курбанов А.К., Тураев Б.М. Фотолюминесценция микропорошков в селенида и оксида цинка при лазерном возбуждении // «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах»: Матер. III Межд. конф. 14-15 ноября 2014. – Фергана, 2014. – С.42-45.

13. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбонов А.К. Лазер спектроскопиясининг озиқ-овқат маҳсулотларини таҳлил қилиш учун қўлланилиши // «Актуальные проблемы современной физики и астрофизики»: Сб.тезисов III Респ.конф. 23 мая 2015. – Карши, 2015. – С.7-8.

14. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбонов А.К., Рамазанов А.Х. Икки фотонли уйғотилган люминесценция – микрозаррачаларни ўрганиш усулидир // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Матер. Межд. конф. 5-6 ноября 2015. – Ташкент, 2015. – С.61-64.

15. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбонов А.К., Рамазанов А.Х. Вторичное излучение порошков фармацевтических соединений при ультрафиолетовом лазерном возбуждении // «Современные проблемы физики конденсированного состояния»: Сб.тезисов Респ.конф. 12-14 апреля 2016. – Бухара, 2016. – С.83-84.

16. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбонов А.К. Спектры фотолюминесценции нанопорошков алмаза и оксида цинка при лазерном возбуждении // «Современные проблемы физики и технологий»: Сб.тезисов V Межд. молодеж. науч. школы-конф. 18-23 апреля 2016. – Москва, 2016. – С. 331-333.

17. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбонов А.К., Амирджанова С.А. Спектры флуоресценции нанопорошков фармацевтических ароматических соединений при лазерном возбуждении // «Фундаментальные проблемы оптики»: Матер. IX Межд. конф. ФПО-2016, 17-21 октября 2016. – Санкт-Петербург. – С.28-29.

18. Rakhmatullaev I.A., Gorelik V.S., Kurbonov A.K. Laser Raman and photoluminescence spectroscopy of condensed dielectrics // “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Prospectives”: Book of Abstracts of International Symposium, November 10-11, 2016. – Tashkent, 2016. – P.111-113.

19. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбонов А.К., Азаматов З.Т. Особенности регистрации спектров вторичного излучения в ультрадисперсных системах // Научный журнал Физика. – Бишкек,

Кыргызстан. – 2016. – №1. – С.45-50

20. Rakhmatullaev I.A., Semenov D.I., Kurbonov A.K., Sabirov L.M. Diagnostics of nanopowders with ultraviolet laser radiation // 7-ая Межд. конф. по Физической электронике ИРЕС-7: Матер. 7-ой Межд. конф., 18-19 мая 2018. – Ташкент. – С.105.

21. Rakhmatullaev I.A., Semenov D.I., Gorelik V.S., Kurbonov A.K. Isochronous fluorescence of nanopowders of zinc selenide and zinc oxide // «Физика твердого тела, функциональные материалы и новые технологии» (ФТТ-2018): Матер. XIV Межд. науч. конф. 1-4 августа 2018. – Караганда, Казахстан, 2018. – С.214-216.

22. Рахматуллаев И.А., Горелик В.С., Курбонов А.К. Спектры фотолюминесценции в порошках оксида цинка при лазерном возбуждении // «Яримўтказгичлар физикасининг ҳозирги замон муаммолари»: Матер.Межд. науч. конф. 26-27 октября 2018.– Ташкент, 2018. – С.217-218.

23. Рахматуллаев И.А., Турсункулов О.М., Тукфатуллин О.Ф., Курбонов А.К. Морфологические и спектрально-люминесцентные свойства микропорошков оксида иттрия // «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы». Часть III. «Материалы, технологии и компоненты полупроводниковой опто-, нано- и микроэлектроники»: Сб.статей Межд. науч.-реценз. конф. 28 мая 2020. – Ташкент, 2020. – С.308-314.

Босишга рухсат этилди: _____ .2020 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 2,9. Адади: 100. Буюртма: №.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.